



**BELEDİYE ATIK YAKMA FIRINI (BAYF)  
KÜLÜNÜN ZEMİN İYİLEŞTİRMESİNDE  
KULLANILABİLİRLİĞİ ÜZERİNE DENEYSEL BİR  
DEĞERLENDİRME**

**2024  
YÜKSEK LİSANS TEZİ  
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ**

**Nurullah TATAR**

**Tez Danışmanı  
Prof. Dr. İnan KESKİN**

**BELEDİYE ATIK YAKMA FIRINI (BAYF) KÜLÜNÜN ZEMİN  
İYİLEŞTİRMESİNDE KULLANILABİLİRLİĞİ ÜZERİNE DENEYSEL BİR  
DEĞERLENDİRME**

**Nurullah TATAR**

**Tez Danışmanı  
Prof. Dr. İnan KESKİN**

**T.C.  
Karabük Üniversitesi  
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü  
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında  
Yüksek Lisans Tezi  
Olarak Hazırlanmıştır**

**KARABÜK  
Haziran 2024**

Nurullah TATAR tarafından hazırlanan “BELEDİYE ATIK YAKMA FIRINI (BAYF) KÜLÜNÜN ZEMİN İYİLEŞTİRMESİNDE KULLANILABİLİRLİĞİ ÜZERİNE DENEYSEL BİR DEĞERLENDİRME” başlıklı bu tezin Yüksek Lisans Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. İnan KESKİN

.....

Tez Danışmanı, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından Oy Birliği ile İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir. 11/06/2024

Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu)

İmzası

Başkan : Prof. Dr. İnan KESKİN (KBÜ)

.....

Üye : Doç. Dr. Halil İbrahim YUMRUTAŞ (KBÜ)

.....

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Ermedin TOTİÇ (BARÜ)

.....

KBÜ Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulu, bu tez ile, Yüksek Lisans derecesini onamıştır.

Doç. Dr. Zeynep ÖZCAN

.....

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

*“Bu tezdeki tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu; ayrıca bu kuralların ve ilkelerin gerektirdiği şekilde, bu çalışmadan kaynaklanmayan bütün atıfları yaptığımı beyan ederim.”*

Nurullah TATAR

## **ÖZET**

**Yüksek Lisans Tezi**

**BELEDİYE ATIK YAKMA FIRINI (BAYF) KÜLÜNÜN ZEMİN  
İYİLEŞTİRMESİNDE KULLANILABİLİRLİĞİ ÜZERİNE DENEYSEL BİR  
DEĞERLENDİRME**

**Nurullah TATAR**

**Karabük Üniversitesi**

**Lisansüstü Eğitim Enstitüsü**

**İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Tez Danışmanı:**

**Prof. Dr. İnan KESKİN**

**Haziran 2024, 73 sayfa**

Dünya nüfusu arttıkça bu artışa paralel olarak evsel ve endüstriyel atık oranı da artmaktadır. Bu durum atıkların kullanılabilirliği gibi sorunları beraberinde getirmektedir. Son zamanlarda popüler hale gelen atıkların yakılarak enerji üretimi elde edilmesi sonucu kül ortaya çıkmaktadır. Bu çıkan külün kullanılabilirliği henüz literatüre girmemiştir. Atıkların yakılması sonucu oluşan bu küllerin kullanılması yeni bir sorun olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu çalışmada, evsel atıkların enerji üretimi amacıyla belediyeler tarafından yakılması sonucu ortaya çıkan BAYF külünün zeminlerin iyileştirilebilmesinde kullanılabilirliği araştırılmıştır. Bu amaçla Tokat Karben A.Ş'den elde edilen bentonit ile Karabük ilinin Safranbolu ilçesinden elde edilen dere kumu 10 nolu elek ile elendikten sonra, bentonit/dere kumu oranı 1/1 olacak şekilde ham (referans) numune hazırlanmıştır. Bu karışıma Malatya Büyükşehir Belediyesi ve MİMSAN Grup ortaklığında kurulan atık geri dönüşüm tesisinde evsel atıkların yakılması sonucu ortaya çıkan BAYF külü, 10 nolu elekten

geçirilerek ham numunenin ağırlığına %2,5, %5, %10, %15 ve %20 eklenip optimum su içerikleri ile numuneler hazırlanmıştır. Optimum su içeriğinde hazırlanan numuneler 1, 7, 14, 21 ve 28 günlük küre bırakılmış; kür sonucunda tek eksenli basınç deneyi, üç eksenli basınç deneyi ve şişme basıncı deneyleri uygulanmıştır. Deneyler sonucunda içsel sürtünme açısı, kohezyon ve şişme basıncı değerleri bulunmuştur. Bu deneylere ek olarak karışımların optimum kür gününde SEM ve X ışını kırınımı (XRD) analizi yapılarak numunelerin iç yapısı incelenmiştir. Sonuç olarak, BAYF külü katkılı zemin numunesinin referans numuneye göre dayanım açısından arttığı, şişme potansiyeli açısından azaldığı gözlemlenmiştir. Bu sonuçlar çerçevesinde BAYF külünün zemin parametrelerini iyileştirmede alternatif bir ürün olabileceği değerlendirilmiş ve BAYF külünün doğaya bırakılarak çevre zararının engellenebileceği aynı zamanda da bu ürünün atık yönetimi anlamında yeşil bir dönüşüm olacağı değerlendirilmiştir.

**Anahtar Sözcükler :** Zemin iyileştirme, zemin dayanımı, Belediye Atık Yakma Fırını külü, geri dönüşüm, bentonit, evsel atık, atık yönetimi

**Bilim Kodu :** 91105

## **ABSTRACT**

**M. Sc. Thesis**

### **AN EXPERIMENTAL EVALUATION ON THE USABILITY OF MUNICIPALITY WASTE INCINERATION FURNACE (MSWI) ASH IN GROUND IMPROVEMENT**

**Nurullah TATAR**

**Karabük University  
Institute of Graduate Programs  
Department of Civil Engineering**

**Thesis Advisor:**

**Prof. Dr. Inan KESKIN**

**June 2024, 73 pages**

As the world population increases, the rate of domestic and industrial waste also increases in parallel with this increase. This situation brings with it problems such as the usability of waste. Ash is produced as a result of energy production by burning waste, which has become popular recently. The usability of this resulting ash has not yet entered the literature. The use of these ashes resulting from the burning of waste emerges as a new problem. In this study, the usability of BAYF ash, which is produced as a result of burning domestic waste by municipalities for energy production, in improving soils was investigated. For this purpose, bentonite obtained from Tokat Karben A.Ş. and river sand obtained from Safranbolu district of Karabük province were sieved with a No. 10 sieve and a raw (reference) sample was prepared with a bentonite/stream sand ratio of 1/1. Then MSWI ash, which is produced as a result of the incineration of domestic waste in the waste recycling plant established in partnership with Malatya Metropolitan Municipality and MİMSAN Group, was added

to the soil mixture at 2.5%, 5%, 10%, 15% and 20% by weight after passing through a No. 10 sieve. Samples with these proportions were prepared considering the optimum water content. Samples prepared at optimum water content were left to cure for 1, 7, 14, 21, and 28 days. As a result of the cure, uniaxial pressure test, triaxial pressure test, and swelling pressure tests were applied. As a result of the experiments, internal friction angle, cohesion, and swelling pressure values were found. In addition to these experiments, the internal structure of the samples was examined by SEM and X-ray diffraction (XRD) tests on the mixtures on optimum curing days. As a result, it was observed that the MSWI ash-added soil sample increased in terms of strength and decreased in terms of swelling potential compared to the reference sample. Within the framework of these results, it was evaluated that BAYF ash could be an alternative product to improve soil parameters, and it was evaluated that environmental damage could be prevented by releasing BAYF ash to nature, and at the same time, this product would be an environmentally friendly transformation in terms of waste management.

**Key Word** : Soil improvement, strength of soil, municipal waste incinerator ash, recycling, bentonite, household waste, waste management

**Science Code** : 91105



## TEŞEKKÜR

Bu tez alıőmasının planlanmasında, araőtırılmasında, yürütülmesinde ve oluşumunda ilgi ve desteğini esirgemeyen danıőman hocam Prof. Dr. İnan KESKİN'e ve Araştırma Görevlisi Selman KAHRAMAN'a teőekkürlerimi sunuyorum.

Gerek lisans öncesi ve lisans hayatım boyunca gerekse de yüksek lisans hayatım boyunca bana her türlü desteği veren sevgili babam Murat TATAR'a ve sevgili annem Aynur TATAR'a en içten teőekkürlerimi sunuyorum.

Yapılan deneylerin yapılma amacını BAYF külu tedarik konusunda yardımlarını esirgemeyen ağabeyim Furkan TATAR'a ve MİMSAN Grup yöneticilerine teőekkürlerimi sunuyorum. Ayrıca bentoniti tedarik etmemizde yardımlarını esirgemeyen Tokat Karben A.ő yöneticilerine teőekkürlerimi sunuyorum.

Bu tez, Karabük Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü'nce **KBÜBAP-23-YL-025** Proje numarasıyla desteklenmiőtir. Desteklerinden dolayı Karabük Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü'ne teşekkür ederim.

## İÇİNDEKİLER

	<b><u>Sayfa</u></b>
KABUL .....	ivi
ÖZET.....	iv
ABSTRACT .....	vi
TEŞEKKÜR .....	viii
İÇİNDEKİLER .....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xii
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	xiv
SİMGELER DİZİNİ.....	xv
KISALTMALAR DİZİNİ .....	xvi
BÖLÜM 1 .....	1
GİRİŞ .....	1
BÖLÜM 2 .....	3
LİTERATÜR ARAŞTIRMASI .....	3
BÖLÜM 3 .....	13
ZEMİN İYİLEŞTİRİLME YÖNTEMLERİ .....	13
3.1. ZEMİNLERİN YERİNDE İYİLEŞTİRİLMESİ İLE İLGİLİ YÖNTEMLER	
.....	14
3.1.1. Donatılı Zemin-Çelik Kullanımı veya Geosentetik Yöntemler (Fiber	
Güçlendirme).....	14
3.1.2. Hafif Malzemelerin Kullanımı.....	15
3.1.3. Fiziko- Kimyasal Yöntemler (Katkı Malzemeleri, Enjeksiyon	
Yöntemleri) .....	16
3.1.3.1 Kompaksiyon Enjeksiyonu .....	16
3.1.3.2 Jet Grouting.....	16

	<b><u>Sayfa</u></b>
3.1.3.3. Patlatma Metodu .....	17
3.1.3.4. Dondurma Metodu.....	17
3.1.3.5. Isıtma Metodu .....	18
3.1.4. Hidrolik Yöntemler.....	18
3.1.4.1. Taş Kolonlar.....	18
3.1.4.2. Ön Yükleme .....	20
3.1.4.3. Yeraltı Su Seviyesinin Düşürülmesi .....	20
3.1.5. Dinamik Kompaksiyon.....	22
3.2. TOPRAK DOLGULARDA KULLANILACAK ZEMİNLERİN MALZEME ÖZELİKLERİNİN İYİLEŞTİRİLMESİ .....	23
3.2.1. Katkı Malzemeleri Kullanılması ile Zemin Özelliklerinin İyileştirilmesi .....	23
3.2.1.1. Kireç ile Zemin Stabilizasyonu.....	23
3.2.1.2. Çimento ile Zemin Stabilizasyonu.....	23
3.2.1.3. Uçucu Kül ile Zemin Stabilizasyonu .....	24
3.2.1.4. Bitüm ile Zemin Stabilizasyonu.....	24
3.2.1.5. Diğer Katkı Maddeleri ile Zemin Stabilizasyonu .....	24
 BÖLÜM 4 .....	 26
MATERYAL VE METOT .....	26
4.1. MATERYAL .....	27
4.1.1. Bentonit.....	27
4.1.2. Dere Kumunu.....	29
4.1.3. BAYF Külü.....	30
4.2. METOD .....	33
4.2.1. Numune Hazırlama.....	33
4.2.2. Tanımlama Deneyleri .....	36
4.2.2.1. Standart Proktor Deneyi.....	36
4.2.2.2. Serbest Basınç Deneyi .....	36
4.2.2.3. Üç Eksenli Basınç Deneyi.....	37
4.2.2.4. Şişme Basıncı Deneyi .....	38
4.2.2.5. X Işını Kırınımı Analizi (XRD) .....	39

	<b><u>Sayfa</u></b>
BÖLÜM 5 .....	40
BULGULAR .....	40
5.1. DENEYSEL ÇALIŞMALAR .....	40
5.1.1. Standart Proktor Deneyi.....	40
5.1.2. Serbest Basınç Deneyi .....	42
5.1.3. Üç Eksenli Basınç Deneyi .....	44
5.1.4. Şişme Basıncı Deneyi.....	47
5.1.5. Mikro Analiz Sonuçları .....	51
BÖLÜM 6 .....	55
SONUÇLAR .....	55
KAYNAKLAR .....	58
ÖZGEÇMİŞ .....	73

## ŞEKİLLER DİZİNİ

### Sayfa

Şekil 1.1. Pasifik okyanusu çöp sahası.....	1
Şekil 2.1. Dünya bankası kıtaların yıllık çöp üretim verisi.....	4
Şekil 2.2. Dünya bankası günlük kişi başına düşen çöp üretim miktarı.....	5
Şekil 3.3. Zemin türlerine göre en uygun zemin iyileştirme yöntemi.....	13
Şekil 3.4. Geosentetik uygulaması.....	14
Şekil 3.5. Donatı tipi ve geometrisi.....	15
Şekil 3.6. Tuzlu su ve nitrojen ile dondurma yöntemi .....	17
Şekil 3.7. Vibro kompaksiyon yöntemi aşamaları .....	19
Şekil 3.8. Vibro yer değiştirme yöntemi aşamaları.....	19
Şekil 3.9. Vibro öteleme yöntemi aşamaları .....	20
Şekil 3.10. Dinamik kompaksiyon uygulama aşamaları .....	22
Şekil 4.1. Deneylerde kullanılan bentonit.....	29
Şekil 4.2. Deneylerde kullanılan kum.....	30
Şekil 4.3. Çalışmada kullanılacak kuma ait granülometre eğrisi .....	30
Şekil 4.4. Atık geri dönüşüm tesisi .....	31
Şekil 4.5. Külün oluşum süreci .....	31
Şekil 4.6. Deneylerde kullanılan BAYF külü .....	32
Şekil 4.7. Deney akış diyagramı .....	34
Şekil 4.8. Kompaksiyon deney ekipmanları.....	36
Şekil 4.9. Serbest basınç deneyi cihazı .....	37
Şekil 4.10. Üç eksenli basınç deneyi cihazı .....	38
Şekil 4.11. (a)Şişme basıncı cihazının şematik görüntüsü, (b) Şişme basıncı cihazı.	39
Şekil 4.12. XRD test cihazı.....	39
Şekil 5.1. Kompaksiyon deneyi sonuçları.....	41
Şekil 5.2. Kür süresi ve karışım miktarlarına göre serbest basınç deneyi sonuçları ..	42
Şekil 5.3. Serbest basınç deneyi kür değişim grafiği .....	43
Şekil 5.4. Serbest basınç deneyi % artış oranları .....	43
Şekil 5.5. Kür süresi-İçsel sürtünme açısı değerleri.....	44
Şekil 5.6. Karışım Oranları-İçsel sürtünme açısı değerleri.....	45

## **Sayfa**

Şekil 5.7. Kür süresi-Kohezyon değerleri.....	46
Şekil 5.8. Karışım Oranları-Kohezyon değerleri .....	46
Şekil 5.9. %2,5 BAYF külü katkılı numune şişme basıncı grafiği .....	48
Şekil 5.10. %5 BAYF külü katkılı numune şişme basıncı grafiği .....	48
Şekil 5.11. %10 BAYF külü katkılı numune şişme basıncı grafiği .....	49
Şekil 5.12. %15 BAYF külü katkılı numune şişme basıncı grafiği .....	49
Şekil 5.13. %20 BAYF külü katkılı numune şişme basıncı grafiği .....	50
Şekil 5.14. Optimum karışım oranı ve kür süreleri şişme basıncı grafiği.....	50
Şekil 5.15. SEM analizleri; BK (a), BK%10 BAYF (b), BK%20 BAYF (c) .....	52
Şekil 5.16. SEM analizleri boşluk yüzde oranları; BK (a), BK%10 BAYF (b), BK%20 BAYF (c) .....	53
Şekil 5.17. XRD sonuçları .....	54

## ÇİZELGELER DİZİNİ

	<b><u>Sayfa</u></b>
Çizelge 3.1. Zemin iyileştirme yöntemleri değerlendirme tablosu.....	25
Çizelge 4. 1. Deneylerde kullanılan sodyum bentonitin özellikleri.....	28
Çizelge 4. 2 Fiziko-kimyasal analizi.....	32
Çizelge 4. 3. Organik içerik analizi.....	33
Çizelge 4. 4. İnorganik içerik analizi .....	33
Çizelge 4. 5. Deney programı.....	35
Çizelge 4. 6. Yapılan deney sayıları.....	35
Çizelge 5. 1. Standart proktor deneyi sonuçları .....	41
Çizelge 5. 2. İyileşme oranları .....	47
Çizelge 5. 3. Optimum şişme maximum gerilme değerleri.....	51

## SİMGELER DİZİNİ

### SİMGELER

$Al_2O_3$	: Alüminyum Oksit
$^{\circ}C$	: Santigrat Derece
CAH	: Kalsiyum Alüminat
CH	: Kalsiyum Hidrat
CSH	: Kalsiyum Silika Hidrat
CaO	: Kalsiyum Oksit
$Fe_2O_3$	: Demir III Oksit
$K_2O$	: Potasyum Oksit
$LN_2$	: Nitrojen
MgO	: Magnezyum Oksit
$Na_2O$	: Sodyum Oksit
$SiO_2$	: Silikon Dioksit



## KISALTMALAR DİZİNİ

### KISALTMALAR

ASTM	: American Society for Testing and Materials (Amerika Deneme ve Malzeme Topluluğu)
BAYF	: Belediye Atık Yakma Fırını
BK	: Bentonit Kum
CBR	: Kaliforniya Taşıma Oranı Deneyi
KK	: Karbon Karası
MARGEM	: Karabük Üniversitesi Demir Çelik Kampüsü Malzeme Araştırma ve Geliştirme Merkezi
MSW	: Belediye Katı Atığı
MSWI	: Belediye Katı Atığı Fırını
PVC	: Polivinil Klorür
RHA	: Pirinç Kabuğu Külü
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
TOK	: Toplam Organik Karbon
TS	: Türk Standartları
TS EN	: Türk Standartları Enstitüsü
TÜİK	: Türkiye İstatistik Kurumu
UU	: Konsolidasyonsuz, Drenajsız
XRD	: X Işını Kırınım Deneyi
XRF	: X Işınları Florans

## BÖLÜM 1

### GİRİŞ

Dünyada nüfusun artışı ile beraber endüstriyel ve genel atık oranı gün geçtikçe artmaktadır. Atıkların özellikle kentsel alanlarda depolanması, çevreye zararları ve kullanılabilirliği/bertaraf edilebilirliği sorunların başında gelmektedir. Bu durumda birçok problemi beraberinde getirmektedir. Denizde veya okyanusta çöp adaları oluşumu, görüntü-koku kirliliği, kentlerde atık yığınlarından doğan metan gazı patlamaları gibi durumlar gerek çevresel gerek maddi gerekse de can kayıplarına neden olmaktadır [1].

Dünya atık sorunu deniz canlıları için de büyük sorunlar yaratmaktadır. Deniz canlılarını olumsuz etkilemekte olan atıkların neden olduğu kirlilik, suda yaşayan canlı popülasyonlarını etkilemekte, canlı tür çeşitliliği için tehlike arz etmektedir. Buna ek olarak su yüzeyinde atıklar birikmekte ve görüntü kirliliğine neden olmaktadır. Bu birikimler okyanuslarda birikerek çöp adaları oluşturmaktadır. Bu kirlilik o kadar büyük sorunlar yaratmaktadır ki Pasifik okyanusunda bulunan dünyanın en büyük çöp adası, yaklaşık Fransa'nın yüzölçümü büyüklüğündeki alanı kaplamaktadır (Şekil 1.1) [2].



Şekil 1.1. Pasifik okyanusu çöp sahası

Nüfusun artışına paralel olarak artan atık maddelerin depolanması büyük sorunlar yaratmaktadır. Dünya nüfusunun hızla kentleşmesi ile birlikte atıkların depolanacak alanlarının kısıtlanması ile ortaya çıkan atıkların depolanma sorunu ülkelerin diğer ülkelere çöp ihraç etmelerine neden olmaktadır [3]. Bu atık maddelerle yaşanan ekonomik ve çevresel sorunlar atık maddelerin geri dönüşümü gerekliliğini ortaya çıkarmaktadır. Geri dönüşüm ürünleri pek çok sektörde değerlendirilmiş aynı zamanda bu ürünler mühendislik çalışmalarının ilgi alanına girmiştir.

Yapı mühendisliğinde yapının oturacağı zeminin fiziksel ve mekanik özellikleri yapılacak projenin her zaman önemli bir kısmını oluşturmuştur. Yapı ihtiyacının artmasıyla birlikte sağlam zeminlerde yapılaşmanın yetersizliği nedeniyle yumuşak zeminlerde, bataklıklarda ve alüvyon arazilerde yapı inşa etme gereksinimleri doğmuştur [4,5]. Bu tür zayıf zeminlerin mekanik anlamda iyileştirilmesi üzerine geoteknik mühendisliği açısından birçok çalışma yapılmıştır ve yapılmaya devam etmektedir. [6–21].

Zemin stabilizasyon çalışmalarında katkı maddesi olarak atık maddeler önemli bir yer tutmaktadır. Gerek atık maddenin geri dönüşüme kazanılması gerekse de zeminlerin iyileştirilmesi konusunda atık maddeler çalışma konusudur. Zemin iyileştirme çalışmalarında yaygın olarak cüruf, uçucu kül, çimento, kireç gibi katkı maddeleri kullanılmaktadır. Bu malzemelere ilaveten; atık lastik, akasya zambkı, seramik tozu, çakıl taşı, karbon karası, deniz kabuğu, endüstriyel atıklar, atık pirinç kabuğu külü, cüruf, volkanik kül, talaş, mermer tozu, atık polivinil klorür (PVC) gibi maddeler de yer almaktadır [5,7,9,20,22,23].

Zemin stabilizasyon sorunu inşaat mühendisliğinin ve geoteknik mühendisliğinin en temel sorunlarının başında gelmektedir. Zemin iyileştirmede kullanılan yöntemlerin geliştirilmesi için birçok çalışma yürütülmüş ve yürütülmekte olup bu çalışma ile de belediye atıkları diye adlandırılan evsel atıkların zemin iyileştirilmesinde kullanılabilirliği test edilerek zemin problemlerinin çözümüne ve çevresel atık sorunun azaltılmasına alternatif bir malzeme önerilmesi hedeflenmektedir. Çalışma kapsamında elde edilecek sonuçların kabul edilebilir olması durumunda ekonomik olarak daha maliyetli yöntemler kullanmak yerine evsel atıkların zemin

iyileştirilmesinde kullanılması ile bahsi geçen her iki problemin çözümüne alternatif üretilmiş olacaktır. Ayrıca atıklardan dolayı oluşan depolama ve kullanılabilirlik sorununa da çözüm getirilmesi de diğer bir kazanım olarak değerlendirilmiştir.

## BÖLÜM 2

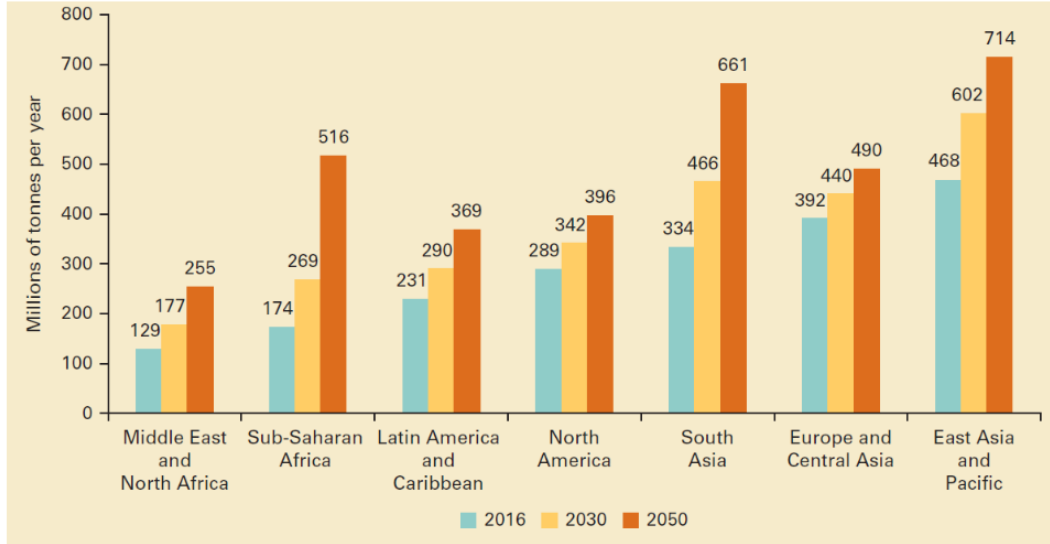
### LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Kentsel, endüstriyel ve tehlikeli atıklar gibi atık maddelerin güvenli bir şekilde bertarafı, son yıllarda hem kentlerde hem de kırsal çevrede en büyük zorluklardan biri olmuştur. Bu tür atıklar, bir kısmının biyolojik olarak parçalanamaması nedeniyle çevredeki bertaraf alanı için çevre kirliliği sorunları oluşturmaktadır [24]. Son dönemlerde çeşitli yollarla açığa çıkan farklı atıkların problemlili zeminlerde mekanik ve fiziksel iyileştirici olarak kullanılması yaygınlaşmaktadır [23,25–29]. Dünya nüfusunun artışıyla doğru oranda artan evsel atığın gelecek için büyük sorunlar yaratması öngörülmektedir. Teknolojinin gelişmesiyle birlikte bazı belediyeler tarafından toplanan bu evsel atıklar yakma merkezlerinde yakılarak kül halinde depolanmakta olup söz konusu atıkların nasıl kullanılması gerektiği önemli bir soru olarak karşımıza çıkmaktadır. Dünya genelinde her gün artan geri dönüşüm tesislerinde atıkların yanması sonucu açığa çıkan uçucu külün henüz kullanım alanı literatürde geniş bir çerçevede incelenmemiştir. Bu çalışmada Belediye Atık Yakma Fırını (MSWI) külünün zemin iyileştirmesinde kullanılabilirliğinin araştırılması hedeflenmektedir. Bu çerçevede belediye atıklardan geriye kalan atık ürünün zemin iyileştirilmesinde kullanılabilirliğinin ortaya konulması hem ekonomik hem de çevresel kayıpların önüne geçmek için önemli olacağı değerlendirilmektedir.

