



**DÜŞÜK PLASTİSİTELİ KİL ZEMİNİN KİREÇLE
STABİLİZASYONUNDA YEŞİL BAYBURT TAŞI DANE
BOYUTUNUN DAYANIMA ETKİSİ**

Elmas Fulya TÜMER

**Yüksek Lisans Tezi
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Dr. Öğr. Üyesi Fatih YILMAZ
2022
(Her Hakkı Saklıdır)**

T.C.
BAYBURT ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**DÜŞÜK PLASTİSİTELİ KİL ZEMİNİN KİREÇLE STABİLİZASYONUNDA YEŞİL
BAYBURT TAŞI DANE BOYUTUNUN DAYANIMA ETKİSİ**

(Effect of Green Bayburt Stone Grain Size on Strength in Stabilization of Low Plasticity
Clayey Soil with Lime)

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Elmas Fulya TÜMER

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Fatih YILMAZ

Bayburt

Ocak, 2022

KABUL VE ONAY TUTANAĞI

Dr. Öğr. Üyesi Fatih YILMAZ danışmanlığında, 182004016 numaralı Elmas Fulya TÜMER tarafından hazırlanan “Düşük Plastisiteli Kil Zeminin Kireçle Stabilizasyonunda Yeşil Bayburt Taşı Dane Boyutunun Dayanıma Etkisi” adlı bu çalışma 19.01.2022 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Programında Yüksek Lisans Programında Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan : Prof. Dr. Erol ŞADOĞLU

İmza:

Jüri Üyesi : Dr. Öğr. Üyesi H. Alper KAMILOĞLU

İmza:

Jüri Üyesi : Dr. Öğr. Üyesi Fatih YILMAZ

İmza:

Bu tezin Bayburt Üniversitesi Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği’nin ilgili maddelerinde belirtilen şartları yerine getirdiğini onaylarım.

...../...../.....

Doç. Dr. Fatih GÜRBÜZ

Enstitü Müdürü

ETİK VE BİLDİRİM SAYFASI

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Düşük Plastisiteli Kil Zeminin Kireçle Stabilizasyonunda Yeşil Bayburt Taşı Dane Boyutunun Dayanıma Etkisi” başlıklı çalışmanın tarafımdan bilimsel etik ilkelere uyularak yazıldığını ve yararlandığım eserleri kaynakçada gösterdiğimi beyan ederim.

... /.../2022

Elmas Fulya TÜMER



TEŞEKKÜR

Kireçle kil stabilizasyonunda yeşil Bayburt taşlarının dane boyutunun dayanıma etkisinin araştırıldığı bu çalışma, Bayburt Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda hazırlanmıştır.

Tez çalışmam boyunca çalışmamı tamamlamamda bilgilerini esirgemeyen değerli hocam ve tez danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Fatih YILMAZ'a teşekkürlerimi sunarım. Çalışmalarımındaki katkıları için Sayın Doç. Dr. Semet ÇELİK, Öğr. Görevlisi Adem KARA, Dr. Süleyman TEKMEK, Dr. Öğr. Üyesi Hakan Alper KAMILOĞLU'na teşekkürü bir borç bilirim.

Aynı yollarda yürüdüğümüz Bayburt Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği İl Müdürlüğü Proje ve Yapım Şubesindeki değerli meslektaşlarıma ve arkadaşlarıma her türlü yardımlarından ötürü teşekkür ederim.

Eğitim hayatım boyunca beni yüreklendiren ve desteklerini hissettiğim İngilizce öğretmeni Firdevs YILMAZ SEVİL'e, sıra arkadaşım ve meslektaşım İnşaat Mühendisi Nurcan KARA'ya, yüksek lisansın bana kazandırdığı yol arkadaşım Yüksek İnşaat Mühendisi Narin AYENGİN'e özel olarak teşekkür ederim.

Tez çalışmamın her aşamasında gerek laboratuvar gerekse yazma aşamasında sabırla her anımda yanımda olan eşim Ali TÜMER'e minnetlerimi sunarım. Bu yolda ilerlememde her türlü maddi ve manevi destekleri olan saygıdeğer YILMAZ ve TOPER Ailelerine, hayatımın her zamanında desteğini hissettiğim canım anneme ve babama teşekkür eder, saygılarımı sunarım.

Hayatımı adadığım canım kızlarım Güneş Berra & Beril Ada'ya ithafen...

ÖZ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

DÜŞÜK PLASTİSİTELİ KİL ZEMİNİN KİREÇLE STABİLİZASYONUNDA YEŞİL BAYBURT TAŞI DANE BOYUTUNUN DAYANIMA ETKİSİ

Elmas Fulya TÜMER

Ocak 2022, 58 Sayfa

Bu çalışmada, yeşil Bayburt taşı (YBT) atığı ve kireç kullanılarak düşük plastisiteli kil bir zeminin stabilize edilmesi amaçlanmıştır. Birincil bağlayıcı olarak kullanılan kireç %6 oranında, puzolanik katkı olarak kullanılan YBT atığı ise sırasıyla %5, %10, %15, %20 oranlarında iki farklı incelikte doğal zemine eklenmiştir. Hazırlanan numunelere kıvam, elek analizi, kompaksiyon ve serbest basınç deneyleri yapılmıştır. Ayrıca numunelerin mikro yapısı taramalı elektron mikroskobu (SEM), X-ışını kırınım yöntemi (XRD), Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi (FT-IR) analizleri ile incelenmiştir. Çalışma kapsamında yapılan deneyler sonucunda, YBT atıklarının öğütülerek düşük plastisiteli kil zemin stabilizasyonunda kullanılmasının kıvam limitleri ve kompaksiyon parametreleri üzerinde kayda değer bir etkisinin olmadığı, serbest basınç dayanımını ise arttırdığı tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Zemin stabilizasyonu, kireç, Bayburt taşı, incelik, serbest basınç dayanımı.