Dünya Bankası'nın küresel incelemesine göre dünya şehirleri yılda yaklaşık 1.3 milyar ton Belediye Katı Atığı (MSW) üretirken, bu miktarın 2025 yılı sonunda 2.2 milyar tona ulaşması beklenmektedir [30,31]. Buna ek olarak dünya bankasının verilerine göre 2030'da dünya katı atık üretimi yılda 2.58 milyar tona, 2050'de bu miktar 3.40 milyar tona çıkması beklenmektedir (Şekil 2.1) [32]. Nüfus artışı, ekonomik ve endüstriyel gelişmeye bağlı olarak Belediye Katı Atık (MSW) üretimi de her geçen gün artmaktadır [33]. Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK) verilerine bakıldığında Türkiye'de belediye atığı dediğimiz evsel atıklar 2001-2018 yılları arasında yapılan

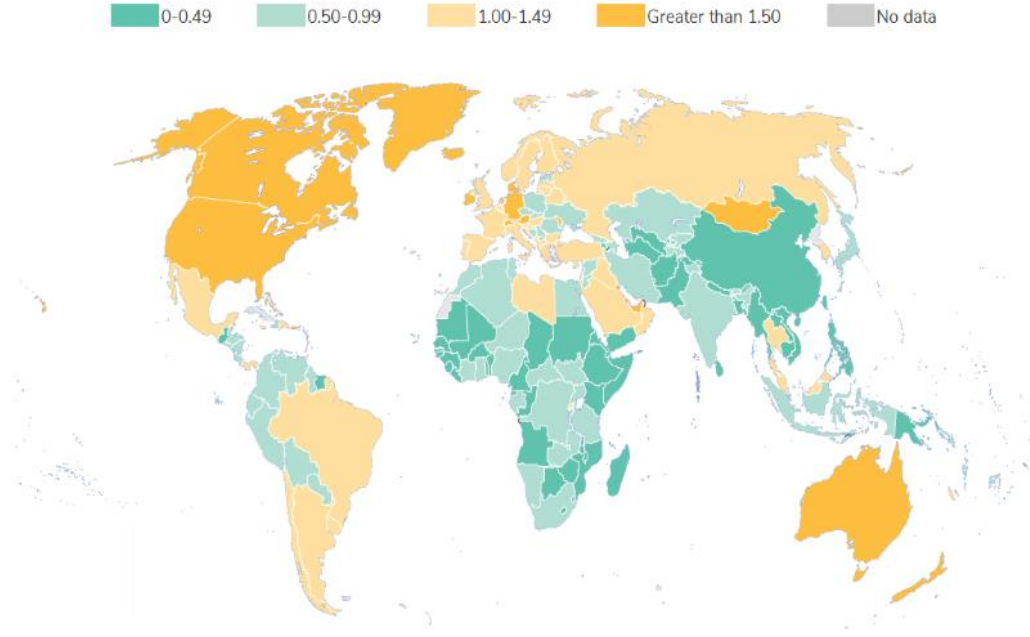
istatistikler sonucu yıllık 24.36-32.2 milyon ton aralığında olduğu ve kişi başı günlük çöp miktarının 1.08-1.38 kg aralığında olduğu tespit edilmiştir [34]. Bu tespitlere ek olarak dünya bankasının yaptığı bir analizde dünya üzerinde ülkelere göre günlük kişi başına düşen evsel atık Türkiye için 1-1.49 kg'dır (Şekil 2.2) [35]. Artan Dünya nüfusuyla paralel endüstriyel ve genel atık oranının gün geçtikçe artacağı ve atıkların özellikle kentsel alanlarda depolanmasının, çevreye zararları ve kullanılabilirliği ile ilgili sorunların da artacağı öngörülmektedir. Artan atık maddelerin depolanması da büyük sorun olup bu atıklar için uygun bertaraf yöntemlerinin yanı sıra yeni kullanım alanlarının belirlenmesi bu açıdan da oldukça önemlidir. Söz konusu atıkların bertarafı teknolojideki gelişmeyle beraber son dönemde geri dönüşüm sonrasında yakılarak yapılmaktadır. Ancak kalan kül çevre ve depolanma yönüyle hala sorun oluşturmaktadır. Bu sorunun önüne geçilmesi, kalan atığın sürdürülebilir bir şekilde bertarafı için yapılacak çalışmalar ve öneriler oldukça önemli olmakta olup bu çalışma ile bu sorunun azaltılması katkıda bulunulması önemsenmiştir.

*Projected waste generation, by region (millions of tonnes/year)*



Şekil 2.1. Dünya bankası kıtaların yıllık çöp üretim verisi

## Annual municipal solid waste generated per capita (kilograms/capita/day)



Şekil 2.2. Dünya bankası günlük kişi başına düşen çöp üretim miktarı

Zemin stabilizasyon çalışmalarında katkı maddesi olarak atık maddeler önemli bir yer tutmaktadır. Zeminlerin katkı maddeleri ile iyileştirilmesi diğer iyileştirme yöntemlerine göre daha ekonomik olmasından dolayı çok geniş bir şekilde kullanılmaktadır. Zemin iyileştirilmesinde genellikle kireç, uçucu kül, çimento, asfalt, kimyasal maddeler gibi katkı malzemelerinin kullanıldığı bilinmektedir. Bunun yanında; kopuk beton, talaş, ağaç kabuğu, çakıl taşı, endüstriyel atıklar, yonga, deniz kabuğu, atık pirinç kabuğu külü, yanmış yağ atığı, volkanik kül, mermer tozu, atık lastik gibi malzemeler de zemin iyileştirilmesinde kullanılmaktadır [23,36–42]. Zemin iyileştirme literatüründe gerek atık maddenin geri dönüşüme kazanılması gerekse de problemlili zeminlerin ekonomik olarak zeminlerin iyileştirilmesi amacıyla atık maddelerin kullanılmasını konu alan çalışmalar önemli yer tutmaktadır. Zemin iyileştirmesinde atık malzemelerin katkı malzemesi olarak olması tercih edilmesinin sebebi depolama masraflarının azalması, depo için ayrılan alanların daha başka sebeple kullanılma isteği ve kimi zaman diğer malzemeler göre daha ucuz olmasıdır.

Son dönemlerde Belediye Atık Fırın Külünün artan miktarı, depolanmasındaki çevresel problemler ve önemli miktarlarda CaO, SiO<sub>2</sub> ve Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> [43,44] içermesi bu ürünün zemin iyileştirmesinde alternatif bir malzeme kullanılabileceğini düşündürmüştür. Bu çalışma ile bu atık malzemenin zemin iyileştirmesinde kullanılabilirliği ve efektif katkı oranları detaylıca irdelenerek literatüre katkı sağlanması hedeflenmiştir.

Evsel katı atıkların yakılması, çöplükte bertaraf edilecek hacmini azaltmak için yaygın bir uygulamadır [45,46]. Çevre kirliliğini azaltmak için, son zamanlarda araştırmacılar belediye çöp atık küllerinin kullanımını hakkında çeşitli çalışmalar yapmışlardır. Bu çalışmalardan elde edilen çıkarımlara göre araştırmacılar, belediye katı atık yakma fırını (MSWI) külünün yol inşaatı, dolgu ve depolama alanlarındaki agrega gibi jeoteknik uygulamalar için kullanılabileceğini elde etmişlerdir [45,47–52]. Bununla birlikte kimi çalışmalarda, Belediye Atık Yakma Külünün çimento ile birlikte zeminlerde stabilizasyon için fiziksel kapsülleme, yer değiştirme, çökeltme veya adsorpsiyon mekanizmaları yoluyla ağır metallerin sızmasını da etkili bir şekilde engelleyerek ideal bir alternatif ürün olabileceği ifade edilmektedir [43,53–55]. MSWI külünün diğer uygulaması da bu ürünün fiziksel özelliklerini iyileştiren kireç, çimento veya beton ile karıştırılarak geoteknik amaçlarla kullanımı şeklindedir [56–59].

Yapı mühendisliğinde proje hazırlanırken gerek statik gerekse de mimari olarak projenin yönetmeliklere uygun hazırlanması gerekmektedir. Statik proje hesaplamaları yapılırken zemin parametreleri önemli yer tutmaktadır. Yapının üzerine oturacağı zeminin yapıdan gelen yükleri taşıyabilmesi gerekmektedir. Ne yazık ki dünya nüfusunun gün geçtikçe artmasıyla birlikte yapı inşası için sağlam zemin alanları azalmakta ve daha yumuşak, taşıma gücü düşük olan alanların kullanılma ihtiyacı artmaktadır. Böyle zeminlerin kullanılması için farklı zemin iyileştirme yöntemleri kullanılmaya başlanmıştır. Taş kolonu, karıştırma yöntemi, jet grout gibi imalat gerektiren zemin stabilitesini artırıcı yöntemlerin kullanıldığı gibi kireç, çimento, polipropilen lif ve cam lifi katkı uygulamaları da yapılmaktadır [6–19,60–73]. Bunun yanında endüstriyelde veya günlük yaşamda atık olarak ortaya çıkan kırık taş, tuğla parçaları, beton parçaları, yüksek fırın cürufu, uçucu kül, kalsiyum karbit atığı, gazbeton, atık PVC, atık lastik, talaş tozu, elektrik ark fırın cürufu, Hindistan cevizi



kabuğu külü, kentsel dönüşüm atıkları, atık pirinç kabuğu külü, kurşun-çinko maden atığı, mermer tozu, Midyat taşı atığı, silis dumanı, kağıt çamuru külü, yer fıstığı kabuğu külü ve fosfojipsler de zemin iyileştirmelerinde kullanılmaktadır [4,7,20–22,25,71,73–129].

Kalsiyum karbit atığı ile gerçekleştirilen bir zemin iyileştirme yönteminde asetilen üretiminde ortaya çıkan kalsiyum karbit atığının zemin iyileştirmede kullanılabilirliği araştırılmıştır. Belli oranlarda karıştırılan bentonit-kum karışımı ham zemin numunesi olarak kullanılmıştır. Ham zemine belirli oranlarda kalsiyum karbit atığı, kireç ve uçucu kül katılarak optimum su muhtevasında numuneler hazırlanmıştır. Hazırlanan zemin numuneleri belirli süre kürlenme sonunda her kür gününde serbest basınç deneyi, şişme basıncı deneyleri, kesme kutusu deneyi, uygulanmıştır. Deneyler sonucunda kalsiyum karbit atığı, kireç, uçucu kül karşılaştırmalı grafikleri hazırlanmış ve kalsiyum karbit atığının numunenin içsel sürtünmesi açısı, serbest basınç dayanımı, şişme basıncı değerini ve kohezyonu, iyileştirdiği saptanmıştır [20].

Yapılan diğer bir çalışmada kil ve silt içerikli zeminlere kalsiyum karbür ilave edilerek, kalsiyum karbürün zemin üzerindeki etkileri incelenmiştir. Amerika Deneme ve Malzeme Topluluğu (ASTM) standartlarında yapılan kompaksiyon deneyi, odyometre deneyi, suya daldırma deneyi sonrasında zemin 7-14-28 günlük küre bırakılarak dikey şişme deneyi ve Kaliforniya taşıma oranı deneyi (CBR) yapılmıştır. Deneyler sonucu kalsiyum karbür atığının zeminin optimum su içeriğinde artış gözlenmiştir. Ayrıca kuru birim hacim ağırlığında ve plastisite indisinde azalış meydana geldiği gözlemlenmiştir [130].

Bu çalışmalar dışında yine kalsiyum karbür atığı kullanılarak yapılan bir çalışmada silt ve kil içerikli zemine kalsiyum karbür ile uçucu kül eklenerek bu atıkların zemin dayanım parametrelerine etkisi araştırılmıştır. Modifiye proktor deneyi yapılarak optimum su içeriği ve maksimum kuru birim hacim ağırlığı belirlenmiştir. Optimum su içeriğinde hazırlanan zemin numunesine belirli oranlarda kalsiyum karbür ile uçucu kül atığı eklenmiş ve 7, 28, 60, 90 günlük kür süresinde bekletildikten sonra UC tipi üç eksenli basınç deneyi uygulanmıştır. Yapılan deneyler sonucu zemin dayanım parametrelerinde artış gözlemiştir [131].

Termik santrallerden elde edilen uçucu küller zemin stabilizasyon araştırmalarında kullanılmıştır [91,94]. Yapılan araştırmada killi ham zemine belirli oranlarda uçucu kül eklenerek üç eksenli basınç deneyi, konsolidasyon deneyi, kıvam limitleri deneyleri, elek analizi, piknometre ve standart proktor deneyleri, yapılmıştır. Deneyler sonucunda konsolidasyon deneyinde %15 uçucu kül-kil karışımı minimum permeabilite ve konsolidasyon katsayısını vermektedir. Buna ek olarak %5 uçucu kül-kil karışımı zeminin sürtünme açısı ve mukavemetin arttığı gözlemlenmiş olup zemin iyileştirme yöntemi olarak kullanılabilir [93].

Uçucu küle yapılan diğer bir çalışmada kaldırımların temel zeminlerinin donma çözülme sonucu mukavemetinin azalmasına etkisi incelenmiştir. Uçucu küle hazırlanan numuneye donma-çözülme dayanıklılık testi, donma-çözülme zayıflatma testi ve serbest basınç dayanım testi uygulanmıştır. Uygulanan bu deneyler sonucu uçucu külün zeminlerde donma-çözülme dayanıklılığının ve donmaya karşı hassasiyetini arttırdığı gözlenmiştir [132].

Uçucu külün kullanıldığı diğer bir çalışmada; uçucu külün ve kireç katkı maddelerinin zemin stabilizasyonuna etkisi incelenmiştir. Çin'in Jianghuai bölgesinden alınan zemin numunesinden iki farklı karışım hazırlanarak bu karışımlara farklı oranlarda uçucu kül ve kireç katılıp plastisite indisi bulunmuştur. Daha sonra bu numunelere serbest basınç deneyi ve Brezilya yarma testi uygulanmıştır. Yapılan deneyler sonucu %5 ile %10 kireç katılı ve %10 uçucu kül katılı zeminlerin plastisite indisinde ve şişme oranında azalma gözlenmiştir [133].

Bu çalışmalara ek olarak uçucu küle katılan çeşitli malzemelerin de uçucu kül ile karıştırıldığında dayanıma katkısının olduğu gözlemlenmiştir. Yapılan çalışmada uçucu kül ana bağlayıcı madde olarak belirlenmiştir. Uçucu kül-kil ham maddesine belirli oranlarda Bayburt taşı tozu ve mermer tozu eklenerek belirli kür sürelerinde serbest basınç deneyi uygulanmıştır. Deneyler sonucunda uçucu kül-kil-mermer tozu karışımının serbest basınç açısından daha kullanılabilir olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca uçucu kül-kil-Bayburt taşı tozunun durabilite açısından uçucu kül-kil-mermer tozu karışımına göre daha etkin olduğu sonucuna varılmıştır [92].

Yapıların yenilenmesi veya deprem gibi doğal afetler sonucu yıkılan yapılarda atık olarak ortaya çıkan gazbetonun zemin iyileştirilmesinde kullanılabilirliği araştırılmıştır [4,87]. Yapılan çalışmada atık olarak ortaya çıkan gazbeton, öğütülerek düşük ile yüksek plastisiteli bentonit ve kum zeminler ile belirli oranlarda karıştırılarak elek analizi, kesme kutusu, serbest basınç, hidrometre, Kaliforniya taşıma oranı, Harvard minyatür kompaksiyon ve şişme basıncı deneyleri gerçekleştirilmiştir. Yapılan deneyler sonucu %25 gazbeton-bentonit karışımının serbest basınç dayanımı ve Kaliforniya taşıma oranının arttığı gözlemlenmiştir. Ayrıca %25 gazbeton-bentonit karışımının şişme basıncı optimum azalttığı gözlemlenmiştir. Çalışma sonucunda öğütülmüş gazbetonun zemin iyileştirmede mukavemet artırıcı ve şişme potansiyelini düşürücü etkiye sahip olduğu sonucuna varılmıştır [87].

Genel inşaat atıklarının zemin stabilitesine etkisinin incelendiği bir diğer çalışmada ise alt yapı ve yol inşaatlarında sıklıkla kullanılan kirecin doğada gün geçtikçe azalmaya başlamasından dolayı kirece alternatif olarak inşaat atıklarının kullanılabilirliği araştırılmıştır. Kaolin kiline %5 oranında kireç katılarak hazırlanan numuneye belirli oranlarda öğütülmüş inşaat atıkları ve uçucu kül katılmıştır. Kompaksiyon deneyi sonucu zeminin optimum su muhtevsındaki maksimum kuru birim hacim ağırlık değeri bulunmuştur. Optimum su seviyesinde hazırlanan numuneler belirli süre kür sonucunda CBR yapılarak taşıma gücü kapasiteleri bulunmuştur. Deneyler sonucu inşaat atıklarının zemin iyileştirmede kullanılabilir bir katkı maddesi olabileceği saptanmıştır [80].

Atık lastiklerin de zemin stabilizasyonunda kullanıldığı görülmüştür [4,21,76]. Bu kapsamda gerçekleştirilen bir çalışmada, atık lastiklerin geri dönüştürülmesi sonucu ortaya çıkan karbon karasının (KK) yüksek plastisiteli kilin geçirimsizlik katsayısına etkisi araştırılmıştır. Kil zemine belirli oranlarda katılan KK üzerinde deneyler yapılmıştır. Standart ve modifiye kompaksiyon deneyleri sonucu optimum su muhtevası ve maksimum kuru birim hacim ağırlık değerleri, düşen seviyeli permeabilite deneyi sonucu geçirimsizlik katsayısı belirlenmiştir. Deneyler sonucu %1 KK-kil karışımının en düşük geçirimsizlik katsayısını verdiği belirlenmiştir [76].

Silisyum ve ferrosilisyum alaşımlarının elektrometalurji sanayisinde üretiminde yan ürün olarak üretilen silis dumanı zeminlerin mekanik olarak iyileştirilmesi için araştırılmıştır. Dispersif ve şişme özelliğine sahip kil zeminin belirli oranlarda sönmüş kireç ve silis dumanı katkısıyla hazırlanan numunelere elek analizi, kıvam limitleri, kompaksiyon, özgül gravite, şişme basıncı, şişme yüzdesi, dağılma ve iğne deliği deneyleri yapılmıştır. Deneyler sonucu %3 kireç ve %10 silis dumanı oranlı zemin numunelerinin mühendislik özelliklerinde iyileşme sağladığı gözlemlenmiştir [89].

Demir çelik üretiminde atık olarak ortaya çıkan yüksek fırın cürufunun zemin stabilizesinde kullanılması araştırılmıştır [74,95]. Bentonite belirli oranlarda katılan yüksek fırın cürufunun 1, 7, 14 ve 28 günlük kür süreleri sonucu likit limit ve plastik limit deneyleri, kesme kutusu deneyi, serbest basınç deneyi ve şişme deneyleri yapılmıştır. Deney sonuçlarına göre likit limit değerinin düştüğü; içsel sürtünme açısı, kohezyon ve serbest basınç dayanımlarının arttığı gözlemlenmiştir [74].

Biyokütle enerji santrallerinden elde edilen atık pirinç kabuğu külü zemin iyileştirmek için incelenmiştir [99,106,109,111,113,114,117,124,126,127,129]. Endonezya'da da diğer ülkelerde olduğu gibi şişen toprak sorunu yaşanmaktadır. Bu tür zeminlerin mukavemetini arttırmak için atık yanmış pirinç kabuğu külü incelenmiştir. Yanmış pirinç kabuğundan kaynaklanan silika atıklarının puzolanik bir malzeme olarak potansiyel bir kullanımı vardır. Çalışmasında Yogyakarta'da (Endonezya) yakılan pirinç kabuğundan elde edilen küllerin kullanımı üzerine yapılan çalışmanın sonuçlarını sunmaktadır. Laboratuvarında zemin numunesinin kuru ağırlığına göre belirli oranlarda pirinç kabuğu külü (RHA) ve kireç içeriği ile hazırlanan zemin deneylere tabii tutulmuştur. Araştırmada kireç - pirinç kabuğu külünün şişen toprağın şişmesini azalttığını; mukavemetini ve taşıma kapasitesini ise arttırdığı gözlemlenmiştir [127].

Yapılan diğer bir çalışmada atık olarak açığa çıkan mermer tozu zemin stabilite araştırmalarında kullanılmıştır. Bu çalışma için Nijerya'nın Igarra, Ore ve Auchu bölgelerinden elde edilen üç farklı kırmızı tropik toprak kullanılmıştır. Alınan zeminlere elek analizi, özgül ağırlık deneyi, Atterberg limit deneyleri yapıldıktan sonra kompaksiyon deneyi sonucu optimum su muhtevası ve maksimum kuru birim

hacim ağırlık değerleri bulunmuştur. Optimum su muhtevasında hazırlanan numuneler 5, 15 ve 28 günlük kür sonucunda serbest basınç deyin ve CBR testine tabi tutulmuştur. Deneyler sonucunda atık olarak açığa çıkan mermer tozunun zemin stabilite değerlerinde iyileşme olduğu gözlemlenmiştir [134].

Atık mermer tozu kullanılarak yapılan diğer bir çalışmada Meşelik kili-kum karışımına belirli oranda mermer tozu katılarak, atık katkı maddesinin zemin şişme dayanımına etkisi incelenmiştir. Hazırlanan kil-kum ham numunesine %0, %1, %3, %5, ve %7 oranında atık mermer tozu katılarak standart proktor deneyi uygulanmıştır. Deney sonucu hazırlanan numuneler odometre deneyi uygulanmış ve suya boğulmuştur. Belirli zamanlarda şişme değerleri ölçülmüş ve mermer tozunun zeminlerin şişme potansiyelini olumlu yönde etkilediği gözlemlenmiştir [135].

Mermer tozu zeminlerin donma-çözünme etkisinin araştırıldığı bir çalışmada belirli oranlarda hazırlanmış bentonit-kaolin karışımına %5, %10 ve %15 oranlarında mermer tozu ilave edilerek hazırlanan zemin numunelerine kompaksiyon ve su içeriği ve kuru birim hacim ağırlıkları bulunmuştur. Daha sonra bu zemin numunelerine donma-çözünme deneyi yapılmış ve sonuç olarak %10 ile %15 mermer tozu ilavesi mukavemeti arttırdığı gözlemlenmiştir [136].

Zeminlerin stabilizelerinin arttırılmasına yönelik yürütülen araştırmalarda kullanılan diğer bir atık madde Midyat taşıdır. Taş ocaklarından çıkan Midyat taşının belirli oranlarda Bayburt ilinin Merkez ilçesinde alınan doğal zemine karıştırılmasıyla oluşturulan deney numunelerine elek analizi, kıvam limit deneyleri ve kompaksiyon deneyi uygulanmıştır. Kompaksiyon deneyi sonucu optimum su muhtevası ve kuru birim hacim ağırlığı bulunmuştur. Optimum su muhtevasında hazırlanan zemin numunesi 7 ve 28 günlük kür sonrası serbest basınç deneyine tabii tutulmuştur. Ayrıca 28 günlük kür sonucu ıslanma-kuruma periyodu deneyi ve donma-çözülme çevrimi deneyi uygulanmıştır. Daha sonra doğal zemine %6 kireç eklenerek ham numune hazırlanmış ve doğal zemin-kireç ham zeminine aynı miktarlarda Midyat taşı eklenmiştir. Aynı deneyler doğal zemin-kireç-Midyat taşı karışımına uygulanmıştır. Deneyler sonucu Midyat taşının doğal zemine uygulanmasının dayanıma etkisinin

olmadığı ve kireç ile karıştırılan Midyat taşının zemin dayanım parametrelerinde olumlu sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir [86].

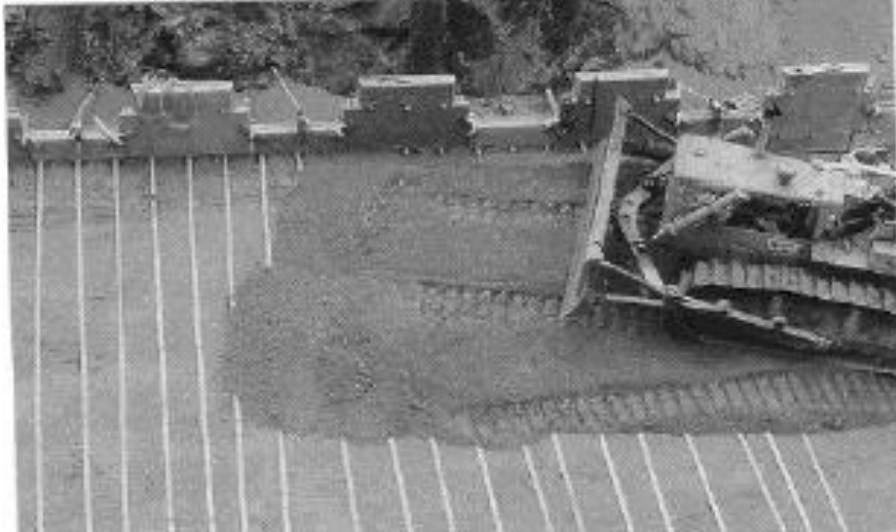
Araştırmalar gösteriyor ki doğada çeşitli yollarla açığa çıkan atıklar zemin iyileştirmesinde kullanılabilir bir yöntemdir. Ancak yaygın bir şekilde problemlili zeminlerin iyileştirilmesinde kullanılan katkı maddelerinin genel olarak çimento, kireç ve uçucu kül ile sınırlı kaldığı ve diğer atık malzemelerin katkı maddesi olarak kullanımına ve kullanım yöntemlerine ilişkin çalışmaların sayısının göreceli olarak çok sınırlı olduğu söylenebilir. Yapılan bu tez çalışması ile zemin stabilizasyonunda belediye çöp atıklarından elde edilen küllerin kullanımının olası etkisinin belirlenmesinin yanı sıra karışım miktar ve yöntemi de detaylıca incelenmiştir. Ekonomik olarak daha maliyetli yöntemler kullanmak yerine atık malzemelerle zemin stabilizasyonunu sağlamak hem ekonomik kayıpların hem de çevresel problemlerin azaltılması açısından oldukça önemlidir. Zira söz konusu atık malzemenin miktarı artık oldukça fazla artış göstermekte olup depolanma alanlarının kullanımı açısından sıkıntılar oluşturmaktadır [137–139]. Bu bakış açısından yola çıkılarak bu çalışmada zemin iyileştirmesinde alternatif bir ürün olarak Malatya Büyükşehir Belediyesi ve MİMSAN GRUP ortaklığında kurulan atık geri dönüşüm tesisinden elde edilen Belediye Atık Fırın külünün zemin iyileştirme performansı araştırılmıştır.



### 3.1. ZEMİNLERİN YERİNDE İYİLEŞTİRİLMESİ İLE İLGİLİ YÖNTEMLER

#### 3.1.1. Donatılı Zemin-Çelik Kullanımı veya Geosentetik Yöntemler (Fiber Güçlendirme)

Bu yöntemin amacı, zeminin kritik yönlerdeki mukavemetini arttırmak amacı ile içerisine zeminle arasında yeterli sürtünmeye sahip geotekstillere veya metal şeritler yerleştirilerek iyileştirmektir [142]. Geotekstil (geosentetik), sentetik hammaddeden üretilen geçirimsiz membran, geçirimli dokuma tipi tekstil ürünleri, ağ, tabaka, şerit hücre, ızgara gibi ürünlere verilen bir isimdir. Geotekstillere polimerler, PVC, poliolefin, poliamid ve poliester gibi maddelerden oluşmaktadır [143]. Zemin stabilitesi arttırmak için geosentetik uygulaması Şekil 3.2’de gösterilmiştir.



Şekil 3.4. Geosentetik uygulaması [142]

Güçlendirici maddeler genellikle metal veya alüminyum şeritler, polimerik jeosentetik, fiber-camla güçlendirilmiş plastik, çelik hasırlar ve kablolar olabilmektedir. Malzeme seçilirken dikkat edilecek en önemli husus paslanmaya ve işlenebilirliği olumsuz yönde etkileyecek faktörlere karşı dirençli olmasıdır. Fiber güçlendirme genellikle yol alt tabakası güçlendirmede, istinat duvarı uygulamalarında, köprü destek ve ayaklarının yapımında, şev iyileştirmelerinde ve temel döşemeleri gibi



uygulamalarda kullanılmaktadır [144]. Donatı tipi ve geometrisi Şekil 3.3'de gösterilmiştir.

Donatı Geometrisi	Metal		Metal Olmayan						Sıyırılma Direnci	
	Çelik	Alüm.	Beton	Tahta	Cam	Kauçuk	Polimer Plastik	Bambu	Yüzey Sırtınması	Pasif Direnc
Şeritler	●	●	●	●	●	●	●	●	Evet	Hayır
Sopa ve Ankrajlar	●						●	●	Hayır	Evet
Levha ve tekstiller	●	●					●		Evet	Hayır
Zincir	●		●					●	Hayır	Evet
Halat	●	●							Hayır	Evet
Gridler	●			●		●	●		Evet	Evet
Fiberler	●				●		●	●	Evet	Evet

Şekil 3.5. Donatı tipi ve geometrisi [142]

### 3.1.2. Hafif Malzemelerin Kullanımı

İnşa edilecek yapı yükünü taşıyamayan, yapılacak yapı için uygun olmayan, yüksek oturma beklenen mevcut yumuşak kil zeminin sıyrılarak kum veya çakıl gibi daha dayanıklı bir malzemeyle yer değiştirmesi yöntemidir. Temel altı problemlı zeminler bu yöntem ile iyileştirilebilir. Bu yöntem özellikle dayanma yapısına aktarılan zemin basıncının azaltılması için mevcut zeminin hafif ve dayanıklı madde ile değiştirilmesi ile sağlanmaktadır. En eski yöntemlerden biri olan zemin değiştirme yöntemi, hızlı uygulanabilen ve kontrol gerekliliği düşük olan yöntemlerden biridir. Ancak değiştirilecek zemin miktarı açısından ekonomik anlamda pahalı bir yöntem olabilmektedir [145].

### **3.1.3. Fiziko- Kimyasal Yöntemler (Katkı Malzemeleri, Enjeksiyon Yöntemleri)**

#### **3.1.3.1 Kompaksiyon Enjeksiyonu**

Zayıf zeminlerin mukavemetini düşüren en önemli etken zemin içerisinde bulunan boşluktur. Bu yöntem zemin içerisinde bulunan hava boşluklarının sağlam bir maddeyle (beton vb.) doldurulmasıdır. Bu yöntemde enjekte edilecek madde basınçlı bir şekilde zemine uygulanır. Enjekte maddesi basınç sayesinde zemin içerisinde bulunan boşlukları doldurarak mevcut zeminden daha dayanıklı bir zemin elde edilmesini sağlar. Bu yöntemin başlıca faydalarını şu şekilde sıralayabiliriz.

- Şev stabilizasyonu
- Sıvılaşmaya karşı dayanım
- Şişen zeminlerin dayanımı
- Oturmaları önleme amacıyla boşlukların doldurulması
- Yeraltı su akımını önleme
- İksa problemini rahatlatmak için zeminin güçlendirilmesi
- Temeli alttan desteklenmesi vb. [143]

#### **3.1.3.2 Jet Grouting**

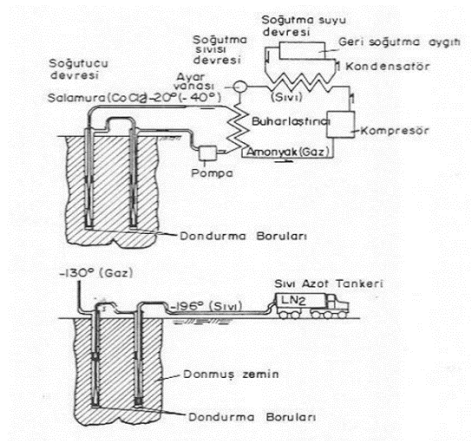
Jet grouting, mevcut zeminin stabilizasyonunu arttırmak ve inşa edilecek yapıdan gelen yükleri daha derindeki zemin tabakasına aktarabilmek için uygulanmaktadır. Bu teknik çok farklı zeminlerde ve geniş uygulama alanına sahip olması nedeniyle büyük bir tasarım serbestliğine sahiptir. Bu yöntemde mevcut zemine çok yüksek basınçla enjekte edilen madde (genellikle su-çimento karışımı) zeminle karıştırılarak doğal zeminin yapısını bozmakta ve daha dayanıklı bir zemin elde edilmektedir. Bu yöntemin diğer enjeksiyon yöntemlerinden en büyük avantajı, jet grouting yönteminde kullanılacak stabilize malzeme miktarı, geçirgenlik ve mukavemet değeri gibi zemin değişkenleri ile maliyetin yöntem uygulanmadan tahmin edilebilmesidir [146].

### 3.1.3.3. Patlatma Metodu

Gevşek, suya doygun ve kohezyonsuz zeminlerin mukavemetini arttırmak amacıyla sıkıştırma yöntemlerinden birisi patlayıcı maddelerin patlatılması sonucu kayma ve uzunlamasına dalgaların oluşturulmasıdır. Bağlayıcı ve yapışkanlık özelliği az olan mevcut zeminin patlatma sonucu daha küçük parçalara ayrılarak sıkışmaya uygun hale gelmesi hedeflenmektedir. Patlatmanın etkisiyle zemin ani darbe ve titreşime maruz kalmakta, tane boyu küçülen zeminin boşluk oranı azalmakta ve sıkışmaya daha uygun hale gelmektedir [147].

### 3.1.3.4. Dondurma Metodu

Bu yöntemde zemin içerisinde bulunan boşluk suyunun dondurularak zemin dayanımının artırılması hedeflenmektedir. Bu yöntem tuzlu su veya nitrojen ( $LN_2$ ) olmak üzere iki farklı enjekte yöntemi ile uygulanabilmektedir. Kapalı devre borular içerisinde enjekte edilen tuzlu su  $-20$  ile  $-40$  °C arasında sıcaklıkta zemin içerisinde gezdirilerek zemin içinde bulunan yeraltı suyunun donması beklenmektedir. Donan su sayesinde zemin sertleşmekte ve dayanımı artmaktadır. Diğer yöntemde ise sıvı halde bulunan nitrojen ile  $-196$  °C soğukluk elde edilmektedir. Nitrojen, bir ucu açık kapalı devrede gezdirilerek zemin içinde bulunan yeraltı suyunun donması sonucu dayanımın artması beklenmektedir. Zemine enjekte edilen sıvı nitrojen açık uçtan gaz halinde drene edilmektedir. Tuzlu su ve nitrojen ile dondurma yöntemi Şekil 3.4’de verilmiştir [148].



Şekil 3.6. Tuzlu su ve nitrojen ile dondurma yöntemi [148]

### **3.1.3.5. Isıtma Metodu**

Zemin iyileştirme yöntemlerinden birisi de zeminin ısıtılarak mukavemet özelliklerinin iyileştirilmesi metodudur. Camlaştırma yöntemi olarak da adlandırılan bu yöntem, zemin bileşenlerini kristallendirerek zemini stabilite özelliğini artırma prensibine dayanmaktadır. Özellikle silt ve kil tipi zeminler elektrik yardımıyla 300-1000 °C arasında sıcaklıkla ısıtılarak bu sıcaklığın zeminin içerisinde bulunan suyun buharlaşması sonucu mukavemeti artmaktadır. Bu yöntem ekonomiklik açısından pratik bir yöntem değildir. Ancak bu yöntemle iyileştirme yapılan zeminlerde taşıma gücü, şişme özelliği, mukavemeti, plastisite indisi gibi özelliklerinde iyileşme olduğu gözlemlenmiştir [149].

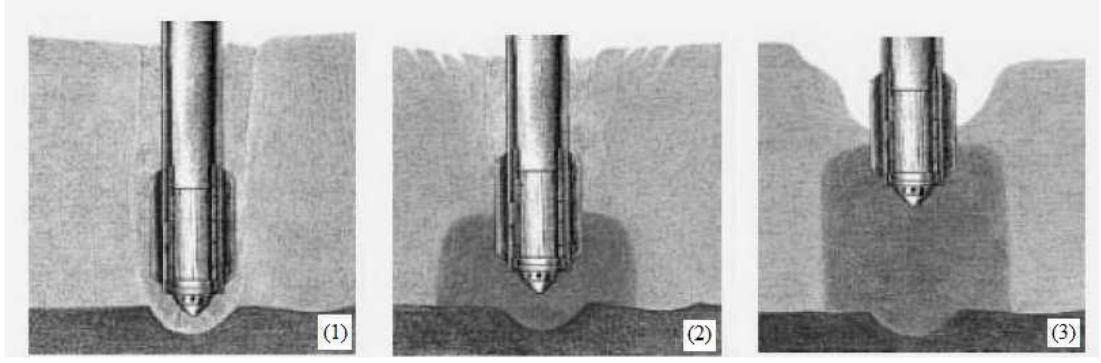
### **3.1.4. Hidrolik Yöntemler**

#### **3.1.4.1. Taş Kolonlar**

Taş kolon zemin özellikleri inşa edilecek yapıyı karşılayamayacak olan gevşek ve yumuşak zeminlerin mekanik olarak iyileştirmesini amaçlayan bir yöntemdir. Taş kolonun yapım tekniğinde dolgu malzemesi olarak taş, tuğla atıkları, briket, kum ya da çakıl kullanılabilir, ancak bütün dolgu malzemeleri için “taş” ismi kullanılmaktadır [150]. Dört farklı yöntemle taş kolon imal edilebilmektedir:

#### **Vibro Kompaksiyon Yöntemi**

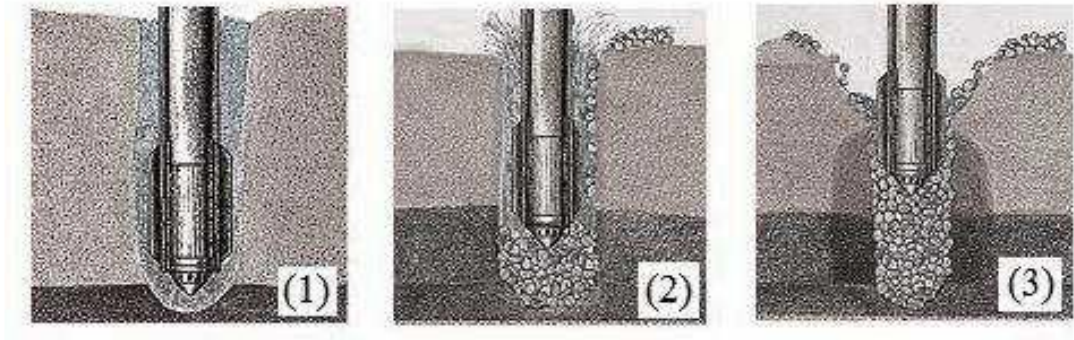
Vibro kompaksiyon yönteminde vibratör su veya hava yardımıyla istenilen derinliğe gelindiğinde 0.5 m aralıklarla tekrar geri çekilir. Geri çekilme sırasında kılıf içinde bulunan taş kolon malzemesi tokmak yardımıyla zeminde açılan deliğe sıkıştırılır [150]. Vibro kompaksiyon yöntemi aşamaları Şekil 3.5’de gösterilmiştir.



Şekil 3.7. Vibro kompaksiyon yöntemi aşamaları [151]

### Vibro Yer Değiştirme Yöntemi

Vibro yer değiştirme yöntemi veya diğer adıyla ıslak yöntem; yüksek basınçlı su jeti ve titreşim yardımıyla istenilen derinliğe kadar bir kuyu açılır. Daha sonra basınçlı su yardımıyla taş aktarımı için prob etrafındaki bölge yıkanır. Yıkama sonrasında taş kolon malzemesi yüzeyden eklenerek zemine doğru doldurulur. İmalat bittikten sonra silindir ile yüzey düzeltilir [151]. Vibro yer değiştirme yöntemi aşamaları Şekil 3.6'da gösterilmiştir.



Şekil 3.8. Vibro yer değiştirme yöntemi aşamaları [151]

### Vibro Öteleme Yöntemi

Vibro öteleme yöntemi ya da diğer adıyla kuru yöntem, vibro değiştirme yöntemi gibi probun ilerlemesi için hava basıncı ve titreşim kullanılır. Buna ek olarak geri dolgunun

vibratörün ucundan yapılması için besleme tüpü ve doldurma hunisi bulunmaktadır. Bu yöntemin en önemli avantajlarının içinde inşa sürecinde kullanılacak taş dolgu hacminin hesaplanabilir olması, taş dolgu miktarının az olması ve su jeti kullanılmaması nedeniyle atık miktarının az olmasıdır [152]. Vibro öteleme yöntemi aşamaları Şekil 3.7’de gösterilmiştir.



Şekil 3.9. Vibro öteleme yöntemi aşamaları [152]

### 3.1.4.2. Ön Yükleme

Ön yükleme; yumuşak zeminlerin stabilitesini arttırmak amacıyla zemine uygulanan yöntemlerin en yaygınıdır. Bu metotta temel amaç yapıdan gelen yüklerin sonucu oluşacak oturmaları yapı inşa edilmeden önce geçici olarak inşa sahasına serilen kum ve çakıl dolgusunun ağırlığı altında konsolide edip, yapı inşa edildikten sonra bu sorunla karşılaşılmasını sağlamaktır. Zemin konsolide olduktan sonra kum ve çakıl dolgusu kaldırılıp yapı inşa edilmektedir. Zeminin dolgu altında sıkışması uzun zaman alabilmektedir. Bu süreyi azaltmak için düşey drenler yerleştirmek başarılı sonuçlar vermektedir [153].

### 3.1.4.3. Yeraltı Su Seviyesinin Düşürülmesi

Zeminde yeraltı suyu varlığı zeminin mühendislik özelliklerinde olumsuz etkiye sahiptir. Bu nedenle stabilitesi düşük olan yumuşak ve gevşek zeminlerde yeraltı suyu

varlığı varsa bu suyun drene edilmesi ve sahaya su girişinin önlenmesi zeminin dayanım özelliklerini arttıracaktır [154].Yeraltı suyu drene yöntemleri aşağıdaki gibidir:

### **Fransız Drenleri**

Bu yöntemde yeraltına yerleştirilen künkler yardımıyla zemin içerisinde bulunan yeraltı suyu drene edilmesi amaçlanmıştır. Künklerin yerleştirileceği hendeklerin tabanı künk çapından 30 cm daha geniş açılır. Açılan hendeğe künk yerleştirildikten sonra kaba taneli malzeme künke doğru, ince taneli malzeme ise zemine doğru olacak şekilde derecelendirilmiş malzeme ile doldurulur. Bu derecelendirmenin amacı yapay bir filtre oluşturup zemin suyunda bulunan katı maddelerin künk içine girip drenlerin ince malzemeyle dolmasını engellemektir. Bu yöntemle zemin içerisinde bulunan su drene olmakta ve zemin dayanımı artmaktadır [155].

### **Çevre Drenleri**

Bu yöntemde drenaj kanalları kurutulmak istenen sahanın etrafını çevreler. Drenaj kanalları genellikle tesviye eğrileri üzerinde veya su seviyesinin en yüksek olduğu noktalar izlenerek yerleştirilir. Bu kanallar suyun kurutulması gereken alandan uzak tutarak alanda yapılacak drenaj maliyetini azaltır. Böylece kademeli bir drenaj sistemi oluşturulmuş olur. Bu yöntem aynı zamanda su seviyesi yüksek alanlarda su seviyesini düşürülmesini de sağlamaktadır [155].

### **Köstebek Drenler (Mol Drenajı)**

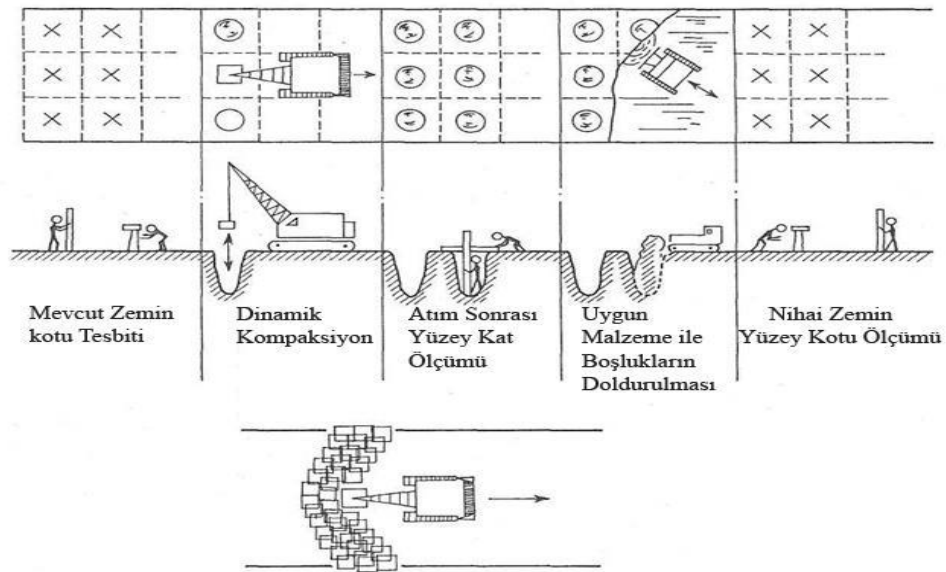
Killerde suyun çoğunluğu kil partiküllerine tutunması nedeniyle hareket edemezler. Bu nedenle killi zeminler genellikle drenaja uygun değildir. Bu yöntem kil zeminlerin drene edilmesi için kullanılmaktadır. Bir kol ucuna monte edilmiş köstebek mermisi zeminin bir miktar altına traktör sapanı vb. yardımıyla hareket ettirilerek zemin içinde bir kanal oluşturulur. Bu kanallar yüke maruz kalmadığı sürece uzun yıllar şeklini korur ve zemin içinde bulunan suyu drene ederler. Bu kanallar zemin eğimine paralel şekilde açılmalı ve ana kanala bağlanmalıdır [155].

## Kuyu Drenler

Bu yöntemde zemin içerisinde bulunan yeraltı suyunun seviyesini düşürerek zeminin dayanımını arttırmak amaçlanmaktadır. Su seviyesi düşürülecek alana açılacak düşey sondaj kuyusuna dolan yeraltı suyunu pompa yardımıyla drene edilmesi prensibine dayanmaktadır. Kurutulacak alanın büyüklüğüne göre birkaç tane sondaj kuyusu açılabilir [155].

### 3.1.5. Dinamik Kompaksiyon

Dinamik kompaksiyon yöntemi, zeminlerin sağlamlaşmasını ve sıkışmasını sağlayarak taşıma gücünün artırılması ile sıvılaşma potansiyelinin azaltılmasını amaçlayan bir yöntemdir [156]. Bu yöntem kontrollü olarak belirli yükseklikte zemine düşürülen ağırlığın altında zeminin sıkışması prensibine dayanmaktadır [157]. Bu tür kompaksiyonlarda amaç zemine enerji aktararak iyileştirme olsa da asıl amaç doymun zeminleri yerinden kaldırmadan ağırlık yardımıyla sıvılaşmaya zorlamakta ve bu şekilde zeminde iyileşme sağlanmaktadır [158]. Şekil 3.8’de dinamik kompaksiyon uygulama aşamaları gösterilmiştir.



Şekil 3.10. Dinamik kompaksiyon uygulama aşamaları [159]



## **3.2. TOPRAK DOLGULARDA KULLANILACAK ZEMİNLERİN MALZEME ÖZELLİKLERİNİN İYİLEŞTİRİLMESİ**

### **3.2.1. Katkı Malzemeleri Kullanılması ile Zemin Özelliklerinin İyileştirilmesi**

Mekanik stabilizasyon çeşitlerinden biri olan katkı maddeleri ile zemin iyileştirme yöntemi kireç, çimento, uçucu kül ve bitüm gibi organik veya inorganik maddelerin mevcut zemine katılması sonucu ile yapılmaktadır. Bu metot zemin taneleri arasındaki bağları oluşturarak ve kuvvetlendirerek mevcut zeminin mekanik özelliklerini iyileştirme prensibine dayanmaktadır [160].

#### **3.2.1.1. Kireç ile Zemin Stabilizasyonu**

İnce taneli zeminlere (özellikle kil zeminler) kireç karıştırılması zeminin plastisitesinin azalmasına ve kil mineralleri ile kireç arasında oluşan reaksiyonlar sonucu zeminin mukavemetinin arttığı gözlemlenmiştir [6,7,20,68–71,89,161]. Kimyasal reaksiyonlar olması nedeniyle bu süreç uzun sürmekte ve bunun sonucunda zeminin mukavemeti de uzun bir süreçte iyileşmektedir. Kireç katkılı zeminlerin stabilizasyon yöntemi özellikle havayolları ve karayolları alt yapısında kullanılmaktadır. Köprü ve istinat duvarları arka dolguları, temel altı zemin iyileştirmesi, kayan şevler ve toprak dolgular için bu metot yaygın olarak kullanılmaktadır. Kireç stabilizasyonu zeminin mukavemetini ve elastisite modülünü arttırmakta, şişme basıncını azaltmaktadır. Ayrıca plastisitenin azalmasına neden olduğu için arazi çalışma şartlarının iyileşmesini sağlamaktadır [161].

#### **3.2.1.2. Çimento ile Zemin Stabilizasyonu**

Kum ve kil gibi mühendislik özellikleri düşük zeminlerin stabilizasyonunda çimento kullanımı yaygın bir yöntemdir [8–10,73,162]. Bu metot gevşek ve şişebilen tüm zeminlerde uygulanabilmektedir. Çimento katkılı zeminlerde mevcut zemine oranla likit limit azalır, plastik limit ve işlenebilirlik artmaktadır. Kil zeminlerde plastisite indisi %25'ten ve likit limit %45-50'den az ise bu yöntem maksimum verimdedir.

Çimento ile stabilizasyon kireçte olduğu gibi reaksiyon sonucu oluşmaktadır ve bu artış bir süre sonucu oluşmaktadır [162].

### **3.2.1.3. Uçucu Kül ile Zemin Stabilizasyonu**

Uçucu küller termik santrallerde; demir, çelik gibi metaller üreten fabrikalardan yan ürün olarak açığa çıkan bir maddedir [20,73,83,84,90–94,160,161,163]. Uçucu küller alüminyum ve silis yönünden zengin bir yapıya sahiptir. İçerdiği silikat, alüminat ve kalsiyum oksit nedeniyle zemine katıldığında, bu mineraller sayesinde hidrasyon sonucu zeminle kuvvetli bağlar kurmakta ve zemin tanelerini birbirine bağlamaktadır [164].

### **3.2.1.4. Bitüm ile Zemin Stabilizasyonu**

Yol yapımında bitüm uygulanan temel malzemesi iri taneli ise kohezyon, ince taneli ise geçirimsizlik artmaktadır [149,153]. Bitümlü emisyonlar genellikle kuru iklimlerde kullanılması uygundur. Zeminler su-bitüm karışımıyla karıştırılır. Bu sayede mevcut zeminin mühendislik özelliklerinde iyileşme sağlanır. Ancak bu yöntem ekonomik olarak pahalı bir yöntem olduğundan uygulamada yaygın değildir [153].

### **3.2.1.5. Diğer Katkı Maddeleri ile Zemin Stabilizasyonu**

Endüstriyel alanda veya günlük yaşamda atık olarak ortaya çıkan kırık taş, tuğla parçaları, beton parçaları, kalsiyum karbit atığı, gazbeton, atık PVC, atık lastik, talaş tozu, elektrik ark fırın cürufu, Hindistan cevizi kabuğu külü, kentsel dönüşüm atıkları, atık pirinç kabuğu külü, kurşun-çinko maden atığı, mermer tozu, Midyat taşı atığı, silis dumani, kağıt çamuru külü, yer fıstığı kabuğu külü ve fosfojipsler gibi organik ve inorganik maddeler zemin iyileştirmelerinde kullanılmaktadır. Yapılan çalışmalarda bu tür atık maddelerin zemin stabilizasyonunu pozitif yönde etkilediği gözlemlenmiştir [5,8,21–23,35,37–94].

Yukarıda bahsedilen alt başlıklar incelendiğinde Çizelge 3.1’de verilen zemin iyileştirme yöntemleri değerlendirme tablosu ortaya çıkmaktadır.