ABSTRACT

MASTER THESIS

EFFECT OF GREEN BAYBURT STONE GRAIN SIZE ON STRENGTH IN STABILIZATION OF LOW PLASTICITY CLAYEY SOIL WITH LIME

Elmas Fulya TÜMER

January 2022, 58 Pages

In this study, it was aimed to stabilize a low plasticity clayey soil by using green Bayburt stone (YBT) waste and lime. Lime used as the primary binder was added at the rate of 6%, and YBT waste used as a pozzolanic additive was added to the natural soil in two different finenesses, respectively, at the rates of 5%, 10%, 15% and 20%. Consistency, sieve analysis, compaction and unconfined compressive strength tests were performed on the prepared specimens. In addition, the microstructure of the specimens was investigated by scanning electron microscope (SEM), X-ray diffraction method (XRD), Fourier transform infrared spectroscopy (FT-IR) analysis. As a result of the experiments carried out within the scope of the study, it was determined that the use of YBT wastes in low plasticity clayey soil stabilization by grinding does not have a significant effect on the consistency limits and compaction parameters, but increases the unconfined compressive strength.

Keywords: Soil stabilization, lime, Bayburt stone, fineness, unconfined compressive strength.

İÇİNDEKİLER

ETİK VE BİLDİRİM SAYFASI	i
TEŞEKKÜR	ii
ÖZ	iii
ABSTRACT	iv
İÇİNDEKİLER	v
TABLOLAR DİZİNİ	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ	viii
KISALTMALAR VE SİMGELER DİZİNİ	x

BİRİNCİ BÖLÜM

Giriş	1
Amaçlar	2
Literatür İncelemesi	2

İKİNCİ BÖLÜM

Kaynak Özetleri	9
Katkılı Stabilizasyon	9
Kireç ile Zemin Stabilizasyonu	10
Çimento ile Zemin Stabilizasyonu	11
Bitüm ile Zemin Stabilizasyonu	12
Uçucu Kül ve Fırın Curufu ile Zemin Stabilizasyonu	12

ÜÇÜNCÜ BÖLÜM

Materyal ve Yöntem	14
Materyal	14
Yöntemler	20
Deneylerde referans alınan ASTM standartlar.	20
Öğütme işlemleri.	20
Kıvam limitleri deneyleri	22
Kompaksiyon	22
Serbest basınç deneyi.	23
Taramalı elektron mikroskobu (SEM)	25
X- ışını kırınım cihazı	26
Fourier dönüşümü kızılötesi spektroskopisi (FT-IR)	27

DÖRDÜNCÜ BÖLÜM

Araştırma Bulguları	28
Kıvam Limitleri	28
Kompaksiyon Parametreleri	32
Serbest Basınç Dayanımları	33
Taramalı Elektron Mikroskobu Deneyi	39
X- Işını Kırınım cihazı (XRD)	44
Fourier Dönüşümü Kızılötesi Spektroskopi (FT-IR)	47

BEŞİNCİ BÖLÜM

Sonuç ve Öneriler	53
Kaynakça	55
Özgeçmiş	58

TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 1. <i>Kimyasal İyileştirmede İstenilen Katkı Malzemesi Seçimi (U.S. Army Corps. of Eng., 2003)</i>	10
Tablo 2 . <i>Farklı Zemin Cinslerine Göre Yaklaşık Kireç Miktarı (Nelson, & Miller, 1992)</i>	11
Tablo 3. <i>Tavsiye Edilen Kireç Karışım Oranları (Ingles, & Metcalf, 1972)</i>	11
Tablo 4. <i>Farklı Zemin Cinslerine Göre Çimento Oranları (Tunç, 2002)</i>	12
Tablo 5. <i>Kireç ile Çimento İyileştirmesinde Durabilite Değerleri (Tunç, 2002)</i>	12
Tablo 6. <i>Deney Numuneleriyle İlgili Notasyon Bilgileri</i>	15
Tablo 7. <i>Kullanılan Kirecin Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri</i>	15
Tablo 8. <i>BYT Kimyasal ve Fiziksel Özellikleri (Yılmaz, 2015)</i>	17
Tablo 9. <i>Deneylerle İlgili ASTM Standartları</i>	20
Tablo 10. <i>Kıvam Deneyleri Sonuçları</i>	29
Tablo 11. <i>Hazırlanan numunelerin kompaksiyon parametreleri</i>	32
Tablo 12. <i>ZKY1 Karışımlarına Ait Serbest Basınç Dayanımı DeneySonuçları</i>	34
Tablo 13. <i>Z Numunesine Ait 7 ve 28 Günlük Analiz Sonuçları</i>	45
Tablo 14. <i>ZK Numunesine Ait 7 ve 28 Günlük Analiz Sonuçları</i>	45
Tablo 15. <i>ZKY1/10 Numunesine Ait 7 ve 28 Günlük Analiz Sonuçları</i>	45
Tablo 16. <i>ZKY2/10 Numunesine Ait 7 ve 28 Günlük Analiz Sonuçları</i>	46

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. Bayburt ili Petekkaya Köyü Camii’ndeki Yeşil Bayburt taşı kaplaması.....	17
Şekil 2. Yeşil Bayburt Taşı atıklarının granülometri eğrisi	18
Şekil 3. YBT atıklarının SEM görüntüsü (Yılmaz, 2015)	19
Şekil 4. YBT atıklarının XRD analizi (Yılmaz, 2015)	19
Şekil 5. Darbeli kırıcı.....	21
Şekil 6. Aşınma cihazı	21
Şekil 7. Bilyeli öğütücü	22
Şekil 8. Karışımların hazırlanma aşamaları	24
Şekil 9. Serbest Basınç deneyi için hazırlanan numunelerin küre konulması	24
Şekil 10. Deney aleti ve numuneler	25
Şekil 11. SEM cihazı	26
Şekil 12. Numunelerin iletken tabaka ile kaplanma aşaması.....	26
Şekil 13. XRD cihazı	27
Şekil 14. Fourier dönüşümü kızılötesi spektroskopi cihazı	27
Şekil 15. Koni penetrasyon deney cihazı.....	28
Şekil 16. Numunelere ait likit limit değerleri	30
Şekil 17. Numunelere ait plastik limit değerlerinin karşılaştırılması	30
Şekil 18. Numunelere ait plastisite indisi değerlerinin karşılaştırılması.....	31
Şekil 19. Deneydeki numunelere ait kıvam limitleri grafiği.....	31
Şekil 20. Z, ZK, ZKY1 ve ZKY2 karışımlarına ait optimum su içeriği-maksimum kuru yoğunluk değerleri grafiği	33
Şekil 21. ZKY1 numunelerinin 7 günlük kür sonrası serbest basınç dayanımları.....	36
Şekil 22. ZKY2 numunelerinin 7 günlük kür sonrası serbest basınç dayanımları.....	36
Şekil 23. ZKY1 numunelerinin 28 günlük kür sonrası serbest basınç dayanımları.....	37
Şekil 24. ZKY2 numunelerinin 28 günlük kür sonrası serbest basınç dayanımları.....	37
Şekil 25. ZKY1 numunelerinin 84 günlük kür sonrası serbest basınç dayanımları.....	38
Şekil 26. ZKY2 numunelerinin 84 günlük kür sonrası serbest basınç dayanımları.....	38
Şekil 27. Z, ZK, ZKY1 ve ZKY2 numunelerinin 7, 28 ve 84 günlük serbest basınç dayanımlarının	