Çizelge 3.1. Zemin iyileştirme yöntemleri değerlendirme tablosu [145]

Yöntem	Zemin		Amaç				İstinat Yapılan	Kullanım Sıklığı	Uygulama Süresi	Maliyet	Kontrol Gerekliği	Sürdürülebilirlik
	Kohezif	Kohezyonsuz	Taşma Kapasitesi	Oturma	Sıvılaşma	Geçirimsizlik						
Dinamik Kompaksiyon	-	***	***	**	***	-	-	**	**	*	***	*
Vibro Kompaksiyon	-	***	***	**	***	-	-	**	*	**	***	*
Patlatma	**	***	**	**	**	-	-	*	*	*	***	*
Yüzey Kompaksiyonu	**	**	***	**	-	**	-	***	***	**	***	*
Hafif Madde ile Yer Değiştirme	***	-	**	**	-	-	-	**	**	*	*	*
Yapay Drenler ile Önyükleme	***	-	**	**	-	-	-	*	***	**	**	**
Vakum ile Önyükleme	***	-	***	**	-	-	-	*	**	**	**	**
Taş Kolonlar	**	***	***	**	**	-	-	***	*	*	*	*
Kum Kompaksiyon Kazıkları	***	***	***	*	***	-	-	*	**	**	**	-
Geotekstil ile Güçlendirilmiş Kolonlar	***	-	***	*	-	-	-	*	**	**	**	-
Katkı Maddeleri ile Karıştırma	***	***	***	**	**	**	-	*	*	**	**	*
Jet Harç Enjeksiyonu	**	***	***	**	***	**	-	***	*	*	**	*
Geosentetikler ile Mekaniksel İyileştirme	**	***	**	*	-	-	**	**	***	**	*	-
Zemin Ankora ve Çivileri	**	**	*	*	-	-	**	***	***	**	**	-
*** Çok Uygun                      ** Orta Uygun                      * Az Uygun                      - Uygun Değil												

## BÖLÜM 4

### MATERYAL VE METOT

Yapı ve geoteknik mühendisliğinde sorunlu zeminler her zaman araştırma konusu olmuştur. Özellikle kil içerikli zeminler gerek oturma sorunu gerekse de şişme sorunuyla karşımıza çıkmaktadır. Bu tür zeminlerin mekanik ve fiziksel iyileştirilmesinde atık maddeler alternatif bir iyileştirici olarak kullanılmaktadır. Bu tez çalışmasında elektrik üretimi amacıyla kurulan evsel atık geri dönüşüm uçucu külünün zemin stabilizasyonuna etkisi incelenmiştir. Bu kapsamda deneylerde Malatya Büyükşehir Belediyesi ve MİMSAN Grup ortaklığında kurulan geri dönüşüm tesisinde yan ürün olarak açığa çıkan BAYF külü kullanılmıştır.

Bu amaç doğrultusunda 10 nolu elekten elenen bentonit ve dere kumu karışım ağırlığına oranı 1 (%50 bentonit-%50 dere kumu) olacak şekilde ham (referans) numune hazırlanmış ve optimum su içeriği bulunmuştur. Bu karışıma ağırlığının %2.5, %5, %10, %15 ve %20 oranında evsel atık geri dönüşüm uçucu külü karıştırılarak kompaksiyon deneyi sonucu karışımların optimum su muhtevası bulunmuştur. Ham numuneyi küre bekletmeden serbest basınç deneyi, üç eksenli basınç deneyi ve şişme deneyine tabii tutulmuştur. BAYF külü katkılı olarak hazırlanan numuneler 1, 7, 14, 21 ve 28 günlük kür sonucu aynı deneyler yapılmış ve deney sonuçları ham numune deney verileriyle karşılaştırılmıştır. Bu deneylere ek olarak ham numuneyi küre tabii tutmadan; BAYF külü katkılı numunelere ise 7 ve 28 günlük kür sonucu X ışını kırınımı analizi (XRD) yapılmıştır. Deney verileri karşılaştırmalı analize tutulmuş ve sonuç, bulgular ve sonuç yorumu ilerideki bölümlerde tartışılmıştır. Araştırma süresince yapılan deneyler Karabük Üniversitesi Zemin Mekaniği Laboratuvarı, XRD analizi Demir Çelik Enstitüsü Malzeme Araştırma ve Geliştirme Merkezi (MARGEM) Laboratuvarında yapılmıştır.

## 4.1. MATERYAL

### 4.1.1. Bentonit

Bentonit, volkanik killerin normal ortamlarda bekleyip kimyasal reaksiyonlar sonucu veya primer kayaların su yardımıyla ayrışması sonucu oluşmaktadır [136]. Simekit (montmorillonit) grubu kil mineralinin oluşturduğu bentonit, ilk kez 1888 yılında ABD'nin Wyoming eyaletinde Fort Benton yakınlarında bulunmuş ve bu isimle isimlendirilmiştir [165]. Bentonit bir kil türüdür ve ele alındığında yumuşaklık ile yağlılık hissi vermektedir. Özgül yüzeyinin çok büyük olması ve küçük kristal yapısı sebebiyle yüksek su alma ve şişme özelliğine sahiptir [20]. En az 5 kat şişebilen bentonitler 25-30 kata kadar şişebilmektedir. Ham bentonit kaolin kıvamında iken yumuşak ve kırılıgandır. Yüksek sıcaklıkta (600 C°'den fazla) şişme özelliğini kaybetmekte olup kuru yoğunluğu 2.7-2.8 gr/cm<sup>3</sup>, toz halinde 1.6-1.8 gr/cm<sup>3</sup>'tür [165].

Hancıoğlu'nun [166] yaptığı bir çalışmada bentonitleri alkali bentonit, yarı alkali bentonit, toprak alkali bentonit ve toprak alkali yarı bentonit olmak üzere 4 gruba ayırmıştır. Asitlerle tepkimeye girme sonucu yapılarındaki değişikliklere göre yapılan bu kategorize etme şekline göre alkali bentonitler asitle tepkime sonucu kandil özelliklerini koruyabilmektedirler. Yarı alkali bentonitler tepkime sonucu özelliklerini kaybetmektedirler. Toprak alkali bentonitler yapılarında bulunan alkali gruplar sebebiyle yer değiştirme özelliğine sahiptirler. Asitlerle oluşacak reaksiyon sonrası ya da reaksiyon öncesi bir alkali tuzun bünyesine eklenmesi sonucu alkali bentonite dönüşebilmektedir. Toprak alkali yarı bentonitler ise alkali grupları barındırması sebebiyle asitlerle girdikleri reaksiyon sonucu alkali bentonit özelliklerini kaybetmektedirler.

Formülü,  $Al_4Si_8O_{20}(OH)_4.nH_2O$ 'dur [165]. Güven'in [167] yapmış olduğu bir çalışmada bentonit/su oranı 1.2 olacak şekilde karıştırılıp çalkalanırsa, karışımın süspansiyon haline geldiğini gözlemlemiştir. Bentonitin genel formülüne bakıldığında içerisinde bulunan maddelerin %65'i SiO<sub>2</sub>, % 23.2'si Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve % 3.6'sı MgO 'dur. Bunlara ek olarak yapısında oluşan yer değiştirmeler sonucu farklı atomları da bünyesinde barındırmaktadır.

Bentonit kullanım alanı oldukça fazla bir kil çeşidi olup kullanım alanlarını kabaca aşağıdaki gibi özetlemek mümkündür.

- Atık su arıtılması
- Petrol rafinasyonu
- Meyve sularının berraklaştırılması
- Hayvan yemi katkısı vb. [74]

Bentonitler yapılarına göre üç farklı gruba ayrılır. Bunlar: sodyum bentonit, kalsiyum bentonit ve sodyum kalsiyum bentonittir. En yüksek şişme potansiyeline sahip olan bentonit türü sodyum bentonit, En az olan ise kalsiyum bentonitlerdir [168].

Yapılan deneylerde Tokat bölgesinden KarBen Bentonit Endüstriyel Madencilik Kimya Ar-Ge Nano Teknolojileri Sanayi ve Ticaret A.Ş. firmasından temin edilen sodyum bentonit kullanılmıştır. Kullanılan sodyum bentonitin özellikleri Çizelge 4.1’de gösterilmiştir. Deneylerden önce bentonit 10 nolu elekten elenerek elek altına geçen kısmı kullanılmıştır. Deneylerde kullanılan bentonit Şekil 4.1’de gösterilmiştir.

Çizelge 4.1. Deneylerde kullanılan sodyum bentonitin özellikleri

<b>Parametre</b>	<b>Değer (%)</b>
SiO <sub>2</sub>	58
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	19
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.5
CaO+MgO	5.2
K <sub>2</sub> O	1.1
Na <sub>2</sub> O	1
Elek Analizi (75 mikron)	10
Nem	9



Şekil 4.1. Deneyleerde kullanılan bentonit

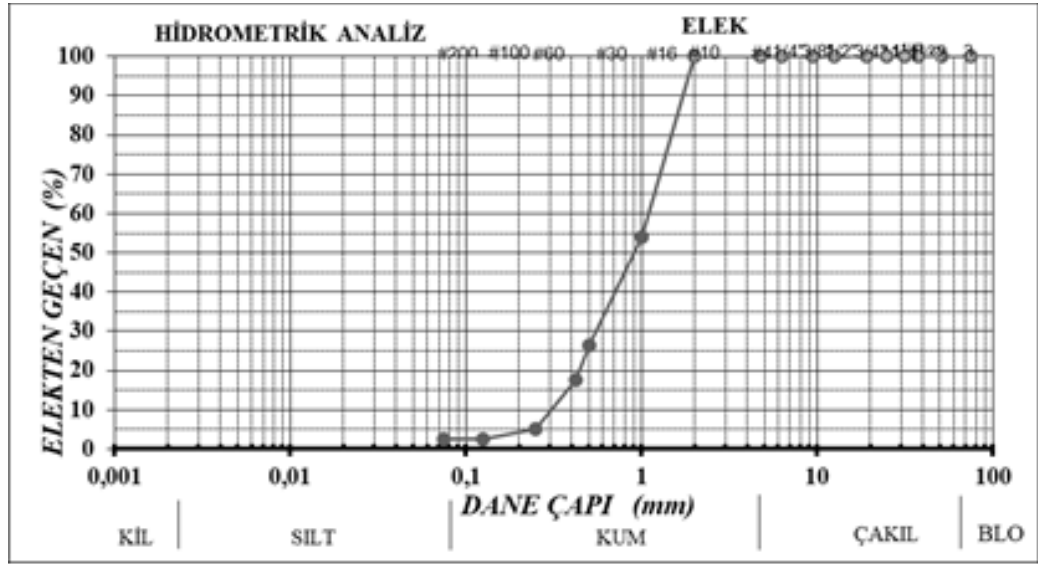
#### 4.1.2. Dere Kumu

Kohezyonlu bir yapıya sahip olan dere kumları kuruyken elle sıkılınca şekil alamazken, ıslak iken şekil alabilmektedir; ancak dokunulduğu zaman dağılmaktadır. Kum zeminler suya doymun olduğu durumlarda deprem yükü gibi ani yükler altında içindeki suyu drene edemedikleri için kayma gerilmelerine maruz kalmaktadır. Bu tür yüklemeler sonucunda kum zeminde büyük şekil değıştirmeler oluşmakta ve sürtünme kuvveti yüke yenilerek zeminde sıvılaşma olabilmektedir [169].

Deneyleerde kullanılacak olan dere kumu Safranbolu/ Karabük'te bulunan taş ocağından temin edilmiştir. Elenmeden önce oda koşullarında kurutulan kum, Elek sarsma makinesi yardımıyla elendikten sonra 10 nolu elek altında kalan kısmı kullanılmıştır. Deneyleerde kullanılan kum Şekil 4.2'de; Karabük Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Geoteknik Anabilim Dalı laboratuvarında elek analizi deneyi yapılmış ve granülometre eğrisi Şekil 4.3'te gösterilmiştir.



Şekil 4.2. Deneylerde kullanılan kum



Şekil 4.3. Çalışmada kullanılacak kuma ait granülometre eğrisi

#### 4.1.3. BAYF Külü

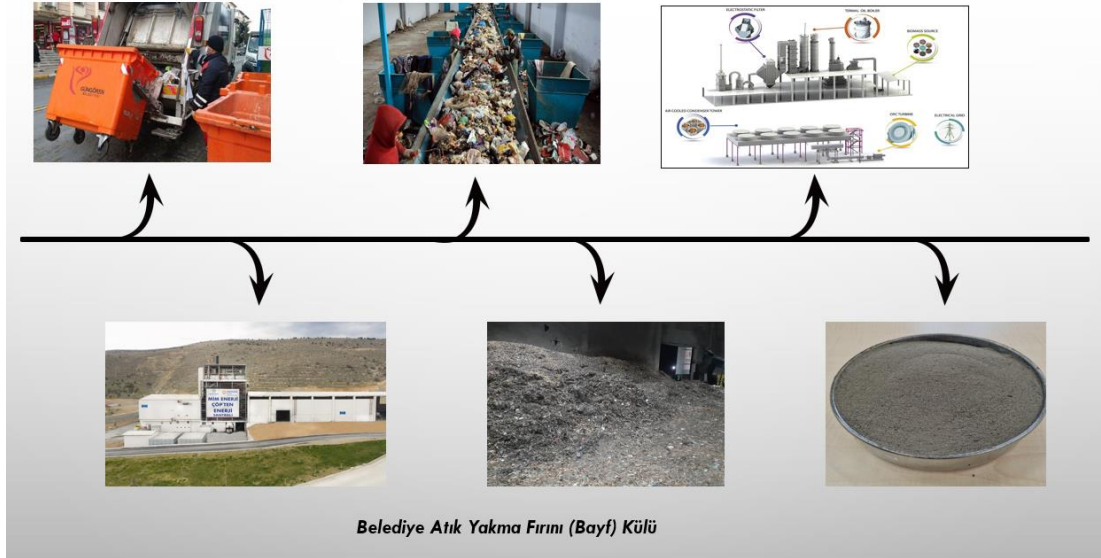
Çalışma kapsamında BAYF külü olarak Malatya Büyükşehir Belediyesi ve MİMSAN GRUP ortaklığında kurulan atık geri dönüşüm tesisinden (Şekil 4.4) elde edilen belediye atık yakma fırınından temin edilen evsel atık yakma külü kullanılmıştır. Evlerden toplanan evsel atıklar tesise getirilerek içerisinde bulunan cam, metal ve plastik gibi kendi türüne dönüşebilen maddeler ile bitkisel ürünler ( sebze, meyve vb.)



gibi geri dönüşümü olmayan maddeler ayrıştırıldıktan sonra geri kalan atık 1000-1500 °C’de yakılarak elektrik üretilmektedir. Bu yakma sonucu uçucu kül ortaya çıkmaktadır. Külün oluşum süreci Şekil 4.5’te Gösterilmiştir. Elde edilen külün 10 nolu elek altında kalan kısmı deneylerde kullanılmıştır. Deneylerde kullanılan BAYF külü Şekil 4.6’da gösterilmiştir.



Şekil 4.4. Atık geri dönüşüm tesisi



Şekil 4.5. Külün oluşum süreci



Şekil 4.6. Deneylerde kullanılan BAYF külü

Evsel atıkların yanması sonucu ortaya çıkan BAYF külü Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) Marmara Araştırma Merkezi Çevre ve Temiz Üretim Enstitüsü'nde içerik analizleri yapılmış ve fiziko-kimyasal analizi Çizelge 4.2'de, organik içerik analizi Çizelge 4.3'te ve inorganik içerik analizi Çizelge 4.4'te verilmiştir.

Çizelge 4.2. Fiziko-kimyasal analizi

PARAMETRE	SONUÇ	ANALİZ METODU
Görünüm/koku	Füme/kokusuz	-
pH değeri (Sulu çözelti)	12.72	TS EN 15933
Nem miktarı (% ağırlık)	0.7	TS 9546 EN 12880
Katı madde içeriği (% ağırlık)	99.3	TS 9546 EN 12880
Organik madde miktarı (% ağırlık)	<0,1	TS EN 12879
İnorganik madde miktarı (% ağırlık)	99.3	TS EN 12879
Toplam organik karbon (TOK) (%)	1.22	ASTM D5291, ASTM D5373

\* Numunenin oldukça bazik (aşındırıcı (korozif)) (EU GHS 2013'e göre  $pH \geq 11,5$  korozif olarak tanımlanmaktadır), kuru ve ağırlıklı olarak inorganik içerikli olduğu tespit edilmiştir.

Çizelge 4.3. Organik içerik analizi

BİLEŞİK	MİKTAR (mg/kg)	BİLEŞİK	MİKTAR (mg/kg)	BİLEŞİK	MİKTAR (mg/kg)
Naphthalene	<5	Fluoranthenr	<5	Benzo[a]pyrene	<5
Acenaphthlene	<5	Pyrene	<5	İndeno[1,2,3-c,d]pyrene	<5
Acenaphthene	<5	Benz[a]anthracene	<5	Dibenz[a,h]anthracene	<5
Fluorene	<5	Chrysene	<5	Benzo[g,h,i]perylene	<5
Phenanthrene	<5	Benz[b]fluoranthene	<5		
Anthracene	<5	Benzo[k]fluoranthene	<5		

\* Örnekteki olası polisilik aromatik hidrokarbonların (PAH) tayini QuEChERS yöntemine göre asetonitril özütlemesi/bölümlemesi ve dağıtım SPE ile temizlemeyi müteakip GC-MS kullanarak yapılmıştır.

\*\*Örnek dioksin/furan analizi EPA 1613 B metoduna göre GC-MSMS cihazı ile yapılmıştır. Analiz sonucuna göre numunede dioksin/furan miktarı 2931 ng/kg olarak tespit edilmiştir. Bu sonuçlara göre numunede tespit edilen organik içerik Atık Yönetimi Yönetmeliği (AYY)'ne göre risk oluşturabilecek seviyede değildir.

Çizelge 4.4. İnorganik içerik analizi

<b>Si</b>	%23.57	<b>Al</b>	%3.87	<b>Na</b>	%1.16	<b>Cl</b>	%0.37
<b>Ca</b>	%16.65	<b>Mg</b>	%2.67	<b>P</b>	%0.84	<b>Ti</b>	%0.13
<b>K</b>	%5.59	<b>Fe</b>	%1.55	<b>S</b>	%0.42		

\*%0,1'in altındaki sonuçlar gösterilmemiştir.

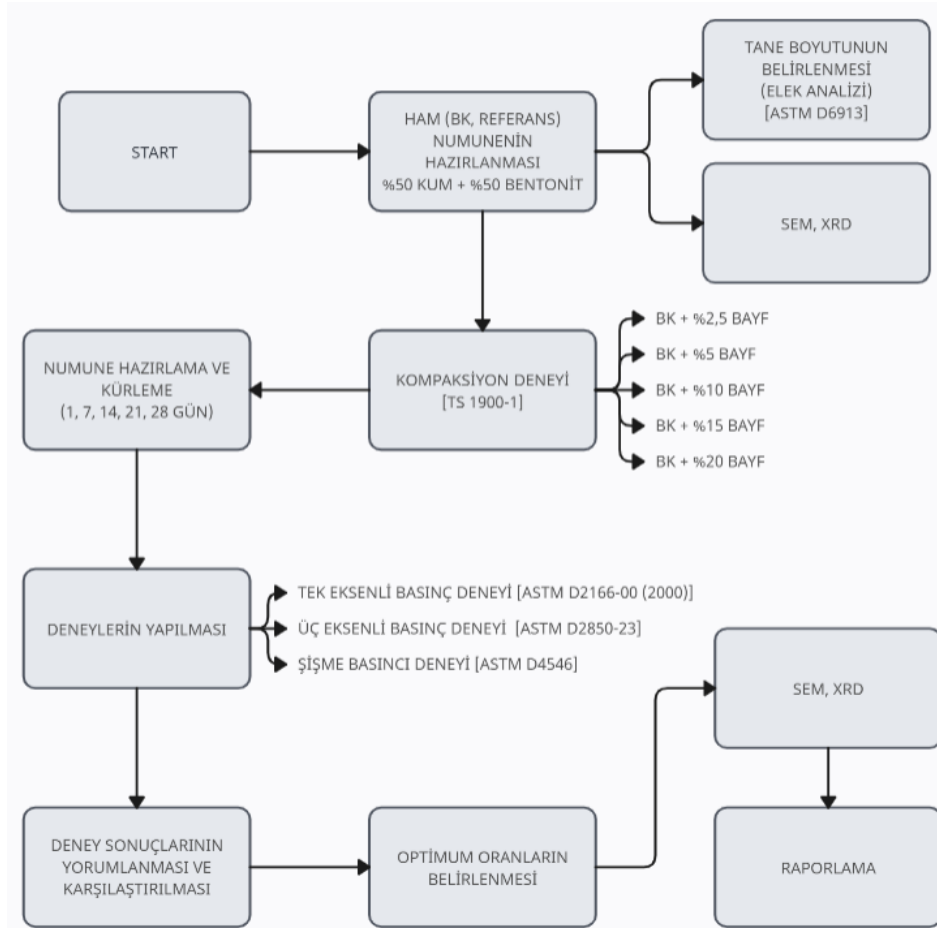
\*\*Analiz yapılırken XRF Spektrometre cihazı kullanılmıştır.

## 4.2. METOD

### 4.2.1. Numune Hazırlama

Bu çalışma kapsamında serbest basınç deneyi, üç eksenli basınç deneyi ve şişme basıncı deneyleri ile söz konusu katkı malzemelerinin zemin parametrelerindeki etkileri belirlenmiştir. Bu amaç doğrultusunda deney akış diyagramı Şekil 4.7, deney programı Çizelge 4.5'te ve çalışma kapsamında yapılan deney sayıları ise Çizelge 4.6'da verilmiş olup çalışmaya öncelikle atık malzemenin kimyasal ve fiziksel özelliklerinin belirlenmesi ile başlanmıştır. Sonraki aşamada ise deneylerde

kullanılacak bentonit, kum zeminlerin ve karışım zeminin (%50 bentonit + %50 kum) kompaksiyon deneyleri yapılarak optimum su içeriği ve maksimum kuru birim hacim ağırlık belirlenmiştir. Böylelikle tüm numunelerin elde edilen optimum su içeriğinin ve kuru birim hacim ağırlığında sıkıştırılması sağlanarak tüm deney numunelerinin birbirleri ile aynı özellikte kontrol altına alınmıştır. Katkı malzemeleri ve deneylerde kullanılacak zeminin özelliklerinin belirlenmesinden sonra karışım zemin numunesine ağırlığınca %2.5, %5, %10, %15 ve %20 BAYF külü eklenerek optimum su muhtevasında numuneler hazırlanmıştır. Bu katkılı numuneler tek eksenli basınç deneyi, üç eksenli basınç deneyi ve şişme basıncı deneyi kalıplarına alınarak sıkıştırma işlemi gerçekleştirilmiştir. Daha sonra 1, 7, 14, 21, 28. gün kür sonunda serbest basınç deneyi, üç eksenli basınç deneyi ve şişme basıncı deneyleri, bunlara ek olarak da referans numunesi ve karışım oranlarındaki numunelere XRD-SEM analizleri yapılmıştır.



Şekil 4.7. Deney akış diyagramı

Çizelge 4.5. Deney programı

Malzeme Katkı Miktarları	Kompaksiyon Deneyi					
	Kür süresi					
Yapılması Planlanan Deneyler	0.GÜN	1.GÜN	7.GÜN	14.GÜN	21.GÜN	28.GÜN
Ham numune, %2.5, %5, %10, %15 ve %20 BAYF külü Zemin	*					
Katkısız Zemin Şişme Basıncı Deneyi	*					
Katkısız Zemin Tek Eksenli Basıncı Deneyi	*					
Katkısız Zemin Üç Eksenli Basıncı Deneyi	*					
%2.5, %5, %10, %15 ve %20 BAYF külü katkılı Zemin XRD Analizleri			*			*
%2.5, %5, %10, %15 ve %20 BAYF külü katkılı Zemin Şişme Basıncı Deneyi		*	*	*	*	*
%2.5, %5, %10, %15 ve %20 BAYF külü katkılı Zemin Serbest Basıncı Deneyi		*	*	*	*	*
%2.5, %5, %10, %15 ve %20 BAYF külü katkılı Zemin Üç Eksenli Basıncı Deneyi		*	*	*	*	*

Çizelge 4.6. Yapılan deney sayıları

KÜR SÜRESİ	DENEYLER	%0	%2.5	%5	%10	%15	%20	TOPLAM
0.GÜN	SBD	3	-	-	-	-	-	3
	ÜBD	3	-	-	-	-	-	3
	ŞBD	1	-	-	-	-	-	1
	XRD	1	-	-	-	-	-	1
1.GÜN	SBD	-	3	3	3	3	3	15
	ÜBD	-	3	3	3	3	3	15
	ŞBD	-	1	1	1	1	1	5
	XRD	-	-	-	-	-	-	-
7.GÜN	SBD	-	3	3	3	3	3	15
	ÜBD	-	3	3	3	3	3	15
	ŞBD	-	1	1	1	1	1	5
	XRD	-	1	1	1	1	1	5
14.GÜN	SBD	-	3	3	3	3	3	15
	ÜBD	-	3	3	3	3	3	15
	ŞBD	-	1	1	1	1	1	5
	XRD	-	-	-	-	-	-	-
21.GÜN	SBD	-	3	3	3	3	3	15
	ÜBD	-	3	3	3	3	3	15
	ŞBD	-	1	1	1	1	1	5
	XRD	-	-	-	-	-	-	-

28.GÜN	SBD	-	3	3	3	3	3	15
	ÜBD	-	3	3	3	3	3	15
	ŞBD	-	1	1	1	1	1	5
	XRD	-	1	1	1	1	1	5
<b>TOPLAM</b>		<b>8</b>	<b>37</b>	<b>37</b>	<b>37</b>	<b>37</b>	<b>37</b>	<b>193</b>
Not: SBD, serbest basınç deneyini; ÜBD üç eksenli basınç deneyini, ŞBD, şişme basıncı deneyini ve XRD, x ışını kırınımı deneyini temsil etmektedir.								

## 4.2.2. Tanımlama Deneyleri

### 4.2.2.1. Standart Proktor Deneyi

Deney Türk Standartları [TS] 1900-1 standartlarına uygun yapılmıştır. Ham numune ve karışım oranına göre BAYF külü katılmış kuru zemin numunesinin su ilave edilerek karışım kabına alındıktan sonra üç katman olarak sıkıştırma işlemi gerçekleştirilmiştir. Her katmana 25 defa standart tokmak ile sıkıştırılarak numuneler etüvde kurutulup ve içerdiği su içeriği oranına göre maksimum kuru hacim ağırlığı belirlenmiştir. Her sıkıştırma sonrası numuneye ağırlığınca %5 su eklenerek deney tekrarlanmıştır. Şekil 4.8’de çalışma kapsamında kullanılan kompaksiyon deney aleti gösterilmiştir.



Şekil 4.8. Kompaksiyon deney ekipmanları

### 4.2.2.2. Serbest Basınç Deneyi

Serbest basınç deneyi Uluslararası Amerikan Test ve Materyalleri Topluluğu (ASTM) D 2166-00 (2000) standardına uygun yapılmıştır. Silindirik numunelere sadece düşey

doğrultuda yükleme yapılmıştır. Kırılma anındaki maksimum eksenel gerilme serbest basınç dayanımı olarak alınmıştır. Zemin numunesi yükseklik/çap oranı 2-2.5 olacak şekilde hazırlanmıştır. Deney cihazına yerleştirilen numuneler yükleme hızı 1mm/dk olarak deney başlatılmıştır. Numunedekırılma olduktan sonra gerilme-deformasyon eğrisi elde edilip deney sonlandırılmıştır. Her bir kür sonunda yapılan deneylerde 3 numune üzerinde deney gerçekleştirilmiş ve ortalamaları alınmıştır. Şekil 4.9'da serbest basınç deneyi cihazı gösterilmiştir.



Şekil 4.9. Serbest basınç deneyi cihazı

#### 4.2.2.3. Üç Eksenli Basınç Deneyi

Üç eksenli basınç deneyi ASTM D2850-23 standartlarına uygun yapılmıştır. Silindirik olarak hazırlanan deney numunelerine UU (konsolidasyonsuz, drenajsız) tipi düşey eksenel ve yanıl basınç uygulayarak kohezyon ve içsel sürtünme açıları verilerinin bulunması amaçlanmıştır. Deneyde aynı zeminden alınan 3 numune çap/boy oranı 1/2 olan su geçirmez memba ile sarılmış zemin numunesi yerleştirildikten sonra su yardımıyla sırasıyla 1,2 ve 3 bar hidrostatik (çevresel) basınç uygulanmıştır. Eksenel gerilme, zemin numunesi üzerindeki başlığa temas eden bir piston yardımı ile numuneye uygulanmıştır. Yük sonucu zeminde meydana gelen deformasyonlar kaydedilmiştir. Şekil 4.10'da üç eksenli basınç deneyi cihazı gösterilmiştir.



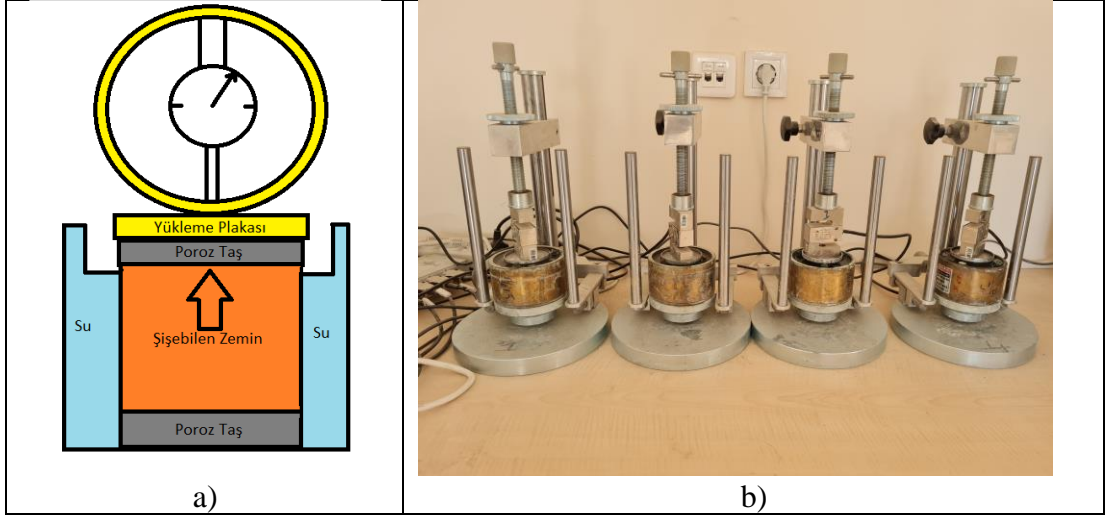
Şekil 4.10. Üç eksenli basınç deneyi cihazı

#### 4.2.2.4. Şişme Basıncı Deneyi

Yapıda oluşan hasarlar genellikle zemin hareketleri olduğu gözlemlenmiştir. Zeminlerde oluşan oturma problemi kadar şişme potansiyeli de yapıda büyük ve kalıcı hasarlara yol açmaktadır. Şişme basıncı, kil zemin üzerindeki yapıdan gelen yükü aşarsa, zeminde oluşacak hacim artışı temel sorunlarına sebep olmaktadır. Bu sebeple, üzerine yapı inşa edilecek zeminin şişme potansiyelinin saptanması önemli bir gerekliliktir.

Şişme basıncı deneyleri ASTM D 4546 [170] standardına göre gerçekleştirilmiştir. Yüksekliği 20 mm, çapı 50 mm olan numune kabına numuneler yerleştirildikten sonra kabın her iki yüzeyine poroz taş yerleştirilmiştir. Numune kalıbsabitleştirildikten sonra sırayla yükleme plakası ve yük hücresi yerleştirilmiştir. Su konulan şişme düzeneği 7 gün boyunca her saat başı basınç okumaları bilgisayara aktarılmıştır. Deney sonunda şişme basıncı grafiği çizilmiştir. Şişme basıncı cihazının şematik görüntüsü Şekil 4.11 a'da verilmiştir. Ayrıca Karabük Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Geoteknik Anabilimdalı Laboratuvarında gerçekleştirilen deneylerde kullanılan şişme basıncı cihazı Şekil 4.11 b'de verilmiştir.





Şekil 4.11. (a)Şişme basıncı cihazının şematik görüntüsü, (b) Şişme basıncı cihazı

#### 4.2.2.5. X Işını Kırınımı Analizi (XRD)

XRD; malzemenin iç yapısını zarar vermeden inceleyen metotlardan biridir ve malzemenin yapısındaki değişimlerin gelişimini ve ilerlemesini incelemeye güçlü bir yöntem olarak kullanılmıştır [171]. Bu çalışmada farklı oranlarda ham numune ile geri dönüşüm BAYF külü karıştırılması sonucu oluşturulan numunelerin yapısında oluşan değişimlerin gözlemlenmesi amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda Karabük Üniversitesi Demir Çelik Enstitüsü MARGEM laboratuvarında deneyler yapılmıştır. Hazırlanan ham numuneye ve belirli oranlarda BAYF külü katkısıyla hazırlanan numunelere kür süresinin 7. ve 28. gününde test uygulanmış ve grafikleri çizilmiştir. Deneyde kullanılan XRD test cihazı Şekil 4.12’de gösterilmiştir.



Şekil 4.12. XRD test cihazı

## BÖLÜM 5

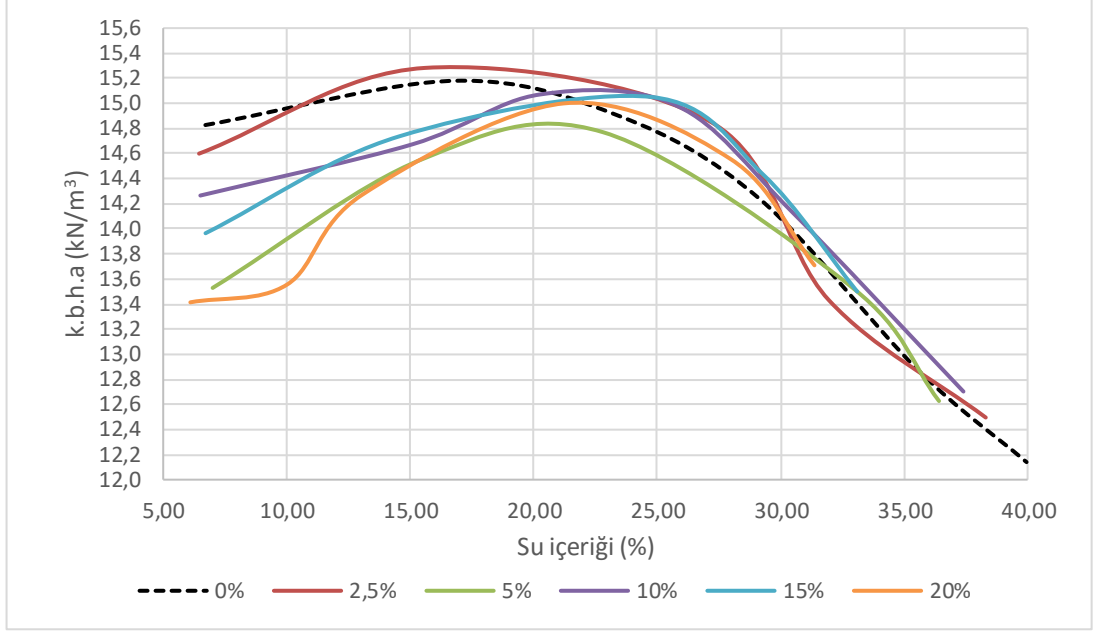
### BULGULAR

Bu bölümde yapılan deneysel çalışmada kullanılan evsel atık geri dönüşüm atığı külünün zeminlerin mekanik özelliklerine etkisi yorumlanmıştır. Referans numune olarak hazırlanan %50-%50 kum-bentonit karışımına ağırlığınca eklenen %2.5, %5, %10, %15 ve %20 oranında BAYF külü katılarak deneysel numuneler hazırlanmıştır. Bu numunelere 1,7,14 ve 28 günlük kür sonucunda standart proktor deneyi, tek eksenli basınç deneyi, üç eksenli basınç deneyi, şişme basıncı deneyi uygulanmıştır. Ayrıca tüm karışımlara 7. ve 28. günlük kür sonucunda SEM ve X ışını kırınımı analizi (XRD) tabii tutulmuştur.

#### 5.1. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

##### 5.1.1. Standart Proktor Deneyi

Deneysel çalışma yapılırken hazırlanan numunelerin optimum su içerikleri ve kuru birim hacim ağırlıkları önemli bir unsurdur. Deneylerde kullanılacak zemin numunelerinin aynı su içeriğinde ve aynı sıklıkta olması gerekmektedir. Bu nedenle hazırlanan ham numune ve çalışmada planlanan tüm BAYF külü oranları için standart proktor deneyi uygulanmıştır. Deneyler sonucunda referans numunenin optimum su içeriği %17 ve kuru birim hacim ağırlığı  $15.0 \text{ kN/m}^3$  bulunmuştur. Ayrıca tüm numuneler için kompaksiyon deneyi sonuçları Şekil 5.1’de gösterilmiştir.



Şekil 5.1. Kompaksiyon deneyi sonuçları

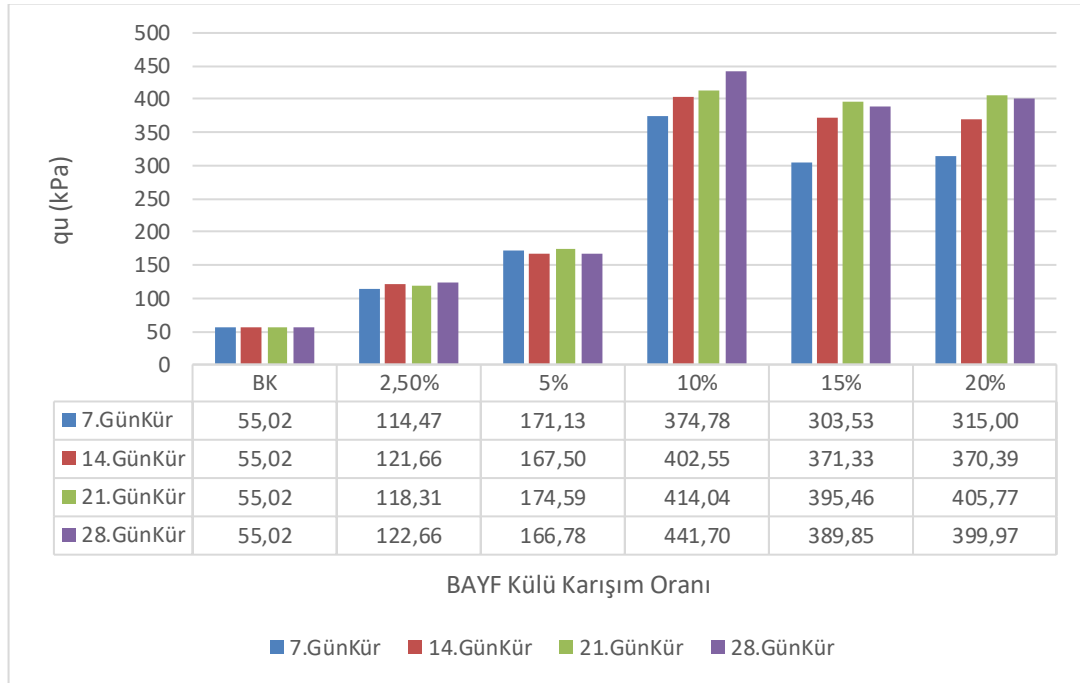
Bu çalışma kapsamında yapılan standart proktor deneyi sonuçları Çizelge 5.1’de gösterilmiştir. Çizelge incelendiğinde optimum su içeriği %17-23 ve kuru yoğunlukları 14.48-15.11 gr/cm<sup>3</sup> arasında değiştiği gözlemlenmiştir.

Çizelge 5.1. Standart proktor deneyi sonuçları

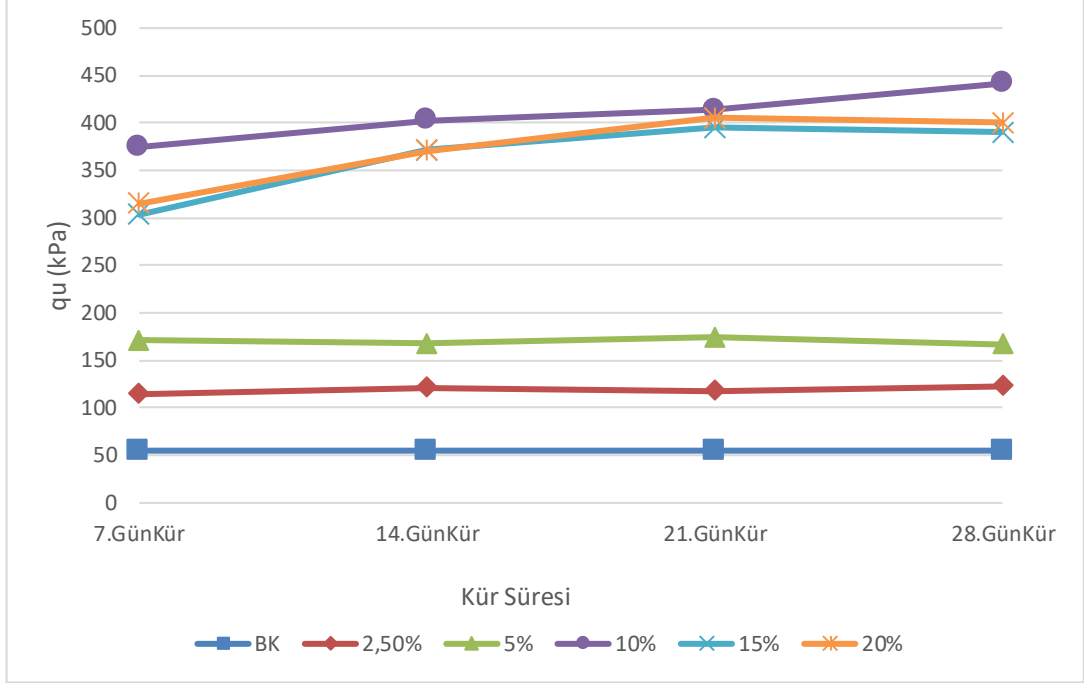
Karışım	Su Muhtevası (%)	Kuru Birim Hacim Ağırlık (kN/m <sup>3</sup> )
<b>BK (Ham Numune)</b>	17	15.01
<b>BK + %2.5 BAYF Külü</b>	17	15.11
<b>BK + %5 BAYF Külü</b>	22	14.87
<b>BK + %10 BAYF Külü</b>	22	14.99
<b>BK + %15 BAYF Külü</b>	23	14.95
<b>BK + %20 BAYF Külü</b>	23	14.48

### 5.1.2. Serbest Basınç Deneyi

Ağırlıkça %2.5, %5, %10, %15 ve %20 oranlarında BAYF külü katkılı zemin numuneleri üzerinde yapılan serbest basınç deneyi kür süresi ve karışım miktarlarına göre deney sonuçları Şekil 5.2’de, serbest basınç deneyi kür değişim grafiği ise Şekil 5.3’te verilmiştir. Grafikler incelendiğinde ham numune, %2.5 BAYF külü katkılı numune ve %5 BAYF külü katkılı numuneye kür süresinin etkisinin olmadığı gözlemlenmiştir. %10 BAYF külü katkılı numune, %15 BAYF külü katkılı numune ve %20 BAYF külü katkılı numunede ise kür süresinin artmasıyla dayanımın arttığı ancak bir noktada pik değere ulaştınca dayanımda azalmanın başladığı görülmektedir. Her iki grafik birlikte değerlendirildiğinde en yüksek artışın 28 gün süresi ve %10 karışım oranında meydana geldiği sonucuna varılmaktadır.

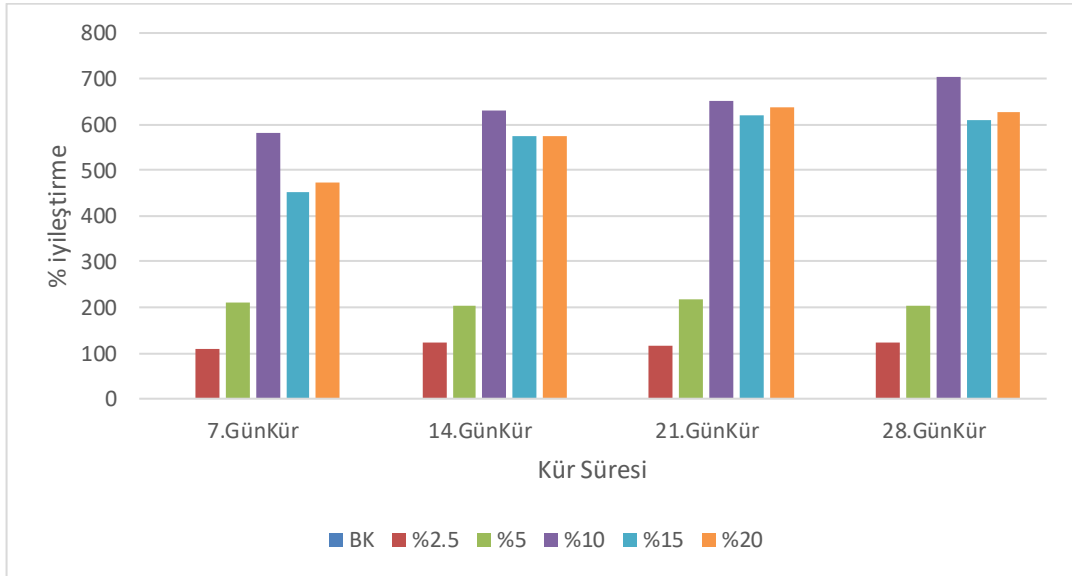


Şekil 5.2. Kür süresi ve karışım miktarlarına göre serbest basınç deneyi sonuçları



Şekil 5.3. Serbest basınç deneyi kür değişim grafiği

Elde edilen sonuçlar daha detaylı irdelendiğinde incelendiğinde %10 karışım oranı için 28. günlük kür süresindeki dayanım referans numuneye göre 7.03 kat dayanım arttırdığı gözlemlenmiştir (Şekil 5.4). Bu veriye göre dayanım için optimum karışım oranı %10 seçilebilir.

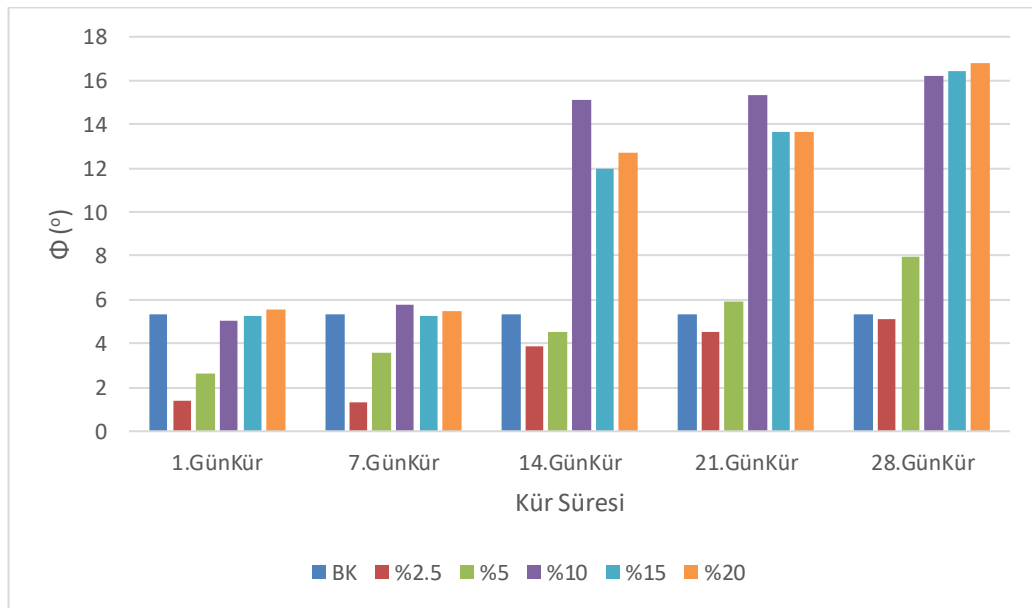


Şekil 5.4. Serbest basınç deneyi % artış oranları

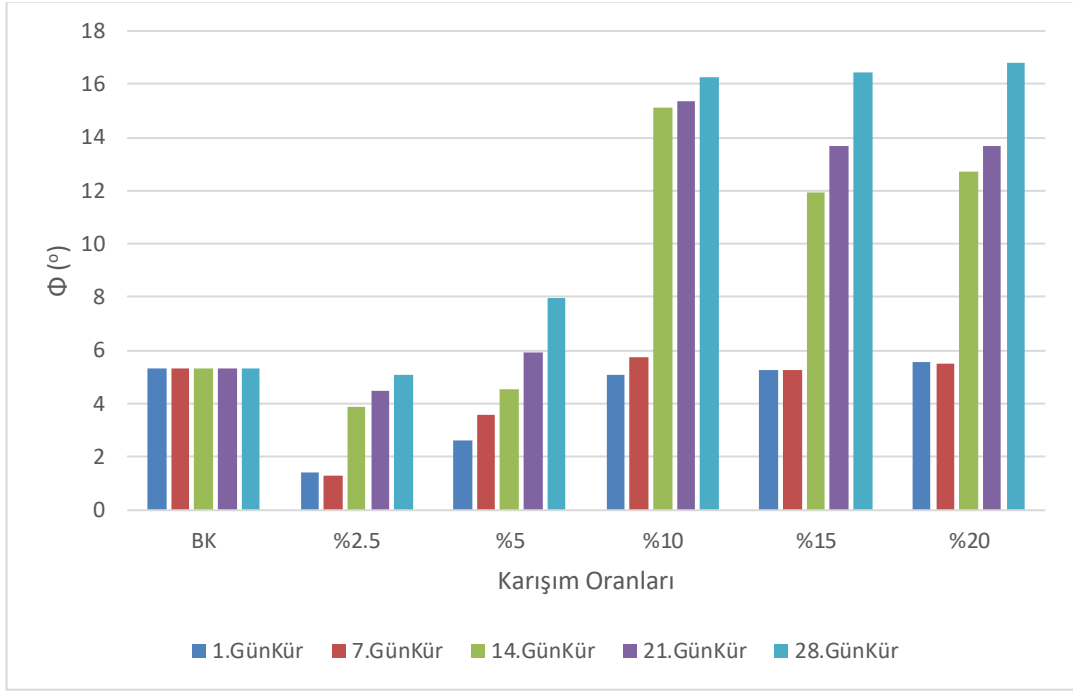
### 5.1.3. Üç Eksenli Basınç Deneyi

Bu çalışmada üç eksenli basınç deneyi yapılarak hazırlanan numunelerin içsel sürtünme açısı ve kohezyon değerleri belirlenmiştir. İlk olarak hazırlanan referans numune üzerine gerçekleştiren deney sonucu içsel sürtünme açısı  $5.33^\circ$  ve kohezyon değeri 51.40 kPa bulunmuştur. Sonrasında hazırlanan %2.5, %5, %10, %15 ve %20 BAYF külü katkılı numuneler her kür süresinde deneye tabi tutulmuş ve içsel sürtünme açısı ile kohezyon değerleri belirlenmiştir.

İçsel sürtünme açısı değerlerinin verildiği Şekil 5.5 ve Şekil 5.6 incelendiğinde BAYF külü katkılı karışım için kür süresinin 14. günün karışım oranına bağlı olarak içsel sürtünme açısı eşik değer olduğu değerlendirilmiştir. 14. günden sonra % 10, %15 ve %20 karışım oranlarında içsel sürtünme açısında anlamlı değişiklikler olmaktadır. Karışım oranlarının %2.5 ve %5 olduğunumunelerde tüm kür süresi bağlamında önemli bir artış olmadığı söylenebilir. Ancak % 10 karışım oranından sonra kürlemeyle birlikte içsel sürtünme açıları artış gözlenmektedir. Ayrıca bu verilerden yola çıkılarak kür süreleri ve karışım oranları bağlamında değerlendirme yapıldığında 14, 21 ve 28 günlük kür için %10 karışım oranı optimum miktar olarak değerlendirilebilir.