karşılaştırılması.	39
Şekil 28. Z numunelerinin 7. gün SEM görüntüleri	40
Şekil 29. Z numunelerinin 28. gün SEM görüntüleri	40
Şekil 30. ZK numunelerinin sırasıyla 7. gün SEM görüntüleri	41
Şekil 31. ZK numunelerinin sırasıyla 28. gün SEM görüntüleri	41
Şekil 32. ZKY1/10 numunelerinin 7. gün SEM görüntüleri.....	42
Şekil 33. ZKY1/10 numunelerinin 28. gün SEM görüntüleri.....	42
Şekil 34. ZKY2/10 numunelerinin 7. gün SEM görüntüleri.....	43
Şekil 35. ZKY2/10 numunelerinin 28. gün SEM görüntüleri.....	43
Şekil 36. Z numunesinin 7 ve 28 günlük XRD analizi	46
Şekil 37. ZK 7. ve 28. gün karşılaştırması.....	46
Şekil 38. ZKY1/10 7. ve 28. gün karşılaştırması.....	47
Şekil 39. ZKY2/10 7 ve 28 gün karşılaştırması.....	47
Şekil 40. Z numunesinin 7. gün FT-IR spektrumu	48
Şekil 41. Z numunesinin 28. gün FT-IR spektrumu	48
Şekil 42. ZK numunesinin 7. gün FT-IR spektrumu	49
Şekil 43. ZK numunesinin 28. gün FT-IR spektrumu	49
Şekil 44. ZKY1/10 numunesinin 7. gün FT-IR spektrumu	50
Şekil 45. ZKY1/10 numunesinin 28. gün FT-IR spektrumu	50
Şekil 46. ZKY2/10 numunesinin 7. gün FT-IR spektrumu	51
Şekil 47. ZKY2/10 numunesinin 28. gün FT-IR spektrumu	51
Şekil 48. Z, ZK, ZKY1/10 ve ZKY2/10 numunelerinin 7 günlük FT-IR Spektrumu	52

KISALTMALAR VE SİMGELER DİZİNİ

Kısıtlamalar

Al K	: Aliminyum Kabuğu
C K	: Karbon Kabuğu
Ca K	: Kalsiyum Kabuğu
O K	: Oksijen Kabuğu
Mg K	: Magnezyum Kabuğu
Al₂O₃	: Alüminyum Oksit
Au	: Altın
BTA	: Bayburt taşı atıkları
BOF	: Çelikhane Cürufu
CaO	: Kalsiyum Oksit
Ca(OH)₂	: Kalsiyum Hidroksit
CBR	: Kaliforniya Taşıma Oranı
CDW	: İnşaat Yıkıntı Atıkları
CFRP	: Karbon Fiber Takviyeli Polimer
CH	: Yüksek Plastisiteli Kil
CL	: Düşük Plastisiteli Kil
Cr₂O₃	: Kromyum Oksit
D₁₀	: Zeminin %10 ‘unun geçtiği elek çapı
D₅₀	: Zeminin %50 ‘sinin geçtiği elek çapı
D₉₀	: Zeminin %90 ‘ının geçtiği elek çapı
Eds	: Enerji Dispersiv Spektrmu
h/d	: Boy Uzunluğu / Çap Oranı
m	:Metre
MgO	:Magnezyum Oksit

mm	: Milimetre
MTA	: Maden Teknik Arama Genel Müdürlüğü
MPa	: Megapaskal (MH/m ²)
pH	: Hidrojen Gücü
$\rho_{k_{max}}$	: Maksimum Kuru Yoğunluk
SiO₂	: Silisyum Dioksit
UU	: Drenajsız Konsolidasyonsuz
USCS	: Birleşik Zemin Sınıflandırma Sistemi
YBT	: Yeşil Bayburt Taşı
Y_k, P_k	: Kuru Yoğunluk
w	: Su Muhtevası
W_{opt}	: Optimum Su Muhtevası
μm	: Mikrometre
0	: Derece

BİRİNCİ BÖLÜM

Giriş

İnşaat Mühendisliği uygulamalarının temelinde yapıların sağlam zemine oturtulması, güvenli, fonksiyonel ve ekonomik yapılar tasarlanması ve inşa etmek en genel kabul olarak benimsenmektedir. Ancak yüzölçümüne kıyasla nüfus yoğunluğunun artması, gereksinimin artması ile imara uygun olmayan alanlara bina, köprü, yol, baraj gibi yapıların inşa edilmesi ile yapıların sağlam zemine oturtulması bazen gerçekleşmemektedir. Bu tür durumlar zemin iyileştirilmesini gündeme getirmektedir.