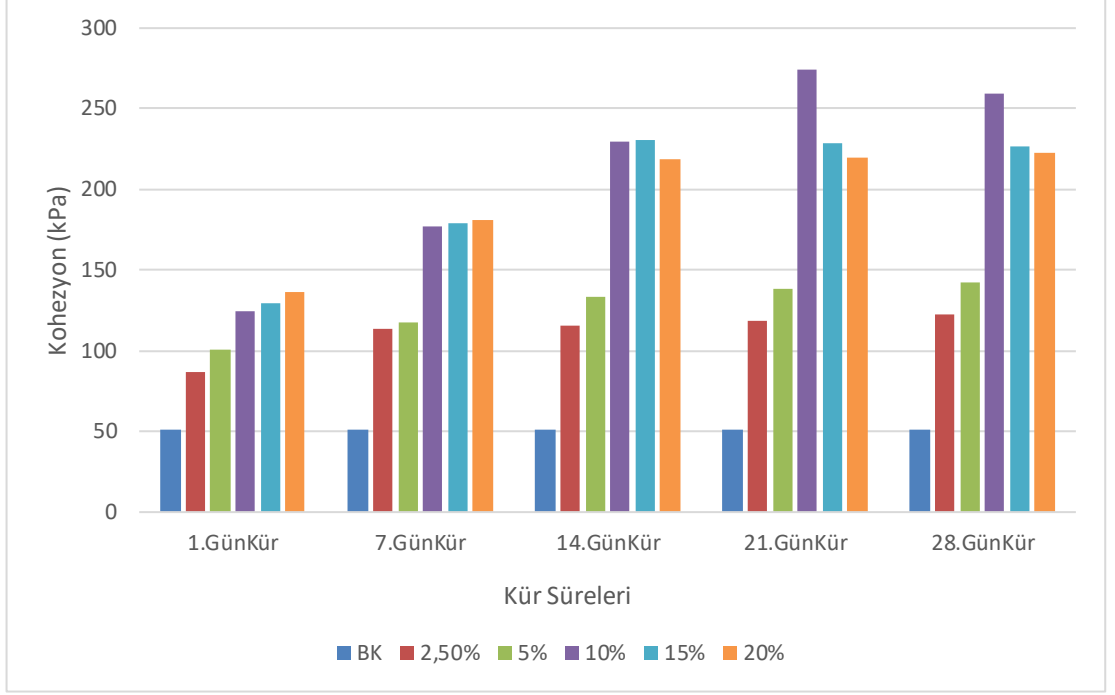


Şekil 5.5. Kür süresi-İçsel sürtünme açısı değerleri

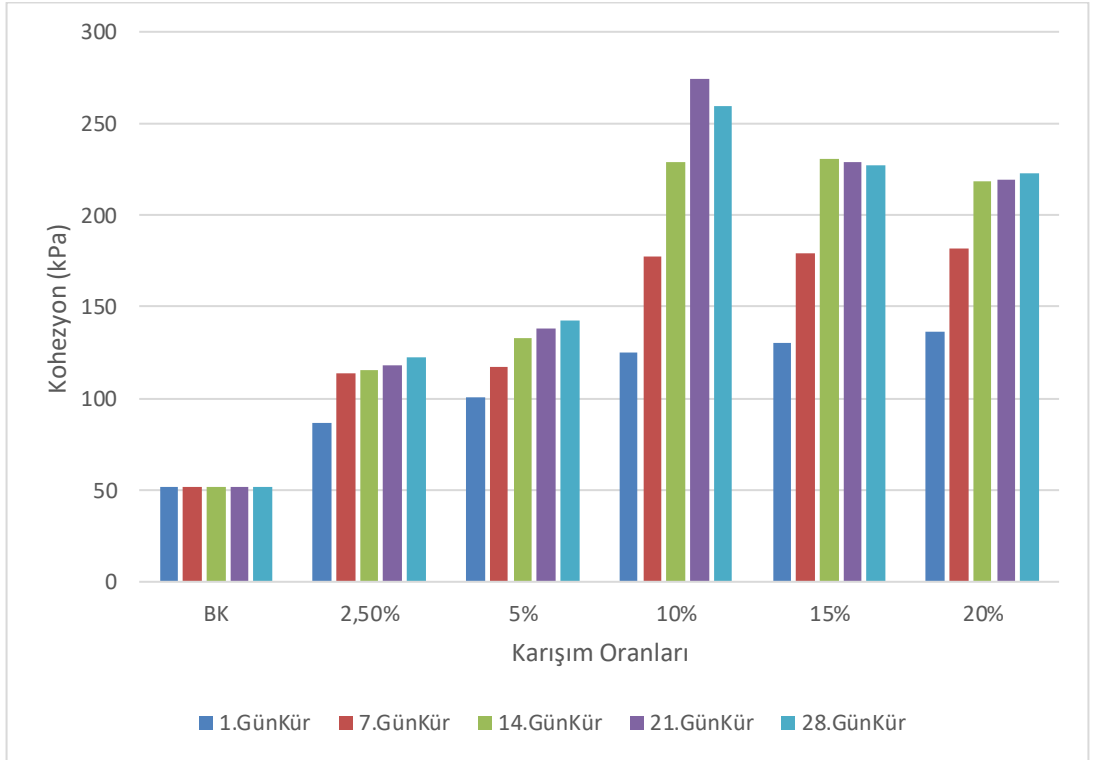


Şekil 5.6. Karışım Oranları-İçsel sürtünme açısı değerleri

Şekil 5.7 ve Şekil 5.8’de üç eksenli basınç deneyi sonucu bulunan kohezyon değerleri verilmiştir. Veriler incelendiğinde tüm kür sürelerinde %10 BAYF külü katkısı kohezyonda artış oluşturmaktadır. Ayrıca kürlenme ile birlikte numunelerdeki kohezyon değeri artış göstermektedir. Bu da katkı malzemesinin kürlenmeye bağlı olarak malzemede kimyasal ve fizik etki oluşturduğunu göstermektedir. Ayrıca kür süresi dikkate alınarak yapılacak bir değerlendirmede 14 günlük kür %10’dan sonraki karışım oranları kullanılabilir nitelikte olup 28. gün ve %10 karışım oranı en iyi değeri etkiyi vermiştir.



Şekil 5.7. Kür süresi-Kohezyon değerleri



Şekil 5.8. Karışım Oranları-Kohezyon değerleri



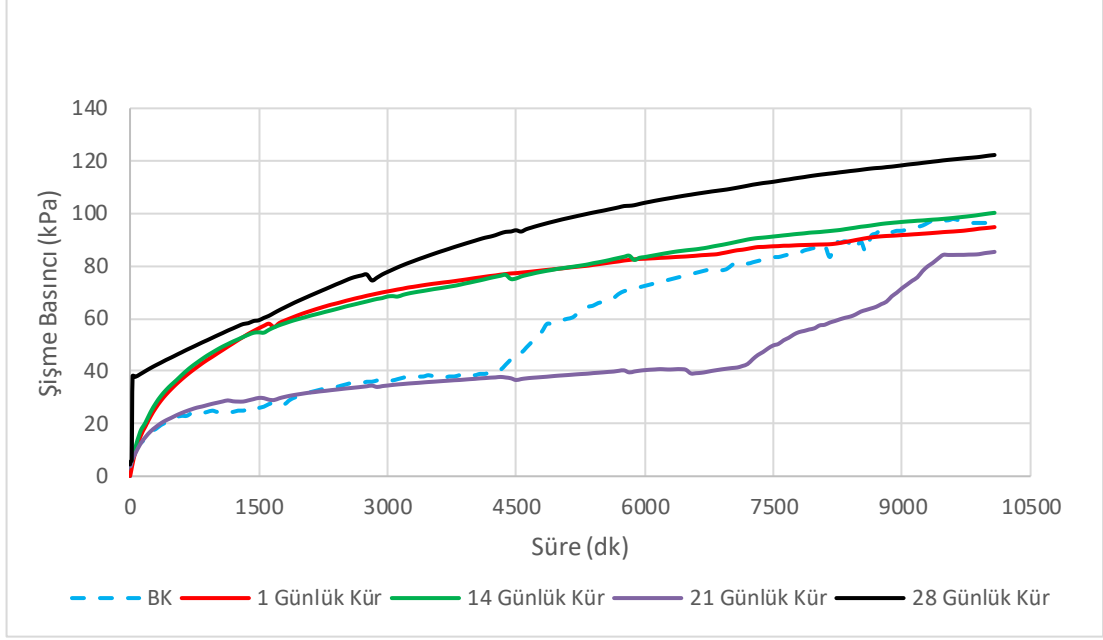
Bu veriler ışığında kohezyon ve içsel sürtünme açıları maksimum değerleri irdelenerek ham numuneye göre iyileşme oranları hesaplanmış ve Çizelge 5.2’de gösterilmiştir. Bu çizelgeye göre %20 BAYF külü katkılı numunenin ham numune içsel sürtünme açısına göre yaklaşık 3.15 kat arttığı gözlemlenmiştir. Buna ilaveten kohezyon değerinde %10 BAYF külü katkılı numunenin ham numune kohezyon değerini 5.33 kat arttırdığı gözlemlenmiştir.

Çizelge 5.2. İyileşme oranları

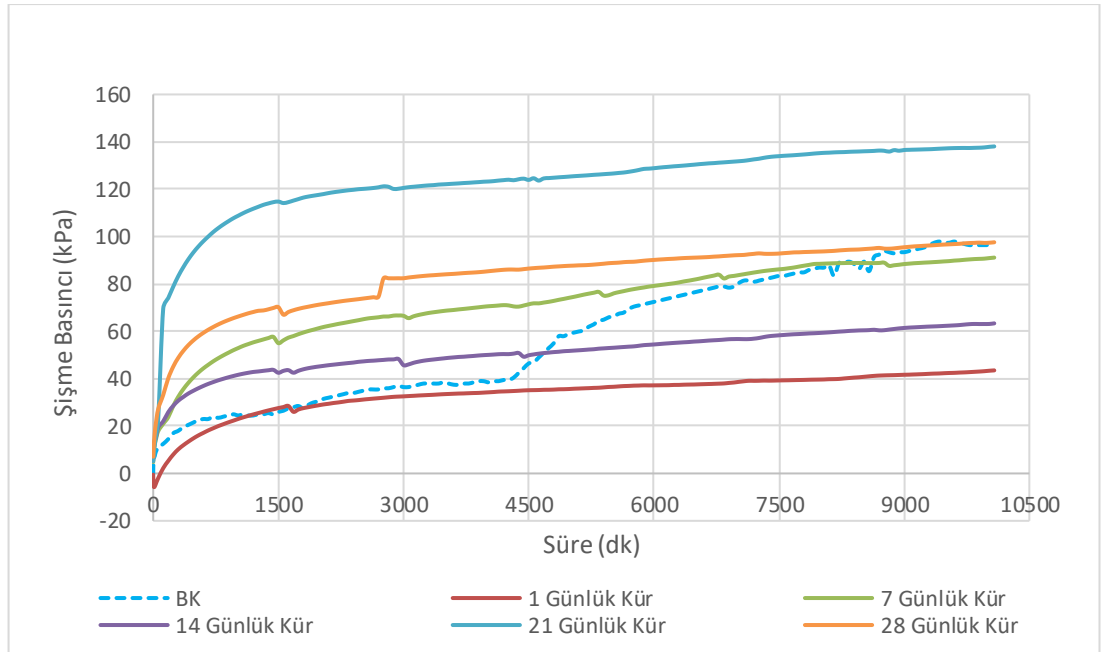
Karışım	İçsel Sürtünme Açısı	İyileşme Oranı	Kohezyon	İyileşme Oranı
<b>Ham Numune</b>	5.33	1.00	51.40	1.00
<b>%2.5 BAYF külü</b>	5.10	0.95	122.60	2.38
<b>%5 BAYF külü</b>	7.96	1.49	142.53	2.77
<b>%10 BAYF külü</b>	16.24	3.04	273.92	5.33
<b>%15 BAYF külü</b>	16.43	3.08	230.70	4.49
<b>%20 BAYF külü</b>	16.81	3.15	222.41	4.32

#### 5.1.4. Şişme Basıncı Deneyi

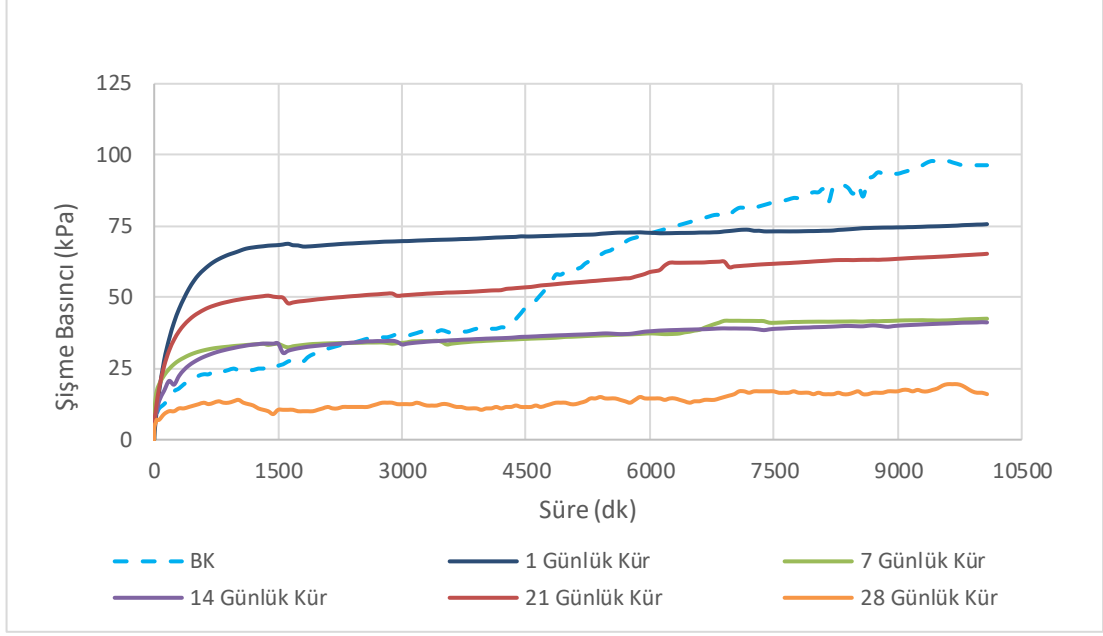
Çeşitli oranlardaki BAYF külü katkısının zemin şişmesine etkisinin kür süresi ile birlikte zeminin şişme basıncına etkisi ayrıntısına ilgili bölümde değinilen sabit hacim yöntemine dayalı bir deney düzeneği kullanılarak test edilmiştir. Deneylerde zemin numuneleri optimum su içeriğinde hazırlanmıştır. Deneylere farklı ağırlıklardaki katkı maddesi ve kür süresinin şişme basıncındaki değişimi değerlendirebilmek için BK (Bentonit-Kum) zeminin şişme basınçlarının belirlenmesi ile başlanmıştır. Deney sonuçlarına göre, BK zeminin şişme basıncı 97 kPa olarak bulunmuş olup çeşitli katkı miktarları ve bu katkılar için belirlenen kür süreleri sonucunda elde edilen şişme deney sonuçları zaman-şişme basıncı grafikleri şeklinde Şekil 5.9-5.13’de sunulmuştur. Şişme basıncı grafikleri incelendiğinde genel olarak referans numuneye göre katkı malzemesinin zeminin şişme basıncını düşürdüğü açıkça ortaya çıkmaktadır. Ancak %2.5 ve %5 BAYF külü katkısının şişme basıncına etki etmediği hatta negatif yönde etki ettiği gözlemlenmiştir.



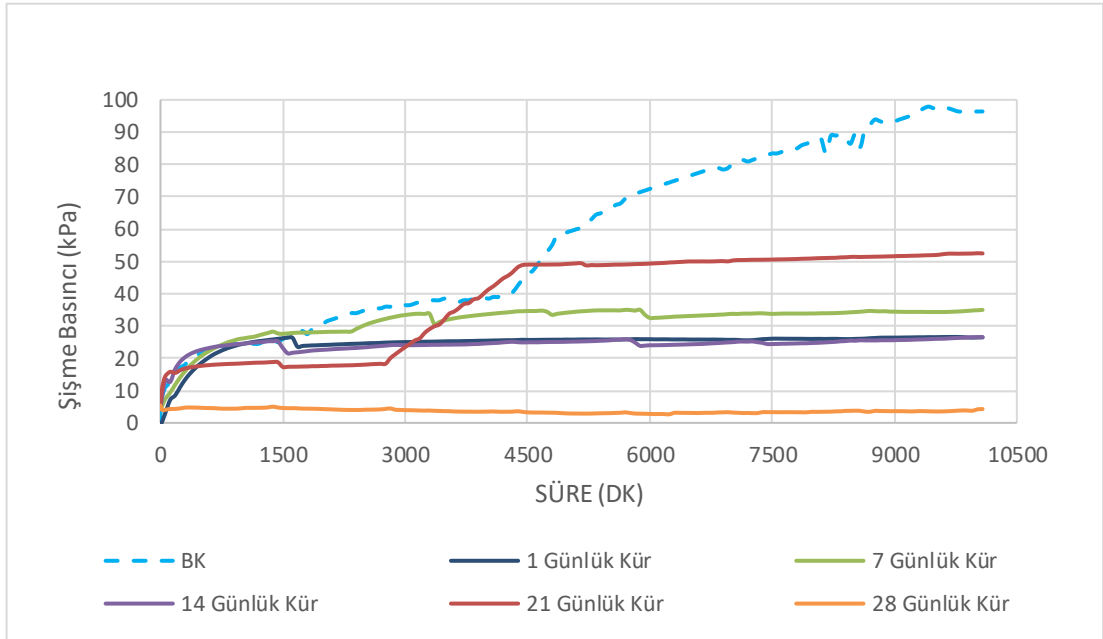
Şekil 5.9. %2.5 BAYF külü katkılı numune şişme basıncı grafiği



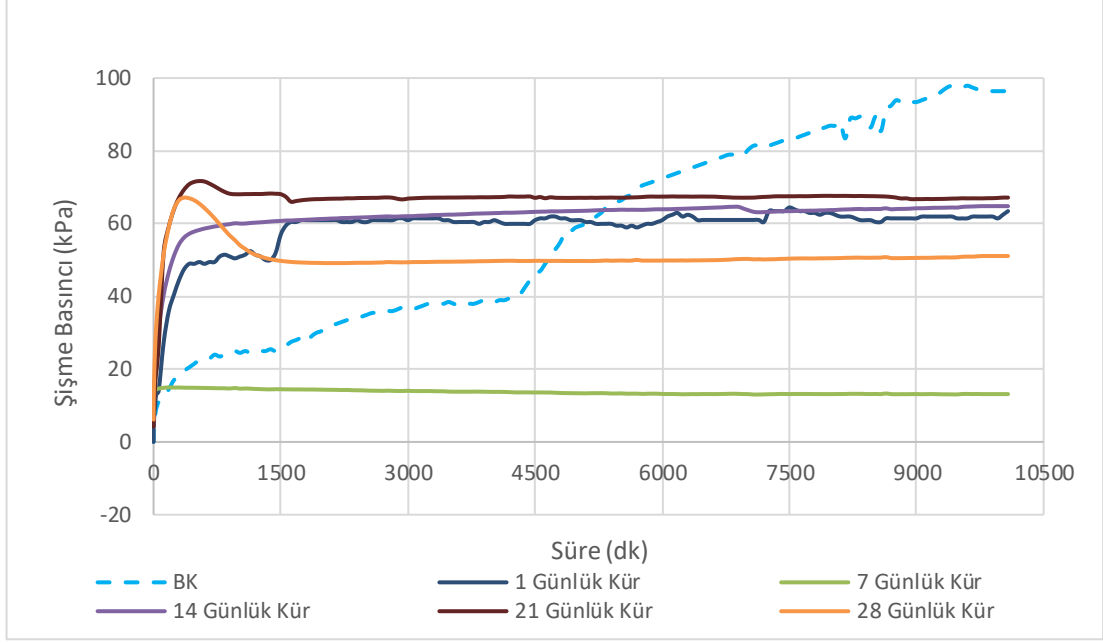
Şekil 5.10. %5 BAYF külü katkılı numune şişme basıncı grafiği



Şekil 5.11. %10 BAYF küllü katkıli numune şişme basıncı grafiği

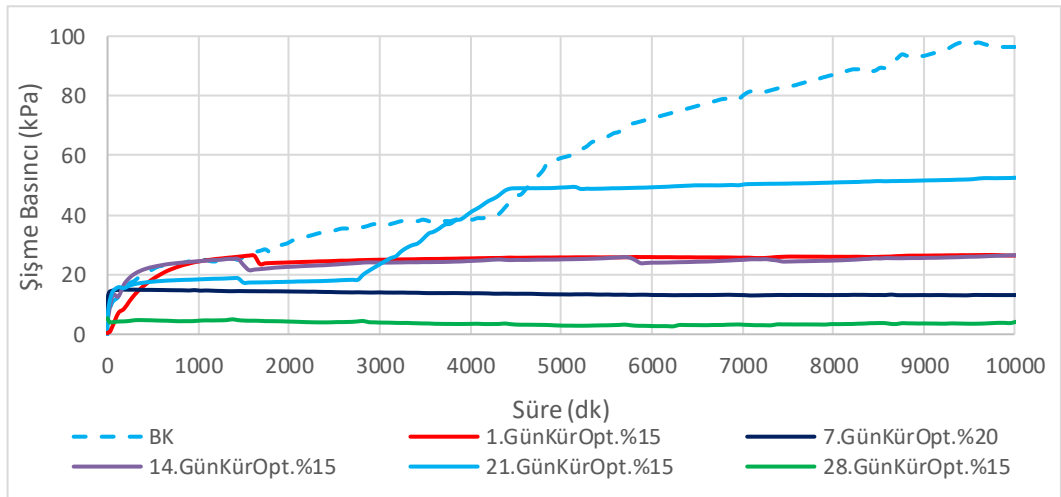


Şekil 5.12. %15 BAYF küllü katkıli numune şişme basıncı grafiği



Şekil 5.13. %20 BAYF külü katkılı numune şişme basıncı grafiği

Tüm karışım oranları ve kür süreleri birlikte değerlendirilerek her karışım oranındaki optimum kür süreleri dikkate alınarak optimum değerler grafiği çizilmiş ve Şekil 5.14’de gösterilmiştir. Şekil 5.14 dikkatlice incelendiğinde şişme basıncı için optimum karışım oranının %15 BAYF külü oranı ve optimum kür süresinin ise 28 gün olduğu görülmektedir.



Şekil 5.14. Optimum karışım oranı ve kür süreleri şişme basıncı grafiği

Çizelge 5.3'te optimum şişme maksimum gerilme değerleri verilmiştir. Çizelge incelendiğinde %15 karışım oranı için 28. günlük kür süresinde ham numuneye göre %94.5 oranında şişme potansiyelini azalttığı gözlemlenmiştir. Bu bağlamda %15 karışım oranı için 28. günlük kür süresi optimum değer olarak kabul edilebilir.

Çizelge 5.3. Optimum şişme maksimum gerilme değerleri

Numune	Şişme Basıncı (kPa)	Şişme Potansiyeli Azalma Oran (%)
<b>Ham Numune</b>	97.9	0
<b>1.Gün-%15 BAYF külü</b>	26.6	72.83
<b>7.Gün-%20 BAYF külü</b>	14.97	84.7
<b>14.Gün-%15 BAYF külü</b>	26.56	72.87
<b>21.Gün-%15 BAYF külü</b>	52.51	46.36
<b>28.Gün-%15 BAYF külü</b>	5.38	94.5

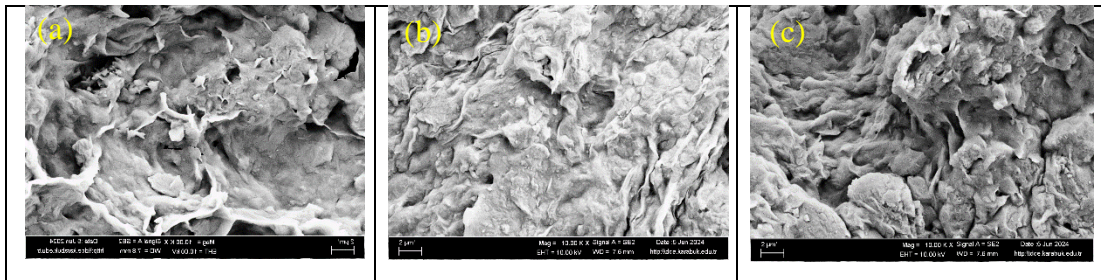
#### 5.1.5. Mikro Analiz Sonuçları

Bu çalışmada, BAYF külü katkısının zemin üzerindeki fiziksel ve mekanik etkilerinin mikro düzeyde anlaşılması amacıyla iyileştirme öncesi ve sonrası taramalı elektron mikroskobu (SEM), X-Işını Difraktometresi (XRD) kullanılmıştır. Stabilizasyon işlemi öncesi ve sonrasındaki mineralojik bileşiminin yorumlanabilmesi amacıyla katkısız zemin (BK) ve 28 gün küre maruz bırakılmış %2.5, %10 %15 ve %20 BAYF külü katkılı BK numunelerinden XRD ve SEM görüntüleri elde edilmiştir. Katkı maddeleri ve kür süreleri baz alınarak elde edilen görüntüler birbiri ve referans numune görüntüleri ile karşılaştırarak değerlendirmeler yapılmıştır. Killerin davranışı her zaman fiziksel ve mekanik özelliklerine göre yorumlanamaz. Kilin mikro yapısı, zemin davranışının ve katkı maddelerinin etkilerinin anlaşılmasında çok önemlidir. SEM, bir numunenin şekli ve boyutu, bileşimi, kristalografisi ve diğer fiziksel ve kimyasal özelliklerinin büyütülmüş görüntülerini sağlar. Bu bağlamda SEM, özellikle mikroyapısal analizler arasında çok değerli bilgiler sağlayabilir. Çünkü kil parçacıkları ve katkı maddelerinin oluşturduğu zemin mikro yapısı SEM ile çok kolay bir şekilde gözlemlenebilmektedir [172]. Bu çalışmada, geliştirilmiş kilin mikroyapısal özelliklerinin SEM analizi ile incelenmesiyle, kil parçacıklarının ve katkı

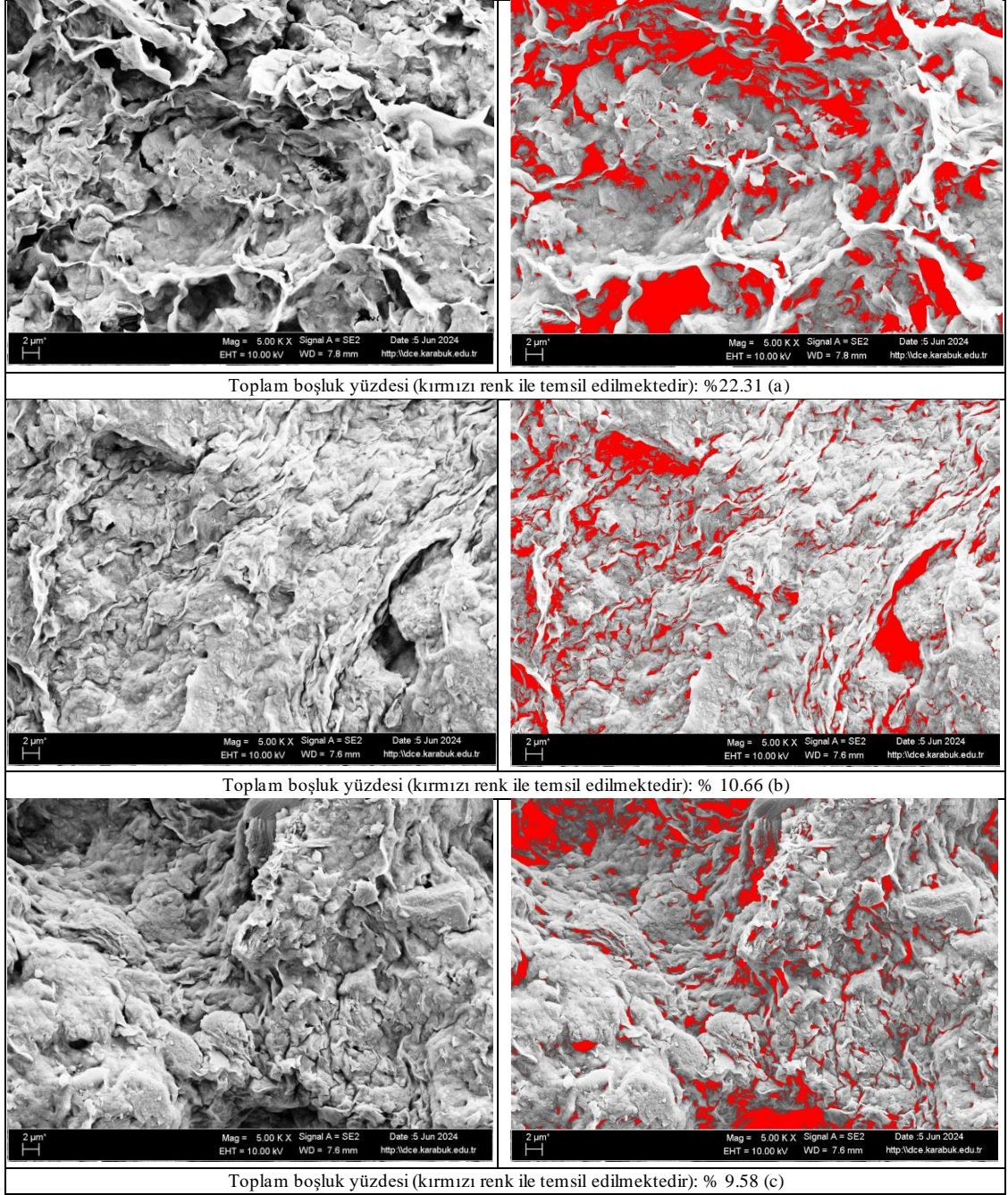
maddelerinin mikroyapıya olan etkisinin, zeminin fiziksel veya mekanik davranışı üzerindeki etkisinin açıklanabileceği düşünülmüştür.