Yapılar inşa edilirken sağlam zemine oturtulması mümkün olmadığı durumlarda zayıf zeminin geoteknik özellikleri belirlendikten sonra aşağıdaki yöntemler uygulanabilir:

1. Zayıf zeminin ortamdaki kazınarak uzaklaştırılır,
2. Zayıf zemin farklı derin temel çeşitleri kullanılarak geçilir,
3. Taşıma gücü bakımından uygun olmayan zemin kaldırılarak yerine mühendislik özellikleri uygun nitelikli zemin yerleştirilerek (mekanik stabilizasyon) sıkıştırılır,
4. Temeller zayıf zeminin özelliklerine uygun geometri ile ve taşıma kapasitesinde yapılır,
5. Doğal zemin ortamı fiziksel, kimyasal, mekanik yöntemler kullanılarak iyileştirilir.

Stabilizasyon; zeminin kayma direncini ve dayanıklılığını artırma işlemleri yani zeminin mevcut özelliklerini amaca uygun hale getirme şeklinde tanımlanabilir. Bu teknik ile hacimsel stabilite, mukavemet, durabilite, dayanım ve permeabilite parametreleri iyileştirilebilir.

Stabilizasyonla birlikte;

- Temellerin ani ve konsolidasyon oturmaları azaltılır.
- Geçirimlilik kontrol altına alınarak, artırılabilir ya da azaltılabilir.
- Taşıma gücünü artırılabilir.
- Zeminlerin hacim değişimleri, şişme ve büzülme kapasiteleri kontrol altına alınabilir.

- Yamaçların, toprak barajların, yapay veya mühendislik dolguların kayma göçmelerine karşı güvenlik katsayıları arttırılabilir.
- Yeraltı suyunun dren edilmesi kolaylaştırılabilir ve buna bağlı olarak boşluk suyu basıncı azaltılabilir.

Amaçlar

Bu çalışmanın amacı, kireçle birlikte kil zemin stabilizasyonunda kullanılan tüfit taşlar grubunda yer alan Yeşil Bayburt Taşı (YBT) atıklarının, farklı inceliklerde kullanılmasının dayanıma etkisinin araştırılmasıdır. Stabilizasyon çalışması için endüstriyel atık halde bulunan Yeşil Bayburt Taşı iki farklı incelikte kireç ile beraber kullanılmıştır.

Çalışma kapsamında elek analizi, kıvam limitleri, kompaksiyon, serbest basınç, SEM, XRD ve FT-IR deneyleri yapılmıştır. Hazırlanan numunelere 7, 28 ve 84 günlük kür uygulandıktan sonra serbest basınç deneyi yapılarak stabilizasyonda en uygun performansı hangi katkı oranlarının verdiği tespit edilmeye çalışılmıştır.

Literatür İncelemesi

Bell (1996), çalışmasında kireç ilavesiyle kuvars, montmorillonit ve kaolin içerikli sert ve tabakalı killerin plastisite değişimi incelemiştir. Kireç ikamesinin dayanım artışı meydana getirdiği, CBR ve maksimum kuru birim hacim ağırlık değerlerinde azalmalar meydana gelmiş ve kireç ikamesinin dayanım artışı meydana getirdiği sonucuna varılmıştır.

Abd El-Aziz, Abo-Heshema ve El-Shourbagy (2004), %5, %10 ve %15 oranlarında silis dumanı ve %1, %3, %5, %7, %9 ve %11 oranlarında kireç ikamesinin ince daneli zeminlere iyileştirme etkinliğini araştırmışlardır. Çalışma sonucunda CBR değerlerinde artışlar meydana gelirken, bu duruma paralel olarak plastisite indisi ve şişme yüzdesi değerlerinde azalamalar gözlenmiştir.

Kalkan ve Akbulut (2004), %0, %5, %10, %15, %20, %25, %30 ve %50 oranında silis dumanı ile killi zeminlere iyileştirme etkilerini incelemişlerdir. Hazırlanan numunelere basınç dayanımı, permeabilite ve şişme basıncı deneyleri yapılmıştır. Deneylerden elde edilen veriler ışığında, serbest basınç dayanımını artarken, şişme basınçları ve permeabilite değerlerinin düştüğünü ortaya koymuşlardır.

Kumar ve Sharma (2004), çalışmasında %0, %5, %10, %15 ve %20 oranında uçucu kül ilave ederek şişen zeminlere serbest basınç, şişme ve geçirimsizlik deneyleri yapılmıştır. Çalışma sonucunda uçucu kül ikamesinin şişen zemin stabilizasyonunda olumlu sonuçlar verdiği tespit edilmiştir.

Al-Rawas, Taha, Nelson, Al-Shab ve Al-Siyabi (2005), %3, %6, %9, %12 oranlarında ise Sarooj isimli yapay bir puzolan ile %3, %6, %9 oranlarında çimento ve kireç ikamesinin Oman bölgesinden alınan şişen zeminin stabilizasyonu konu edinmişlerdir. Yapılan deney sonuçlarına göre kullanılan katkıları arasından en iyi sonuçları veren katkı kireç olmuştur. Optimum kireç oranı %6 olarak saptanmıştır.

Faluyive ve Amu (2005), %10 oranında kireç ilavesinin Nijerya'nın Ado – Ekiti'de bulunan kırmızı kil zemine eklendiğinde pH değerlerinde değişim tespit edilmiştir. Hazırlanan karışımların asidik değerlerden alkali değerlere geçtiği tespit edilirken, çalışma sonucunda kireç katkısının kimyasal özelliklerinin değiştiği belirlenmiştir.

Huat, Maail ve Mohamed (2005), %10, %20, %25 oranında kireç ve %5, %10, %15 oranında çimento ilave edilerek tropik bataklık zemine geoteknik deneyleri yapılmıştır. Serbest basınç deneyleri sonucunda, çimento ile stabilizasyonun kireç ilavesine göre daha etkin sonuçlar verdiği belirlenmiştir.

Sivapullaiah ve Lakshmikantha (2005), zeminlere %0, %1 kireç katkılı, %20 bentonitli, %80 ve %100 illitli karışımlar üzerine çeşitli deneyler yapmışlardır. Yapılan deneyler sonucunda kireç ilavesi ile serbest basınç dayanımı ve geçirimsizlik değerlerinde artışlar elde edilmiştir.

Edil ve Benson (2006), ince daneli zeminlere %10 ve %18 oranlarında uçucu kül katarak zeminlerin elastisite modüllerindeki ve CBR değerlerindeki değişimleri incelemişlerdir. DeneySEL verilerden inorganik zeminlerin CBR değerlerinde artışlar meydana gelmiştir. %10 oranında organik madde içeren zemin cinsi ile yapılan stabilize çalışmalarında kayda değer bir iyileşme meydana gelmediği tespit edilmiştir.

Buhler ve Cerato (2007), %5, %10, %20, %30, %40, %50 oranlarında uçucu kül ve %5, %10, %20, %25 oranlarında kireç ikamesinin şişme potansiyeli yüksek zeminlere zemin stabilizasyonuna etkileri lineer büzülme deneyi ile incelemişlerdir. Hazırlanan numunelere uygulanan deneylerde, kireç ikamesinin daha olumlu sonuçlar verdiği tespit edilmiştir.

Ghosh ve Subbarao (2007), F tipi uçucu kül, %0.5, %1 oranlarında alçı ve %4, %6, %10 oranlarında kireç ikamesini stabilizasyon çalışmalarında katkı maddesi olarak kullanmışlardır. 7 ve 28 gün kür uygulanan karışım numuneleri üç eksenli basınç deneyleri yapılmıştır. Çalışma sonucunda kayma mukavemeti yüksek olan uçucu kül ilavesi zemin stabilizasyonunda ekonomik katkılar sağlayabileceği ortaya koymuştur.

Kumar, Walia ve Bajaj (2007), Hindistan uçucu külü, kireç ve polyester fiber malzeme ile zemin stabilizasyonunu incelemek amacıyla kompaksiyon, serbest basınç ve kesme kutusu deneyleri yapılmıştır. Kür sürelerinin 7, 14, 28 gün olarak tayin edilen çalışmada, şişen zeminlerin stabilizasyonunda uçucu kül, kireç ve polyester fiber malzeme ikamesinin olumlu sonuçlar verdiği görülmüştür.

Lin, Lin ve Luo (2007), uçucu kül ile %0, %2, %4, %8 ve %16 oranlarında atık çamur küllerinin zemin stabilizasyonunda kullanılabilirliği serbest basınç ve CBR deneyleri ile irdelenmiştir. Yapılan çalışma ışığında atık çamur küllerinin uçucu külün yerine kullanılabileceği dayanım değerlerinden anlaşılmış ve optimum atık çamur oranı %8 olarak tespit edilmiştir.

Yarbaşı, Kalkan ve Akbulut (2007), granüler zeminlerin uçucu kül, silis dumanı ve kırmızı çamur gibi atık malzemeler ile stabilizasyonu sonucu geoteknik özelliklerindeki ve donma-çözünme çevrimi sonucundaki değişimler incelemiştir. Kür süresi 28 gün olarak belirlenmiştir. ASTM C 666 standartlarına göre stabilize edilmiş numunelerin dayanımı, doğal zemine göre artış göstermiştir.

Manasseh ve Olufemi (2008), %0, %2, %4, %6, %8, %10, %12, %14 oranlarında kireç ilavesinin mühendislik özellikleri zayıf bir zemine stabilizasyonu sonucu serbest basınç dayanımı ve CBR değerlerindeki değişimler araştırmışlardır. Optimum kireç oranı %8 olarak bulunmuştur.

Wong, Hashim ve Ali (2008), bataklık bir zeminde Portland çimentosu, yüksek fırın cürufu ve silika kumu ile stabilizasyon çalışmaları gerçekleştirelerdi. Çalışma kapsamında üç farklı kombinasyon da ilk olarak %25 cüruf-%75 çimento, ikinci olarak %75 cüruf-%25 çimento ve son olarak %50 cüruf-%50 çimento zemine katılmıştır. Bu kombinasyonların geçirimsizlik katsayılarını düşürdüğü, kayma direnci ve serbest basınç parametrelerinde ise olumlu sonuçlara ulaşıldığı tespit edilmiştir.

Zha, Liu, Du ve Cui (2008), şişen zeminlere %0-%15 oranlarında uçucu kül, %0-%2 arasında kireç ilave edilerek stabilize edilmepotansiyellerive kullanımını araştırmışlardır. 7 günlük kür süresi sonucunda plastisite indisi, aktivite, serbest şişme ve şişme basıncı değerlerinde kayda değer artışlar olduğuna ulaşmışlardır.

Okafor ve Okonkwo (2009), %5, %7.5, %10, %12.5 oranlarında pirinç kabuğu külü ilave edilerek kırmızı renkli killi zeminin stabilize edilebilirliği incelenmiş, kıvam ve dayanım özellikleri incelenmiştir. Yapılan kompaksiyon ile pirinç kabuğu külü katkısının optimum su içeriği değerlerini, hacimsel stabilite ve dayanımı arttırdığı; maksimum kuru yoğunlukları ve

plastisite deęerlerini dūřūrmūřtır. alıřmalar ıřıęında optimum pirinç kabuęu kūlū oranı %10 olarak bulunmuřtır.

Harichane, Ghrici, Khebizi ve Missoum (2010), USCS sınıflandırma sisteme gōre CH ve CL olarak sınıflandırılan iki zemin tūrūnūn stabilizasyonunda %0-%20 arasında puzolan ve %0-%8 arasında kireç ikamesinin stabilize etkileri araştırılmıştır. 12 ıslanma-kuruma periyoduna direnci incelenmiştir. Deney sonuçları ışığında kireç ve doğal puzolan kombinasyonlarının kullanıldığı iki zemin karşılaştırıldığında CL sınıfı zemine gōre mukavemeti daha yūksek çıkmıştır.