Stabilize edilmemiş ve BAYF külü ile stabilize edilmiş numunelerin mikroyapısal analizi, Şekil 5.15'te gösterildiği gibi SEM testi ve SEMedx yoluyla gerçekleştirilmiştir. Stabilize edilmemiş BK numunesi önemli miktarda boşluk içeren oldukça gözenekli ve yumuşak bir yapı sergilemektedir. Analizler verilerinin değerlendirilmesi bu malzemenin boşluk miktarının 5.0 kX büyütme için %22.31 olduğunu göstermektedir (Şekil 5.15a). Bu nedenle stabilize edilmemiş BK numunelerinin mukavemetinin düşük olması, toprak tanecikleri içindeki mikro boşlukların varlığından ve süreksiz yapıdan kaynaklanan zayıf tanecik bağlantılarına dayandırılmıştır.

Katkı maddeleri ile yapılan stabilizasyon sırasında killi topraklarda katyon değişimi ve flokülasyon - aglomerasyon meydana gelir. Kalsiyum silikat jelleri, kil mineralleri ve katkı maddeleri arasındaki çeşitli reaksiyonlar sonucu oluşur. Bu jeller gözenekleri doldurarak toprak parçacıkları arasında bağlayıcı görevi görerek zeminin mukavemetini artırır [172]. Kürlenmiş ve işlenmiş BK numunesinde, zemin parçacıklarının BAYF külü tarafından üretilen bileşiklere bağlanması nedeniyle topaklaşmış bir yapı tespit edilmiştir (Şekil 5.16). BAYF külü yalnızca yeni kimyasal bileşikler üretmekle kalmamış aynı zamanda zemindeki boşluklar için etkili bir dolgu malzemesi görevi de gördüğü için zemin parçacıkları arasındaki daha güçlü bir bağlantı oluşturarak daha yoğun yapı meydana getirmiştir.



Şekil 5.15. SEM analizleri; BK (a), BK%10 BAYF (b), BK%20 BAYF (c)

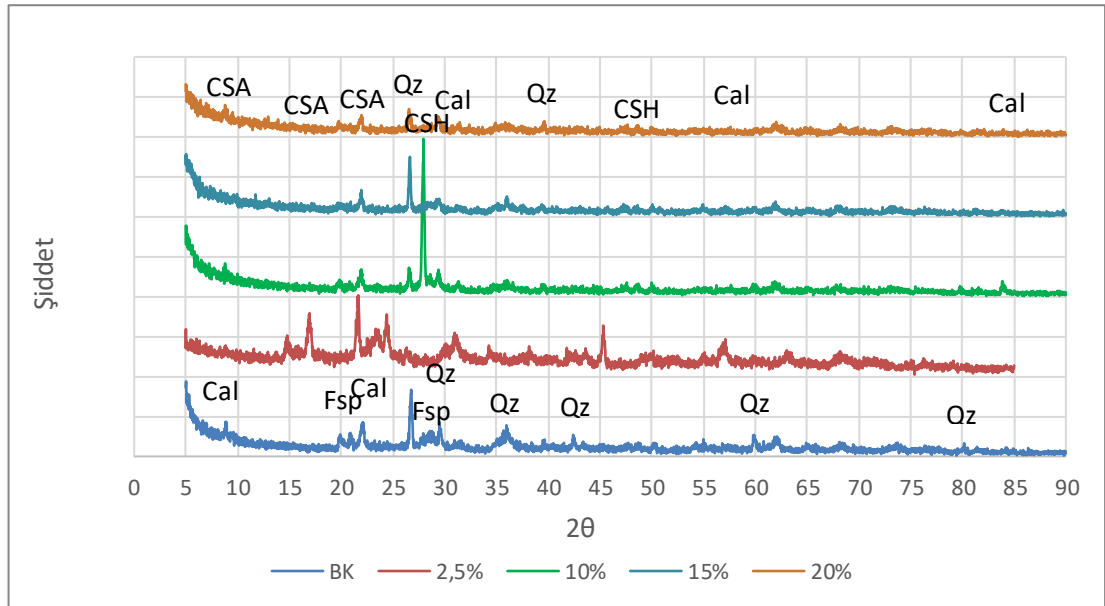


Şekil 5. 16. SEM analizleri boşluk yüzde oranları; BK (a), BK%10 BAYF (b), BK%20 BAYF (c)

Özetle, BAYF külünün zemine dahil edilmesi, aktif iyon konsantrasyonunu ve sistem alkaliliğini etkili bir şekilde arttırmış ve böylece ek hidrasyon ürünleri üreterek BK numunelerinin mekanik özelliklerinin artırılmasına katkıda bulunan puzolanik ve karbonizasyon reaksiyonları gibi önemli reaksiyonları teşvik etmiştir. Bununla birlikte

meydana gelen puzolanik reaksiyonla BAYF külü polimerizasyon ve flokülasyon reaksiyonları yoluyla agregasyon oluşumuna yol açarak zeminin güçlendirilmesine neden olmuştur. SEM BAYF külü katkılı numunelerin SEM görüntülerinin analizi sonrasında 5.0 kX büyütme için BK, BK%10BAYF ve BK%20BAYF numunelerindeki boşluk miktarı yüzdeleri sırasıyla %22.31, 10.66 ve 9.58 olarak tespit edilmiştir (Şekil 5.15). Bu veriler yukarıda ifade edilmeye çalışılan tespitleri destekler niteliktedir.

Örneklerin XRD analiz sonuçları incelendiğinde, stabilizasyon işleminin karışım zeminin minerolojik bileşiminde belirgin bir değişiklik yaratmadığı görülmüş olmakla birlikte Kalsiyum Silika Hidrat (CSH), Kalsiyum Alüminat (CAH) ve Kalsiyum Hidrat (CH) gibi hidratasyon ürünlerinin oluştuğu belirlenmiştir. Hidratasyon süreci sonucu ortaya çıkan CAH, CSH ve CH miktarlarının, zamana ve kullanılan katkı oranına bağlı olarak da ayrıca arttığı gözlemlenmiştir (Şekil 5.17). Bu artış sonucunda CAH, CSH CH jel oluşturmuş ve bu jeller mikro parçacıklar arasındaki boşlukları doldurarak ham numunenin dayanımını arttırmıştır.



Şekil 5.17. XRD sonuçları



## BÖLÜM 6

### SONUÇLAR

Dünyada nüfusun artışı ile beraber endüstriyel ve genel atık oranı gün geçtikçe artmaktadır. Bu durum ise çok farklı alanlarda birçok problemi beraberinde getirmektedir. Bu atık maddelerle yaşanan ekonomik ve çevresel sorunlar atık maddelerin geri dönüşümü gerekliliğini ortaya çıkarmaktadır. Gerek atık maddenin geri dönüşüme kazanılması gerekse de zeminlerin iyileştirilmesi konusunda atık maddeler çalışma konusu olmaktadır. Bu çalışmada da bir atık malzeme olan BAYF külü katkısının zemin iyileştirme potansiyeli tartışmaya açılmıştır. Bu bağlamda elde edilen sonuçları aşağıdaki gibi özetlemek mümkündür.

1. Ham numune, %2.5 BAYF külü katkılı numune ve %5 BAYF külü katkılı numuneye kür süresinin etkisinin olmadığı gözlemlenmiştir. %10 BAYF külü katkılı numune, %15 BAYF külü katkılı numune ve %20 BAYF külü katkılı numunede ise kür süresinin artmasıyla dayanımın arttığı ancak bir noktada pik değere ulaşıncaya kadar dayanımda azalmanın başladığı görülmektedir. En yüksek artışın 28 gün süresi ve %10 karışım oranında meydana geldiği sonucuna varılmaktadır. %10 karışım oranı için 28. günlük kür süresindeki dayanım referans numuneye göre 7.03 kat dayanımı arttırdığı gözlemlenmiştir. Bu veriye göre dayanım için optimum karışım oranı %10 seçilebilir.
2. İçsel sürtünme açısı BAYF külü katkılı karışım için kür süresinin 14. günün karışım oranına bağlı olarak içsel sürtünme açısı eşik değer olduğu değerlendirilmiştir. 14. günden sonra % 10, %15 ve %20 karışım oranlarında içsel sürtünme açısında anlamlı değişiklikler olmaktadır. Karışım oranlarının %2.5 ve %5 olduğunumunelerde tüm kür süresi bağlamında önemli bir artış olmadığı söylenebilir. Ancak % 10 karışım oranından sonra kürlenmeyle birlikte içsel sürtünme açıları artışı gözlenmektedir. Ayrıca bu verilerden

yola çıkılarak kür süreleri ve karışım oranları bağlamında değerlendirme yapıldığında 14, 21 ve 28 günlük kür için %10 karışım oranı optimum miktar olarak değerlendirilebilir.

3. Üç eksenli basınç deneyi sonucu verileri incelendiğine tüm kür sürelerinde %10 BAYF külü katkısı kohezyonda artış oluşturmaktadır. Ayrıca kürlenme ile birlikte numunelerdeki kohezyon değeri artış göstermektedir. Bu da katkı malzemesinin kürlenmeye bağlı olarak malzemede kimyasal ve fizik etki oluşturduğunu göstermektedir. Ayrıca kür süresi dikkate alınarak yapılacak bir değerlendirmede 14 günlük kür %10'dan sonraki karışım oranları kullanılabilir nitelikte olup 28. Gün ve %10 Karışım oranı en iyi değeri etkiyi vermiştir.
4. %20 BAYF külü katkılı numunenin ham numune içsel sürtünme açısına göre yaklaşık 3.15 kat arttığı gözlemlenmiştir. Buna ilaveten kohezyon değerinde %10 BAYF külü katkılı numunenin ham numune kohezyon değerini 5.33 kat arttırdığı gözlemlenmiştir.
5. BK zeminin şişme basıncı 97 kPa olarak bulunmuştur. Şişme basıncı sonuçlarına göre genel olarak referans numuneye göre katkı malzemesinin zeminin şişme basıncını düşürdüğü açıkça ortaya çıkmaktadır. Ancak %2.5 ve %5 BAYF külü katkısının şişme basıncına etki etmediği hatta negatif yönde etki ettiği gözlemlenmiştir.
6. Tüm karışım oranları ve kür süreleri birlikte değerlendirilerek her karışım oranındaki optimum kür süreleri dikkate alınarak sonuçlar incelendiğinde şişme basıncı için optimum karışım oranının %15 BAYF külü oranı ve optimum kür süresinin ise 28 gün olduğu görülmektedir. Ayrıca %15 karışım oranı için 28. günlük kür süresinde ham numuneye göre %94.5 oranında şişme potansiyelini azalttığı gözlemlenmiştir. Bu bağlamda %15 karışım oranı için 28. günlük kür süresi optimum değer olarak kabul edilebilir.
7. Kalsiyum silikat jelleri, kil mineralleri ve katkı maddeleri arasındaki çeşitli reaksiyonlar oluşmuştur. Bu jeller gözenekleri doldurarak toprak parçacıkları

arasında bağlayıcı görevi görerek toprağın mukavemetini arttırmıştır. BAYF külü yalnızca yeni kimyasal bileşikler üretmekle kalmamış aynı zamanda zemindeki boşluklar için etkili bir dolgu malzemesi görevi de gördüğü için zemin parçacıkları arasındaki daha güçlü bir bağlantı oluşturarak daha yoğun yapı meydana getirmiştir. SEM görüntülerinin analizi sonrasında 5.0 kX büyütme için BK, BK%10BAYF ve BK%20BAYF numunelerindeki boşluk miktarı yüzdeleri sırasıyla %22.31, 10.66 ve 9.58 olarak tespit edilmiştir

8. XRD analizi sonuçlarına göre stabilizasyon işleminin karışım zeminin minerolojik bileşiminde belirgin bir değişiklik yaratmadığı görülmüş olmakla birlikte Kalsiyum Silika Hidrat (CSH), Kalsiyum Alüminat (CAH) ve Kalsiyum Hidrat (CH) gibi hidrasyon ürünlerinin oluştuğu belirlenmiştir. Hidrasyon süreci sonucu ortaya çıkan CAH, CSH ve CH miktarlarının, zamana ve kullanılan katkı oranına bağlı olarak da ayrıca artışı gözlemlenmiştir

Bu sonuçlar çerçevesinde, BAYF külü katkılı zemin numunenin dayanımının referans numuneye oranla artış gösterdiği, şişme potansiyelinin ise düşüş gösterdiği gözlemlenmiştir. Genel bir değerlendirme ile BAYF külünün zemin parametrelerini iyileştirmede alternatif bir ürün olduğu söylenebilmekte olup bu materyalin zemin iyileştirmede kullanılması doğaya bırakılan evsel atığın bertarafı için doğa dostu bir yöntem olduğu değerlendirilmiştir

## KAYNAKLAR

1. Kadılar, G., "Ünye İlçesi Vahşi Depolama Alanının Islahı ve Düzenli Depolama Alanının Araştırılması", Yüksek Lisans Tezi, **Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü**, Konya, (2021).
2. Sevinç, F. and Duran, E., "Sürdürülebilir Deniz Turizmi ve Tüketim Paradoksu: Tükenirken Tükenmek", **Tüketici Ve Tüketim Araştırmaları Dergisi**, 10 (2): 173–196 (2018).
3. Bilbil, E. T., "Çöp ve Atık'ın Küresel Dolaşımının Siyaseti: Türkiye'nin Atık İthalatı", (2020).
4. Devlet, H., "Killi Zeminler Üzerinde Atık Lastik ve Gazbeton Etkilerinin Değerlendirilmesi", Yüksek Lisans Tezi, (2020).
5. Ural, N., Kut, Ü., and Gülsevinç, N., "Atık PVC ile Zemin İyileştirme", **EL-Cezeri Fen Ve Mühendislik Dergisi**, 7 (3): 1471–1481 (2020).
6. Şengül, E., "Yüksek Su Muhtevalı Killi Yol Taban Zemininin Kireç Stabilizasyonu ve Hücresel Dolgu Sistemiyle İyileştirilmesi", Yüksek Lisans Tezi, **Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Trabzon, (2010).
7. Habonimana, J., "Burundi Zeminlerinin Kireç ve Talaş Tozuyla İyileştirilmesi", Yüksek Lisans Tezi, **Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Eskişehir, (2018).
8. Şahbaz, İ., "Çimento ve Polipropilen Lif Kullanılarak Killi Zeminlerin İyileştirilmesi", Yüksek Lisans Tezi, **Bursa Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Bursa, (2020).
9. Yıldız, Y., "Killi Bir Zeminin Çimento ile Stabilizasyonu", Yüksek Lisans Tezi, **Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Kocaeli, (2020).
10. İnal, E., "Zeminlerin Taşıma Gücünün Çimento Enjeksiyonu ile İyileştirilmesi", Yüksek Lisans Tezi, **Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Elazığ, (2015).
11. Şekercioğlu, S., "Kum Zeminlerin Geotekstil Kullanılarak Geoteknik Özelliklerinin Araştırılması", Yüksek Lisans Tezi, **Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Balıkesir, (2015).

12. Yılmaz, N. M., "Geotekstil ile Güçlendirilen Kumlu Zemin Üzerine Oturan, Yüzeysel Temel Üzerine Bir Araştırma", Yüksek Lisans Tezi, **Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Kahramanmaraş, (2010).
13. Çelik, Ö., "Geotekstil Donatılı Kum Zeminlerin Taşıma Gücünün Deneysel Olarak İncelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, **Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Elazığ, (2020).
14. Taşçı, E., "Jet Enjeksiyon Yöntemi ile Zemin İyileştirme ve Güncel Yönetmeliklerde İyileştirme Önerileri", Yüksek Lisans Tezi, **İstanbul Gedik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü**, İstanbul, (2021).
15. Ercan, M., "Jet Grout Yöntemi Uygulanılarak Yapılan Bir Zemin İyileştirme Vaka Analizi", Yüksek Lisans Tezi, **Bayburt Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Bayburt, (2017).
16. Çınar, H., "Zemin İyileştirmesinde Jet Grout Yöntemi ve Uygulamaya Yönelik Proje Çalışmaları", Yüksek Lisans Tezi, **Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Kayseri, (2014).
17. İldır, M., "Taş Kolon ile Yapılan Zemin İyileştirmelerin Zemin Büyütme Katsayısına Etkisinin İncelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, **Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü**, Sakarya, (2019).
18. Aras, G., "Vibro Yer Değiştirme Yöntemiyle İmal Edilen Taş Kolonlar ile Zemin İyileştirmesi", Yüksek Lisans Tezi, **İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, İstanbul, (2015).
19. Aydemir, A. A., "Taş Kolonu ile Seçilen Bir Bölgedeki Zemin İyileştirilmesinin Vaka Analizi", Yüksek Lisans Tezi, **Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Kocaeli, (2019).
20. Kahraman, S., "Kalsiyum Karbit Atığı ile Kil Zeminlerin İyileştirilmesi ve Karşılaştırılmalı Analizi", Yüksek Lisans Tezi, **Karabük Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü**, Karabük, (2020).
21. Ünlü Özsoy, M., "Killi Zeminlerde Ortaya Çıkan Kuruma Çatlaklarının Atık Lastik Parçaları Kullanılarak Engellenmesinin Deneysel Olarak İncelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, **Aksaray Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Aksaray, (2016).
22. Sharma, R. K., "Utilization of Fly Ash and Waste Ceramic in Improving Characteristics of Clayey Soil: A Laboratory Study", **Geotechnical And Geological Engineering**, 38 (5): 5327–5340 (2020).
23. Keskin, İ. and Kahraman, S., "Stabilization of swelling soil by lime, fly ash, and calcium carbide residue", **Arabian Journal Of Geosciences**, 15 (10): (2022).

24. Muntohar, A. S., Widiyanti, A., Hartono, E., and Diana, W., "Engineering Properties of Silty Soil Stabilized with Lime and Rice Husk Ash and Reinforced with Waste Plastic Fiber", *Journal Of Materials In Civil Engineering*, 25 (9): 1260–1270 (2013).
25. Okagbue, C. O. and Yakubu, J. A., "Limestone Ash Waste as a Substitute for Lime in Soil Improvement for Engineering Construction", *Springer-Verlag*, (2000).
26. Rahgozar, M. A., Saberian, M., and Li, J., "Soil stabilization with non-conventional eco-friendly agricultural waste materials: An experimental study", *Transportation Geotechnics*, 14: 52–60 (2018).
27. Adeyanju, E., Okeke, C. A., Akinwumi, I., and Busari, A., "Subgrade Stabilization using Rice Husk Ash-based Geopolymer (GRHA) and Cement Kiln Dust (CKD)", *Case Studies In Construction Materials*, 13: (2020).
28. Abdila, S. R., Abdullah, M. M. A. B., Ahmad, R., Burduhos Nergis, D. D., Rahim, S. Z. A., Omar, M. F., Sandu, A. V., Vizureanu, P., and Syafwandi, "Potential of Soil Stabilization Using Ground Granulated Blast Furnace Slag (GGBFS) and Fly Ash via Geopolymerization Method: A Review" *Materials*, 15, 375 (2022).
29. Huang, W., Geng, X., Liu, Z., and Zhou, C., "Molecular dynamics study of polymeric stabilizers as soil improvement materials", *Chemical Physics Letters*, 806: (2022).
30. Hoornweg, D. and Bhada-Tata, P., "What a Waste: A Global Review of Solid Waste Management", *The World Bank*, (2012).
31. Demirel, Z. D., "Tecno-Economic Feasibility Analysis of Raw Waste Incineration and Integrated Waste Processing Scenarios for Municipal Solid Wastes in Istanbul", Master Of Science Thesis, *Yildiz Technical University Graduate School of Science and Engineering*, Istanbul, (2022).
32. Internet: World Bank, "Trends in Solid Waste Management", [https://datatopics.worldbank.org/what-a-waste/trends\\_in\\_solid\\_waste\\_management.html](https://datatopics.worldbank.org/what-a-waste/trends_in_solid_waste_management.html) (2024).
33. Halder, P., Paul, N., Hoque, M. E., M Hoque, A. S., Parvez, M. S., Hafizur Rahman, M., and Ali, M., "Municipal Solid Waste and its Management in Rajshahi City, Bangladesh: A Source of Energy", *International Journal Of Renewable Energy Research*, 4 (1): 168–175 (2014).
34. Internet: Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK), "Toplanan Belediye Atık Miktarı (Ton/Yıl)", <https://biruni.tuik.gov.tr/medas/?kn=119&locale=tr> (2022).
35. Internet: World Bank, "What a Waste 2.0", <https://datatopics.worldbank.org/what-a-waste/index.html> (2024).

36. Locat, J., Tremblay, H., and Leroueil, S., "Mechanical and Hydraulic Behaviour of a Soft Inorganic Clay Treated With Lime", *Can Geotech Journal*, 33: 654–669 (1996).
37. Okça, E. C. , "Use of Class C Fly Ashes for The Stabilization of an Expensive Soil", *Journal Of Geotechnical And Geoenvironmental Engineering*, 568–573 (2001).
38. Chauhan, M. S., Mittal, S., and Mohanty, B., "Performance Evaluation of Silty Sand Subgrade Reinforced with Fly Ash and Fibre", *Geotextiles And Geomembranes*, 26 (5): 429–435 (2008).
39. Liu, J., Shi, B., Jiang, H., Huang, H., Wang, G., and Kamai, T., "Research on The Stabilization Treatment of Clay Slope Topsoil by Organic Polymer Soil Stabilizer", *Engineering Geology*, 117 (1–2): 114–120 (2011).
40. Chore, H. S. and Vaidya, M. K., "Strength Characterization of Fiber Reinforced Cement–Fly Ash Mixes", *International Journal Of Geosynthetics And Ground Engineering*, 1 (4): (2015).
41. Abhishek, Sharma, R. K., and Bhardwaj, A., "Effect of Construction Demolition and Glass Waste on Stabilization of Clayey Soil", (2019).
42. Gong, X., Niu, J., Liang, S., Feng, D., and Luo, Q., "Solidification of Nansha Soft Clay Using Cement-Based Composite Curing Agents", *Advances In Cement Research*, 32 (2): 66–77 (2020).
43. Bie, R., Chen, P., Song, X., and Ji, X., "Characteristics of Municipal Solid Waste Incineration Fly Ash With Cement Solidification Treatment", *Journal Of The Energy Institute*, 89 (4): 704–712 (2016).
44. Gao, X., Wang, W., Ye, T., Wang, F., and Lan, Y., "Utilization of Washed MSWI Fly Ash as Partial Cement Substitute With The Addition of Dithiocarbamic Chelate", *Journal Of Environmental Management*, 88 (2): 293–299 (2008).
45. Baruah, D., Goel, S., Gupta, C., and Sahu, A. K., "Ground Improvement Using Municipal Solid Waste Ash", *Advances In Sustainable Construction Meterials And Geotechnical Engineering*, 271–280 (2020).
46. Show, K.-Y., Tay, J.-H., and Goh, A. T. C., "Reuse of Incinerator Fly Ash in Soft Soil Stabilization", *Journal Of Materials In Civil Engineering*, 335–343 (2003).
47. Poran, C. J., Member, ASCE, and Ahtchi-Ali, F., "Properties of Solid Waste Incinerator Fly Ash", *Journal Of Geotechnical Engineering*, 115: 1118–1133 (1989).