Seco, Ramirez, Miqelez ve Garcia (2011), řiřen bir zemini stabilize edebilmek için pirinç kabuęu kūlū, uçucu kūl, taban kūlū, PC-7 olarak isimlendirilen yan ūrūn, doęal alçıtařı, alūminat filler malzeme katkı maddeleri olarak kullanılmıřtır. Endūstriyel yan ūrūnler ve atık malzemelerin kullanıldıęı bu çalıřmada, 11 farklı kombinasyon oluřturulmuř, 7, 14 ve 28 gūn kūr sūrelerine tabi tutulmuřtur. Serbest řiřme deneyleri ve serbest basınç dayanımı deneyleri sonucu birçok katkı arasında en çok iyileřtirme saęlayan pirinç kabuęu kūlū olmuřtur. Stabilize edilmiř numunelerde doęal numunelere gōre 2-4 kat arası bir iyileřtirme serbest basınç dayanımlarında gōzlenmiřtir.

Zukri (2013), bu çalışmada yumuşak Pekan killerinin optimum kireç oranı Eades-Grim pH testi kullanılarak araştırılmıştır. Killi zeminin stabilize edilebilmesinde Ph seviyesini 12'ye çıkarmak için optimum kireç oranı %4, optimum nem içeriği %13 olarak tespit edilmiştir. Bu alışma ışığında Pekan killerinin ūzellikle yol yapımı için kullanılabileceği sonucuna varılmıştır.

alık ve şadoğlu (2014), %8 kireç ve %0, %10, %20, %30, %40 ve %50 oranlarında perlit katkısinin durabilite tetkiki ve serbest basınç dayanımı incelenmiştir. 12 ıslanma-kuruma çevirimi sonucunda sadece perlit kullanılan numunelerin hacimsel mukavemetini koruyamadığını, kireç ve perlitin birlikte kullanıldı zemin numunelerinde daha başarılı sonuç verdiği anlaşılmıştır. Durabilite açısından sınır değerlere ulaşmak için %30 ve daha fazlası perlitin kullanılması gerektiği bir diğer sonuç olarak tespit edilmiştir.

Yılmaz (2015), doktora çalışmasında Bayburt taşı atıklarının zemin stabilizasyonunda kullanılabirliği araştırılmıştır. Bu kapsamda kireçli ve kireçsiz hazırlanan numunelere doğal malzeme ile %0, %5, %10, %15 ve %20 oranlarında yeşil, sarı, beyaz BT atıkları karıştırılmıştır. Kıvam limitleri, kompaksiyon, serbest basınç deneyi, durabilite tetkikleri, şişme yūzdesi deneylerinin yanı sıra bilgisayarlı tomografi ile numunelerin analizi ve taramalı elektron mikroskobu deneyi yapılmıştır. Deneysel çalışmalardan elde edilen veriler ışığında en yūksek sonuçları durabilite tetkiklerine gōre %10 yeşil BT atığı içeren kireçli karışımlar ile

ulaşılmıştır.

Rikhtehgar (2016) çalışmasında nanoteknolojik malzemelerin ve nanoteknolojik özellikteki polimer katkıların zemin iyileştirmesine etkileri incelenmiştir. Hazırlanan numunelere hidrometre, kıvam limitleri, serbest basınç, CBR, konsolidasyon, permeabilite ve üç eksenli testlerine tabi tutulmuştur. Deneysel veriler ışığında kuru ve ıslak karışımlarda uygulanan kesme deneyinde karışımların davranışlarında farklılık göstermediği anlaşılmıştır. Deney sonuçları ışığında zeminlerde suya doygunluk oranının büyük öneme sahip olduğu anlaşılmıştır.

Çimen (2016), %2, %5, %10, %15, %20, %25, %30 ve %35 oranlarında No:40 elek altı inşaat atıklarının yüksek plastisiteli bir kil ile karıştırılmasının stabilizasyon çalışmalarına etkisi araştırılmıştır. Bu kapsamda şişme potansiyeli, kompaksiyon ve serbest basınç deneyleri uygulanmıştır. Deney sonucunda optimum serbest basınç değerlerine %10-%20 oranlarında inşaat atıklarının ikamesi ile ulaşılmıştır.

Fidan (2016), çalışmasında düşük plastisiteli kil olan zemine %0, %5, %10, %15, %20, %25, %30 oranlarında doğal ve öğütülmüş perlitin ve %6 kireç ikame edilmesinin zemin stabilizasyonundaki etkileri incelemiştir. Hazırlanan karışımlara kıvam limitleri, kompaksiyon, serbest basınç dayanımı, ıslanma-kuruma ve donma-çözülme deneyleri uygulanmıştır. Elde edilen veriler doğrultusunda öğütülmüş perlitin mukavemet değerlerinde daha iyi sonuçlara ulaşılmıştır.

Keskin, Sungur, Akan ve Uzundurukan (2017), %0, %5 ve %10 oranlarında kireç tozu, pomza tozu ve mermer tozu ile ince daneli zeminlerin stabilizasyonu için çalışmalar yapmışlardır. Deney kombinasyonları anlık, 48 saatlik, 1 hafta ve 30 günlük kür sürelerine tabi tutulmuştur. Çalışma kapsamında 2 donma-çözünme çevirimlerinden sonra serbest basınç dayanımındaki değişimler incelenmiştir. Deney sonucunda serbest basınç dayanımı değerlerini kireç tozu %389 ve pomza tozu %123 yükseltirken, mermer tozu %25 seviyelerine düşürmüştür.

Türedi, Örnek, Bal ve Işık (2017), İskenderun Demir ve Çelik A.Ş.' den alınan %5, %10, %15, %20, %50, %75 ve %100 oranlarında çelikhane cürufu (BOF) doğal kil zemine karıştırılarak stabilizasyon etkilerinin CBR değeri üzerine etkileri incelenmiştir. Her deney için 2.5 mm ve 5 mm' lik penetrasyon için CBR değeri hesaplanmış, optimum BOF cürufu katkısının %35 olduğunu saptamışlardır. Sbahieh vd. (2018) çalışmasının temel amacı kumlu zeminlere fiber veya %0, %3, %5, %7 oranlarda çimento ve %0, %5, %10, %15 bentonit

karıştırılarak hazırlanan numunelerin etkilerinin araştırılmasıdır. B u doğrultuda kıvam limitleri, standart proktor, serbest basınç ve kesme kutusu deneyleri yapılmıştır. Sonuç olarak fiber takviyesinin hazırlanan karışımlarda kayma mukavemetini arttırdığı belirlenmiştir. Bentonit ilavesinin ise kayma mukavemetinde olumlu bir etkisinin bulunmadığı, sürtünme açısının da düşmesine neden olduğu gözlenmiştir.

Majedi (2019), doktora çalışmasında karbon fiber takviyeli polimer (CFRP) katkısının granüler zemine etkisini incelemiştir. Bu kapsamda iki farklı tür zemine şerit temel kullanarak yükleme yapmıştır. Bunun yanı sıra PLAXIS sonlu elemanlar yazılımından yararlanılarak modelleme yapılmış, laboratuvar ve sayısal modelleme sonuçları karşılaştırılmıştır. CFRP katkısının zemini stabilize etmek ve güçlendirmek için olumlu bir performans sergilediği gözlenmiştir.

Kocabey (2019) çalışmasında ana amacı zemin iyileştirmede katkı maddesi olan kirecin incelik etkisinin belirlenmesidir. Bu kapsamda kireç öğütülerek %90'ı 48 mikron altı malzeme olan öğütülmemiş kireç ise 20 mikron altına indirilerek %2, %4, %6, %8 ve %10 oranlarında doğal zemin ile karıştırılmıştır. Geleneksel geoteknik deneyler uygulanan karışımlarda öğütülmüş kireç ile hazırlanan karışımların öğütülmemiş kireç katkısına göre daha olumlu sonuçlar doğurduğu saptanmıştır.

Alosman (2019) çalışmasında %10, %20, %35 ve %50 oranlarında taş tozu (SP) organik zemin ile karıştırılmıştır. Hazırlanan karışımlara kıvam limitleri, düşen koni deneyi, modifiye sıkıştırma, serbest basınç dayanımı ve konsolidasyon testleri uygulanmıştır. Hazırlanan numunelerden serbest basınç testi en yüksek değeri %10 SP katkısı ile ulaşmıştır.

Durmaz ve Baran (2020), yüksek plastisiteli kil bir zemine %3, %5, %10, %15, %20, %25, %30, %35 ve %40 fındık kabuğu külü atığı ile stabilizasyon çalışmaları yapmışlardır. Hazırlanan numunelere Standart Proktor Deneyi, XRF, CBR, kıvam limitleri, permeabilite, şişme deneyleri yapılmıştır. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda en uygun sonuçları ağırlıkça %15 fındık kabuğu külünden elde edilirken, zemin iyileştirilmesinde fındık kabuğu külünün kullanılabilirliği gösterilmiştir.

Bozkurt (2020), bu çalışmada sönmüş kireç ve sönmemiş kireç ile Yalova bölgesinden alınan kil karıştırılmıştır. Hazırlanan karışımlara kıvam limitleri, piknometre, hidrometre, kompaksiyon, serbest basınç, CBR ve plaka yükleme deneyleri uygulanmıştır. 1, 7 ve 28 günlük kür süreleri sonunda katkısız kile göre kilin serbest basınç mukavemet değerlerinde daha iyi sonuçlara ulaşılmıştır.

Taş (2020), bu çalışmada doğal zemine uçucu kül, mermer tozu ve Bayburt taşı atıklarının zemin iyileştirmesindeki etkileri değerlendirilmiştir. Hazırlanan numuneler için indeks, dayanım ve durabilite tetkikleri araştırılmıştır. 7, 28 ve 84 günlük kür süreleri sonunda basınç dayanımları için en iyi sonuç mermer tozu – uçucu kül karışımlarının, durabilite tetkikleri için ise en iyi sonuç Bayburt taşı-uçucu kül karışımlarının olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Dağlı (2021), çalışmasında yüksek ve düşük plastisite özelliğine sahip iki farklı zemine %5, %10, %15, %20 ve %30 oranlarında uçucu kül ve %3, %5 ve %7 oranlarında kireçilavesi yapılmıştır. Öncelikle özgül ağırlık, hidrometre, kıvam limitleri, standart kompaksiyon deneyleri uygulanmıştır. Sonrasında serbest basınç, dolaylı çekme, ani taşıma indeksi, nemlilik şartları, Kaliforniya taşıma oranı, lineer şişme ve donma çözünme deneyleri gerçekleştirilmiştir. 28 gün küre tabi tutulan karışımlara SEM, XRD, XRF ve TGA analizleri yapılmıştır.

Sarıgöl (2021), çalışmasında polipropilen ve homopolimer propilen katkıları ile yüksek plastisiteli kilin zemin stabilitesi araştırılmıştır. Hazırlanan karışımlara uygulanan kompaksiyon, serbest basınç deneyi, donma-çözünme ve gerilme-şekil değiştirme davranışı etkiler incelenmiştir. Deneysel veriler ışığında polipropilen ve homopolimer propilen katkılarının serbest basınç dayanımında olumlu sonuçlar gösterdiği belirlenmiştir.

İKİNCİ BÖLÜM

Kaynak Özetleri

Zeminlerin stabilizasyonu veyahut ıslahı, modifikasyonu ya da en genel Türkçe tabiri ile iyileştirilmesi; zeminlerin mevcut özelliğinin değiştirilerek, zeminden istenilen özelliklere uygun hale getirilmesi şeklinde tanımlanabilir.

Zeminin stabilizasyonundaki esas gaye, zeminde var olan boşlukların azaltılması, zemindeki su miktarının azaltılması ve zeminin güçlendirilmesidir.