48. Kirk, D. W., Chan, C. C. Y., and Marsh, H., "Chromium Behavior During Thermal Treatment of MSW Fly Ash", (2002).
49. Forteza, R., Far, M., Seguí, C., and Cerdá, V., "Characterization of Bottom Ash in Municipal Solid Waste Incinerators for Its Use in Road Base", *Waste Management*, 24 (9): 899–909 (2004).
50. Mohamedzein, Y. E. A., Al-Aghbari, M. Y., and Taha, R. A., "Stabilization of Desert Sands Using Municipal Solid Waste Incinerator Ash", *Geotechnical And Geological Engineering*, 24 (6): 1767–1780 (2006).
51. Vizcarra, G. O. C., Casagrande, M. D. T., and Motta, L. M. G. da, "Applicability of Municipal Solid Waste Incineration Ash on Base Layers of Pavements", (2014).
52. Liu, Y., Dong, Y., Zhang, Y., Liu, Z., and Yuan, X., "Research on Pavement Performance of Mixed Filler With Alkaline Residue-Expansive Soil", (2018).
53. Liu, D., Gu, Z., Liang, R., Su, J., Ren, D., Chen, B., Huang, C., and Yang, C., "Impacts of Pore-Throat System on Fractal Characterization of Tight Sandstones", *Geofluids*, 2020: (2020).
54. Zhang, D., Liu, W., Hou, H., and He, X., "Strength, Leachability and Microstructure Characterisation of Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>-Activated Ground Granulated Blast-Furnace Slag Solidified MSWI Fly Ash", *Waste Management And Research*, 25 (5): 402–407 (2007).
55. Zhang, B., Zhou, W., Zhao, H., Tian, Z., Li, F., and Wu, Y., "Stabilization/Solidification of Lead in MSWI Fly Ash With Mercapto Functionalized Dendrimer Chelator", *Waste Management*, 50: 105–112 (2016).
56. Mangialardi, T., Paolini, A. E., Polettoni, A., and Sirini, P., "Optimization of the solidification/stabilization process of MSW fly ash in cementitious matrices", (1999).
57. Balasubramaniam, A. S., Lin, D. G., Sharma Archarya, S. S., Kamruzzaman, A. H. M., Uddin, K., and Bergado, D. T., "Behavior of Soft Bangkok Clay Treated With Additives", (2001).
58. Kaniraj, S. R. and Gayathri, V., "Geotechnical Behavior of Fly Ash Mixed With Randomly Oriented Fiber Inclusions", *Geotextiles And Geomembranes*, 21 (3): 123–149 (2003).
59. Singh, D. and Kumar, A., "Geo-Environmental Application of Municipal Solid Waste Incinerator Ash Stabilized With Cement", *Journal Of Rock Mechanics And Geotechnical Engineering*, 9 (2): 370–375 (2017).



60. Namal, H. E., "Yumuşak Killi Zeminlerde Taş Kolonlarda Zemin İyileştirmesinin Laboratuvar Model Deneyleriyle Araştırılması", Yüksek Lisans Tezi, *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, (2011).
61. Akkaya, G., "Islak Derin Zemin Karıştırma Yöntemi İle Zemin İyileştirmesi İncelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, (2018).
62. Erbeyoğlu, E., "Derin Zemin Karıştırma Yöntemi İle İyileştirme Yapılan Zeminlerde Taşıma Gücü Dağılımının Belirlenmesi", Yüksek Lisans Tezi, *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Isparta, (2019).
63. Gül, S., "Zemin İyileştirmesinde Kullanılan Yöntemlerden Biri Olan Jet Grout Yöntemine İlişkin Bir Uygulama", Yüksek Lisans Tezi, *Onduluz Mayıs Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Samsun, (2015).
64. Arslan, S., "Kil İçeriğinin Zemin-Geotekstil Arayüzündeki Kayma Parametrelerine Etkisi", Yüksek Lisans Tezi, *Adıyaman Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Adıyaman, (2017).
65. Dikmen, M., "Kil Zemine Oturan Temellerin Oturma ve Taşıma Gücü Davranışına Geotekstil Takviyesinin Etkisinin Deneysel ve Plaxis 3D Programıyla İncelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Isparta, (2013).
66. Sungur, N., "Jeogrid Donatılı Zeminlerde Taşıma Gücü Yöntemlerinin Uygulamalı Karşılaştırılması", Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, (2015).
67. Altun, R., "Arkasında Geotekstil ile Güçlendirilmiş Donatılı Kum Zemin Bulunan İstinat Duvarı Davranışının Analizi", Yüksek Lisans Tezi, *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kahramanmaraş, (2011).
68. Başpınar, A., "Kireç ile Stabilize Edilmiş Yüksek ve Düşük Plastisiteli Kil Zeminlerin Dayanımı Üzerinde Uzun Süreli Gecikmiş Kompaksiyonun Etkisi", Yüksek Lisans Tezi, *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Eskişehir, (2020).
69. Can, S. A., "Niğde Yerleşim Alanı Killi Zeminlerin Şişme Potansiyelinin Belirlenmesi ve Kireç ile İyileştirilmesi", Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, (2014).
70. Yıldırım, T. O., "Kireç Stabilizasyonu ile Zemin İyileştirilmesi ve Plaxis ile Yorumu", Yüksek Lisans Tezi, *Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kocaeli, (2018).

71. Aygün, T., "Siltli Bir Zeminin Kireç ve Pirinç Kabuğu Külü ile İyileştirilmesi", Yüksek Lisans Tezi, *Kırklareli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kırklareli, (2019).
72. Uysu, A., "Yüksek Plastisiteli Kil Zeminlerde Cam Lifi Katkısının Zemin Mukavemet, Permabilite ve Konsolidasyon Özelliklerine Etkisi", Yüksek Lisans Tezi, *Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü*, Konya, (2020).
73. Doru, M. H., "Çimento Stabilize Zemin İyileştirmelerinde Uçucu Kül Kullanımı", Yüksek Lisans Tezi, *Harran Üniversitesi Fen Bilimler Enstitüsü*, Şanlıurfa, (2014).
74. Şentürk, İ., "Zemin İyileştirilmesinde Cürufaların Kullanılabilirliği ve Performansının Karşılaştırılmalı Analizi", Yüksek Lisans Tezi, *Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Karabük, (2019).
75. Barişoğlu, E. N., "Re-Use of Waste Materials to Improve Mechanical properties of Soft Soil", Master Thesis, *Eskişehir Technical University Institute of Graduate Programs*, Eskişehir, (2019).
76. Öztürk, A. T., "Atık Karbon Kaarasının Yüksek Plastisiteli Kil Zeminin Bazı Geoteknik Özelliklerine Etkisi", Yüksek Lisans Tezi, *Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Erzurum, (2019).
77. Mahmoudi Moghaddam, M. K., "Elektrik Ark Fırını (EAF) Cürufu Katkısının Zeminlerin Mühendislik Özellikleri Üzerine Etkisi", Yüksek Lisans Tezi, *Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İzmir, (2011).
78. Yavaşcan, S., "İnce Daneli Zeminlerin Endüstriyel Atık Maddeleri ile İyileştirme Potansiyelinin Araştırılması", Yüksek Lisans Tezi, *Niğde Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Niğde, (2010).
79. Bilgiçli, M. T., "Kentsel Dönüşüm Atıkları ile İyileştirilmiş Zeminlerin Flac 2D ile Analizi", Yüksek Lisans Tezi, *Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü*, Sakarya, (2019).
80. Kalem, Z., "Kentsel Dönüşümdeki İnşaat ve Yıkıntı Atıklarının Killi Zeminlerde İyileştirmeye Etkilerinin Araştırılması", Yüksek Lisans Tezi, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Sakarya, (2015).
81. Balatan, F., "Kurşun-Çinko Maden Atığının Zemin Stabilizasyonunda Değerlendirilmesi", Yüksek Lisans Tezi, *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, (2019).

82. Yorulmaz, A., "Mermer Toz Atıkları ile Stabilize Edilmiş Kil Zemin Mukavemetinin, Donma-Çözülme Etkisi ve Zamana Bağlı Olarak Değişiminin CBR (California Taşıma Oranı) Deneyleri ile Değerlendirilmesi", Yüksek Lisans Tezi, *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Niğde, (2018).
83. Kaçmaz, U. D., "Mermer Tozu ve Uçucu Külün Zemin İyileştirmesinde Kullanımı", Yüksek Lisans Tezi, *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Afyon, (2019).
84. Gücek, S., "Mermer Tozu ve Uçucu Külün Kil Zeminlerin İyileştirilmesinde Kullanımı", Yüksek Lisans Tezi, *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Afyon, (2011).
85. Muratoğlu, İ., "Atık Mermer Tozu Katkılı Killi Zeminlerin Konsolidasyon ve Permeabilite Özelliklerinin Araştırılması", Yüksek Lisans Tezi, *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Afyon, (2010).
86. Duman, V., "Midyat Taşı Atıklarının Düşük Plastisiteli Kil Zemin Stabilizasyonunda Kullanılabilirliği", Yüksek Lisans Tezi, *Bayburt Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü*, Bayburt, (2020).
87. Alpyürür, M., "Zemin İyileştirmesinde Öğütülmüş Gazbeton Kullanımı", Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, (2016).
88. Günaydın, M., "İyi Derecelenmiş Zeminlerin Silis Dumanı ve Fosfojips ile Stabilizasyonu", Yüksek Lisans Tezi, *Cumhuriyet Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Sivas, (2011).
89. Taşcı, G., "Problemlili Kil Zeminin Geoteknik Özelliklerine Silis Dumanı ve Kireç Katkısının Etkisi", Yüksek Lisans Tezi, *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Eskişehir, (2011).
90. Ontürk, K., Firat, S., Vural, I., and Khatib, J. M., "Uçucu Kül ve Mermer Tozu Kullanarak Yol Altyapısının İyileştirilmesi", *Politeknik Dergisi*, 17 (1): 35–42 (2014).
91. Ünver, E., "Problemlili Kil Zeminlerin Uçucu Kül ile İyileştirilmesi", Yüksek Lisans Tezi, *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Eskişehir, (2015).
92. Taş, M., "Uçucu Kül, Bayburt Taşı ve Mermer Tozu Endüstriyel Atıklarının Zemin Stabilizasyonunda Kullanılabilirliğinin Araştırılması", Yüksek Lisans Tezi, *Bayburt Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü*, Bayburt, (2020).
93. Nazaroghlu, M. B., "Zeminlerin Özelliklerini Uçucu Kül ile İyileştirilmesi", Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Aydın Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, (2019).

94. Erbek, M. A., "Sugözü (Yumurtalık) Termik Santrali Uçucu Külünün Zemin Mukavemetine Etkisi", Yüksek Lisans Tezi, *Mustafa Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Hatay, (2010).
95. Bilge, T., "Yüksek Fırın Cürufu Katkısının Kil Zeminlerin Stabilizasyonuna Etkisinin Araştırılması", Yüksek Lisans Tezi, *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Balıkesir, (2011).
96. Çetin, A. Y., "Yüksek Plastisiteli Kil Zeminlerin Alternatif Malzemeler ile Yüzeysel Zemin Stabilizasyonu", Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, (2011).
97. Etim, R. K., Attah, I. C., Eberemu, A. O., and Yohanna, P., "Compaction Behaviour of Periwinkle Shell Ash Treated Lateritic Soil for Use As Road Sub-Base Construction Material", *Journal Of GeoEngineering*, 14 (3): 179–190 (2019).
98. Lin, D. F., Lin, K. L., and Luo, H. L., "A comparison between sludge ash and fly ash on the improvement in soft soil", *Journal Of The Air And Waste Management Association*, 57 (1): 59–64 (2007).
99. Brooks, R. M., "Stabilization With Flyash and Rice Husk Ash", (2009).
100. Singhi, B., Laskar, A. I., and Ahmed, M. A., "Investigation on Soil–Geopolymer with Slag, Fly Ash and Their Blending", *Arabian Journal For Science And Engineering*, 41 (2): 393–400 (2016).
101. Sharma, N. K., Swain, S. K., and Sahoo, U. C., "Stabilization of a Clayey Soil with Fly Ash and Lime: A Micro Level Investigation", *Geotechnical And Geological Engineering*, 30 (5): 1197–1205 (2012).
102. Prabakar, J., Dendorkar, N., and Morchhale, R. K., "Influence of fly ash on strength behavior of typical soils", *Construction And Building Materials*, 18 (4): 263–267 (2004).
103. Saha, S. and Kumar Pal, S., "Influence of Fly Ash on Unconfined Compressive Strength of Soil and Fly Ash Layers Placed Successively", *Ejge*, 18: 1593-1602 (2013).
104. Bose, B., "Geo-Engineering Properties of Expansive Soil Stabilized with Fly Ash", (2012).
105. Pandey, V. C. and Singh, N., "Impact of Fly Ash Incorporation in Soil Systems", *Agriculture, Ecosystems And Environment*, 136 (1–2): 16–27 (2010).
106. Muntohar, A. S., Widiанти, A., Hartono, E., and Diana, W., "Engineering Properties of Silty Soil Stabilized with Lime and Rice Husk Ash and Reinforced with Waste Plastic Fiber", *Journal Of Materials In Civil Engineering*, 25 (9): 1260–1270 (2013).

107. Mochizuki, Y., "Study on Subjects and Applicability for Mud Improvement Due to Mixing With Paper Sludge Ash", *Japanese Geotechnical Society Special Publication*, 4 (5): 105–108 (2016).
108. Mir, B. A. and Sridharan, A., "Physical and Compaction Behaviour of Clay Soil-Fly Ash Mixtures", *Geotechnical And Geological Engineering*, 31 (4): 1059–1072 (2013).
109. Liu, Y., Su, Y., Namdar, A., Zhou, G., She, Y., and Yang, Q., "Utilization of Cementitious Material From Residual Rice Husk Ash and Lime in Stabilization of Expansive Soil", *Advances In Civil Engineering*, 2019: (2019).
110. Li, M., Fang, C., Kawasaki, S., and Achal, V., "Fly Ash Incorporated With Biocement to Improve Strength of Expansive Soil", *Scientific Reports*, 8 (1): (2018).
111. Shrivastava, D., Singhai, A. K., and Yadav, R. K., "Effect of Lime and Rice Husk Ash on Engineering Properties of Black Cotton Soil", *Int. J. Engg. Res. & Sci. & Tech*, 3 (2): (2014).
112. Kate, J. M., "Strength and Volume change Behavior of Expansive soils treated with Fly Ash", (2005).
113. Yousif Fattah, M. and Al-Soudany, K. Y., "Improvement of Clayey Soil Characteristics Using Rice Husk Ash", (2011).
114. Sani, J. E., Yohanna, P., and Chukwujama, I. A., "Effect of Rice Husk Ash Admixed With Treated Sisal Fibre on Properties of Lateritic Soil as a Road Construction Material", *Journal Of King Saud University - Engineering Sciences*, 32 (1): 11–18 (2020).
115. Arulrajah, A., Yaghoubi, M., Disfani, M. M., Horpibulsuk, S., Bo, M. W., and Leong, M., "Evaluation of Fly Ash- and Slag-Based Geopolymers for the Improvement of a Soft Marine Clay by Deep Soil Mixing", *Soils And Foundations*, 58 (6): 1358–1370 (2018).
116. Jafer, H. M., Atherton, W., and Ruddock, F., "Soft Soil Stabilisation Using High Calcium Waste Material Fly Ash", (2015).
117. Ahmad, S., "Influence of the Rice Husk Ash and Lime on Engineering Properties of Clayey Sub-Grade", (2000).
118. Horpibulsuk, S., Phetchuay, C., and Chinkulkijniwat, A., "Soil Stabilization by Calcium Carbide Residue and Fly Ash", *Journal Of Materials In Civil Engineering*, 24 (2): 184–193 (2012).

119. Ikeagwuani, C. C., "Comparative Assessment of the Stabilization of Lime-Stabilized Lateritic Soil as Subbase Material Using Coconut Shell Ash and Coconut Husk Ash", *Geotechnical And Geological Engineering*, 37 (4): 3065–3076 (2019).
120. Ali, R., Khan, H., and Shah, A. A., "Expansive Soil Stabilization Using Marble Dust and Bagasse Ash", *Article In International Journal Of Science And Research*, (2014).
121. Consoli, N. C., Prietto, P. D. M., Carraro, J. A. H., and Heineck, K. S., "Behavior of Compacted Soil-Flay Ash-Carbide Lime Mixtures", (2012).
122. Mavroulidou, M., Zinmatis, A., Gray, C., Ebad, Z., Rosario, D., and Kanak, S., "Alternative Calcium-Based Chemical Stabilisers for Ground Improvement: Paper Sludge Ash Treatment of London Clay", Rhodes/Greece, (2017).
123. Oriola, F. and Moses, G., "Groundnut Shell Ash Stabilization of Black Cotton Soil", *Ejge*, 15: 415–428 (2010).
124. Ali, F. H., Adnan, A., and Choy, C. K., "Geotechnical properties of a chemically stabilized soil from Malaysia with rice husk ash as an additive", *Geotechnical And Geological Engineering*, 10: 117–134 (1992).
125. Mavroulidou, M., "Use of Waste Paper Sludge Ash as a Calcium-Based Stabiliser for Clay Soils", *Waste Management And Research*, 36 (11): 1066–1072 (2018).
126. Muntohar, A. S., "Influence of Plastic Waste Fibers on the Strength of Lime-Rice Husk Ash Stabilized Clay Soil", *Civil Engineering Dimension*, 11 (1): 32–40 (2009).
127. Setyo Muntohar, A., "Utilization of Uncontrolled Burnt Rice Husk Ash in Soil Improvement", *Dimensi Teknik Sipil*, 4 (2): 100–105 (2002).
128. Mochizuki, Y., Yoshino, H., Saito, E., and Ogata, T., "Effects of Soil Improvement Due to Mixing With Paper Sludge Ash", (2003).
129. Liu, Y., Chang, C. W., Namdar, A., She, Y., Lin, C. H., Yuan, X., and Yang, Q., "Stabilization of Expansive Soil Using Cementing Material From Rice Husk Ash and Calcium Carbide Residue", *Construction And Building Materials*, 221: 1–11 (2019).
130. Kampala, A. and Horpibulsuk, S., "Engineering Properties of Silty Clay Stabilized with Calcium Carbide Residue", *Journal Of Materials In Civil Engineering*, 25 (5): 632–644 (2013).
131. Horpibulsuk, S., Phetchuay, C., Chinkulkijniwat, A., and Cholaphatsorn, A., "Strength development in silty clay stabilized with calcium carbide residue and fly ash", *Soils And Foundations*, 53 (4): 477–486 (2013).

132. Zhang, Y., Johnson, A. E., and White, D. J., "Freeze-thaw performance of cement and fly ash stabilized loess", *Transportation Geotechnics*, 21: (2019).
133. Zhou, S. Q., Zhou, D. W., Zhang, Y. F., and Wang, W. J., "Study on Physical-Mechanical Properties and Microstructure of Expansive Soil Stabilized with Fly Ash and Lime", *Advances In Civil Engineering*, 2019: (2019).
134. Okagbue, C. O. and Onyeobi, T. U. S., "Potential of marble dust to stabilise red tropical soils for road construction", (1999).
135. Zorluer, I. and Usta, M., "Zeminlerin Atık Mermer Tozu İle İyileştirilmesi", Türkiye IV Mermer Sempozyumu (MERSEM 2003) Bildiriler Kitabı, 305–311 (2003).
136. Taşpolat, L. T., Zorluer, İ., and Koyuncu, H., "Atık Mermer Tozunun Geçirimsiz Kil Tabakalarda Donma-Çözünmeye Etkisi", *Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 11-16 (2006).
137. Song, M., Lan, T., Meng, Y., Ju, T., Chen, Z., Shen, P., Du, Y., Deng, Y., Han, S., and Jiang, J., "Effect of microbially induced calcium carbonate precipitation treatment on the solidification and stabilization of municipal solid waste incineration fly ash (MSWI FA) - Based materials incorporated with metakaolin", *Chemosphere*, 308: (2022).
138. Liang, S., Chen, J., Guo, M., Feng, D., Liu, L., and Qi, T., "Utilization of Pretreated Municipal Solid Waste Incineration Fly Ash for Cement-Stabilized Soil", *Waste Management*, 105: 425–432 (2020).
139. Wilson, D. C. and Velis, C. A., "Waste Management - Still a Global Challenge in The 21st Century: An Evidence-Based Call for Action", *Waste Management And Research*, 33 (12): 1049–1051 (2015).
140. Özyayın, K., "Zemin Mekaniği", *Birsen*, İstanbul, 240–241 (2016).
141. Kılıç, H. O., "Derin Karıştırma Yöntemi Tasarım ve Uygulaması", Yüksek Lisans Tezi, *Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Eskişehir, (2013).
142. Emir, A. S., "Donatılı Zemin İstinat Duvarlarının Statik ve Dinamik Yüklere Göre Tasarımı", Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, (2005).
143. Toprak, B., "Zemin İyileştirme Yöntemleri ve Yeraltı Su Seviyesinin Düşürülmesinde Well-Point Metodunun Kırıkkale İlinde Uygulanabilirliğinin Değerlendirilmesi", Yüksek Lisans Tezi, *Kırıkkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kırıkkale, (2005).
144. Semiz, E., "Metro İnşasında Kullanılan Zemin İyileştirme Çalışmalarının Değerlendirilmesi", Yüksek Lisans Tezi, *Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İzmir, (2009).

145. Selçukhan, O. and Ekinci, A., "Zemin İyileştirme Yöntemleri ve Yaygın Kullanımına Bağlı Değerlendirilmesi", *European Journal Of Science And Technology*, (2021).
146. Fırat, A. T., "Jet Grouting Yöntemi İle Temel Takviyesi", Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, (2001).
147. Court, W. A. , M. J. K., "Soil Improvement by Blasting: Part II", *Journal Of Explosive Engineering* , 12 (3): 34–41 (1994).
148. Osmanoğlu, D., "Tünellerde Zemin İyileştirilmesi ve Stabilitenin Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Plaxis Programında Analiz Eedilmesi", Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, (2007).
149. Demiröz, A. and Karaduman, M., "Zemin İyileştirme Metotları", *Journal Of Technical-Online*, 8: (2009).
150. Osmanoğlu, U., "Yumuşak ve Gevşek Zeminlerin İyileştirilmesi: Yüksek Basınçlı Enjeksiyon Kolonları ve Taş Kolonlar", Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, (1999).
151. Kurt, E., "Darbeli Kırmataş Kolon ve Taş Kolon Elemanlarına Ait Yükleme Testlerinin Sayısal Analizi ve Sonuçlarının Karşılaştırılması", Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, (2011).
152. Demir, H., "Taş Kolon ve Geopier Uygulaması ile Zemin İyileştirmesi", Yüksek Lisans Tezi, *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, (2007).
153. Ayan, E., "Derin Zemin İyileştirme Yöntemleri ve Uygulamadan Örnekler", Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, (2009).
154. Uzuner, B. A., "Temel Zemin Mekaniği", *Derya Kitabevi*, Trabzon, (2005).
155. Gökalp, A., "Geoteknik Bilgisi", *Karadeniz Teknik Üniversitesi*, Trabzon, (1982).
156. Hu, R. L., Yue, ; Z Q, Tham, ; L G, and Wang, L. C., "Digital Image Analysis of Dynamic Compaction Effects on Clay Fills", *Journal Of Geotechnical And Geoenvironmental Engineering*, (2005).
157. Durgunoğlu, H. T., Varaksın, S., Karadayılar, T., Nasöz, E., and Briet, S., "Ağır Dinamik Kompaksiyon-Yüksek Enerji Kolonları ile Zemin İslahına Ait Bir Vaka Analizi", (2002).
158. Özalp, A., "Samsun Liman Sahasında Dinamik Konsolidasyon Uygulaması", (1985).



159. Anderson, L. R., Miura, N., Balasubramaniam, A. S., and Bergado, D. T., "Soft Ground Improvement in Lowland and Other Environment", *ASCE Press*, New York, (1996).
160. Cömert, A. T., "Uçucu Küllerin Zemin Stabilizasyonuna Etkileri", Yüksek Lisans Tezi, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Sakarya, (2005).
161. Öntürk, K., "Zemin İyileştirmesinde Polisaj, Kireç ve Uçucu Külün Kullanımı", Yüksek Lisans Tezi, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Sakarya, (2011).
162. Kılıç, G., "Çimento ile Zemin Stabilizasyonu", Yüksek Lisans Tezi, *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, (2008).
163. Alkaya, D., "Uçucu Küllerin Zemin İyileştirmesinde Kullanılmasında İncelenmesi", *Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 5 (1): 61–72 (2009).
164. Çokça, E., İpek, T. K., and Çimento, C., "F Sınıfı Uçucu Kül Katkısının Şişen Bir Zeminin Şişme Basıncına Etkisi", (1998).
165. Ayhan, A., "Biyopolimer Katkıları ile Zeminlerin Mühendislik Özelliklerinin İyileştirilmesi", Yüksek Lisans Tezi, *Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Manisa, (2011).
166. Hancıoğlu, Ç., "Kaolin ve Bentonit Türü Killerde Bulunan Silikatların Belirlenmesi", Yüksek Lisans Tezi, *Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, (2015).
167. Güven, O., "Farklı Bentonit Tipleri ile Stiren Bütil Akrlat Esash Nanokompozitlerin Üretimi ve Karakterizasyonu", Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, (2010).
168. Karaca, K., "Kimyasal Stabilizasyon Tekniklerinin Bentonit Üzerindeki Etkilerinin İncelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, *Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kocaeli, (2018).
169. Atayşen, E. Ö., "Gerilme ve Islanma Koşullarının Çeşitli Zeminlerin Hafızasında Saklanabilirliği", Yüksek Lisans Tezi, *Karabük Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü*, Karabük, (2020).
170. ASTM, D. "4546-96." Standard test methods for one-dimensional swell or collapse of soils", *ASTM*, (2000).
171. Necim, A., "Experimental Investigation of Thermal Effecton Geotechnical Properties of Soil; Casse of Bentonite Sand Mixed Soil", Master Thesis, *Institute of Graduate Programs*, Karabuk, (2022).

172. Ural, N., "The significance of scanning electron microscopy (SEM) analysis on the microstructure of improved clay: An overview", *Open Geosciences*, 13 (1): 197–218 (2021).

## ÖZGEÇMİŞ

Nurullah TATAR, ilk ve orta öğrenimini Malatya'da tamamladıktan sonra Malatya Battalgazi Farabi Anadolu İmam Hatip Lisesinden mezun oldu. 2017 yılında Karabük Üniversitesi Ulaştırma Mühendisliği bölümüne başladı. 2018 yılında Karabük Üniversitesi İnşaat Mühendisliği bölümüne yatay geçiş yaptı. 2021 yılında bu bölümden mezun olduktan sonra aynı yıl Karabük Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Fakültesi İnşaat Mühendisliği Geoteknik Anabilim Dalında yüksek lisansa başladı. Yüksek lisans eğitimine devam ederken çeşitli firmalarda ve kurumlarda inşaat mühendisliği görevini icra etti. Halen Karabük Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans programına devam etmektedir.