Katkılı Stabilizasyon

Bir ya da birden fazla katkı maddesinin zeminle karıştırılması suretiyle mevcut zemin özelliklerinin amaca uygun hale getirilmesi için fiziksel özelliklerinin iyileştirilmesine katkılı stabilizasyon denir. Kireç, çimento, uçucu kül, silis dumanı, mermer tozu, çelikhane cüruf atıkları, kırmızı cüruf atığı, bitüm katkılı stabilizasyona örnek verilebilir. Zemin sınıfına göre katkı seçimi Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. Kimyasal İyileştirmede İstenilen Katkı Malzemesi Seçimi (U.S. Army Corps. of Eng., 2003)

Alan no	Zemin sınıfı	Önerilen katkı	Kısıtlamalar	200 No.lu elekten geçen	Açıklamalar
1A	SW SP	Bitüm Çimento K-Ç-P*	- - PI<25	-	
1B	SW SP SW-SC	Bitüm Çimento Kireç	PI<10 PI<30 PI<12	-	
1C	SM SC SM-SC	Bitüm Çimento Kireç K-Ç-P*	PI<10 ** PI>12 PI<25	En fazla %30 - - -	
2A	GW GP	Bitüm Çimento K-Ç-P*	- - PI<25	-	
2B	GW GP GW-GC GP-GC	Bitüm Çimento Kireç K-Ç-P*	PI<10 PI<30 PI>12 PI<25	-	Çimento katkısı sadece iyi gradasyonlu zeminlerde ve 4 No.lu elekten geçen en az %45 olduğu durumlarda
2C	GM GC GM-GC	Bitüm - Kireç K-Ç-P*	PI<10 ** PI>12 PI<25	En fazla %30 - - -	
3	CH CL ML ML-CL	Çimento Kireç	LL<40 ve PI<20 PI>12	- -	Organik ve kuvvetli asidik zeminler uygun olmamaktadır.

* K-Ç-P: Kireç-çimento-puzolan kombinasyonu

** $PI \leq 20 - ((50-200 \text{ Nolu elekten geçen yüzde})/4)$

Kireç ile Zemin Stabilizasyonu

Kireç ile stabilizasyon yüksek plastisiteli zeminlerin iyileştirilmesi amacı ile kullanılır. Zeminin kurutulması, hacim değişiminin azaltılması, dayanımın artırılması, zemin plastisitesinin düşürülmesi kirecin stabilizasyonda kullanım nedenleri olarak sıralanabilir. Kireç zeminle karıştırılmasından sonra iki farklı dönemde farklı etkiler göstermektedir. İlk olarak kısa dönemde topaklanma (flokülizasyon) ve kümelenme (aglomerizasyon) ile zemin ortamından suyun uzaklaştırılması gözlemlenir. Uzun dönem (28 gün ve sonrası) etkisi ise zemin ortamı hidratasyon nedeniyle dayanımı zamanla artar.

Kütlece optimum oranı %6 olarak kabul edilir. %2-8 arasında değişen miktarda zemine ilave edilir. Tablo 2’de farklı zemin türleri ve her biri için kullanılması önerilen yaklaşık kireç oranları Nelson ve Miller (1992) tarafından hazırlanmıştır. Tablo 3’de Ingles ve Metcalf (1972) tarafından modifiye ve stabilizasyon için önerilen yüzdece kireç karışım değerleri gösterilmiştir.

Tablo 2 . *Farklı Zemin Cinslerine Göre Yaklaşık Kireç Miktarı (Nelson, & Miller, 1992, s.259)*

Zemin Türü	Tavsiye edilen yaklaşık kireç miktarları (%)	
	Sönmemiş kireç	Sönmüş kireç
Killi Çakıl (GC, GM-GC)	2-3	2-4
Siltli kil	3-8	5-10
Kil	3-6	3-8

Tablo 3. *Tavsiye Edilen Kireç Karışım Oranları (Ingles, & Metcalf, 1972, s. 374)*

Zemin cinsi	Modifiye için (%)	Stabilizasyon için (%)
İyi derecelenmiş killi çakıl	1 ~ 3	~ 3
Siltli killer	1 ~ 3	2 ~ 4
Plastik killer	1 ~ 3	3 ~ 8
Yüksek plastisiteli killer	1 ~ 3	3 ~ 10
İnce çatlaklı kaya	2 ~ 3	Önerilmez
Kumlu killer	Önerilmez	~ 5
Kumlar	Önerilmez	Önerilmez
Organik zeminler	Önerilmez	Önerilmez

Çimento ile Zemin Stabilizasyonu

Çimento, yapı malzemesi olarak bilinen, betonun ana malzemesi olarak kullanılırken, aynı zamanda zeminlere de ilave edilerek, zemin kayma mukavemeti değerinin artırılması için kullanılır. Zemin boşluklarında bulunan su, çimento ile reaksiyona girerek hızlı bir şekilde hidratasyona uğrar. Hidratasyon sonucu oluşan katılaşma sonucunda, çimento partikülleri diğer çimento danelerini bağlayarak zeminin mukavemetinde artış oluştururlar. Zamana bağlı olarak zemin-çimento karışımının mukavemet değeri artış gösterir (Balatan, 2019).

Çimento ile stabilizasyonda iyi derecelendirilmiş daneli zeminlerde yüksek mukavemetli sonuçlar verir. Zemine genellikle kütlece %6-15 arasında katılır. Dayanımın artması için çimentoya uygulanan kür süresinin artırılması gerekmektedir. Tablo 4’de farklı zemin sınıflarına göre çimento oranları gösterilmektedir. Tablo 5’ de zemin türüne göre kireç ile çimento iyileştirilmesindeki durabilite değerleri verilmiştir.

Tablo 4. Farklı Zemin Cinslerine Göre Çimento Oranları (Tunç, 2002)

AASHTO zemin sınıfı	Birleştirilmiş zemin sınıfı	Tipik çimento içeriği (% ağırlıkça)	Çimento ihtiyacı sınırları	
			Hacimce (%)	Ağırlıkça (%)
A-1-a	GW,GP,GM,SW,SP,SM	5	5-7	3-5
A-1-b	GM, GP, SM, SP	6	7-9	5-8
A-2	GM, GC, SM,SC	7	7-10	5-9
A-3	SP	9	8-12	7-12
A-4	CL, ML	10	8-12	7-12
A-5	ML, MH, CH	10	8-12	8-13
A- 6	CL, CH	12	10-14	9-15
A-7	MH, CH	13	10-14	10-16

Tablo 5. Kireç ile Çimento İyileştirmesinde Durabilite Değerleri (Tunç, 2002)

Zemin türü	12 ıslanma-kuruma veya donma-çözülme periyodu sonucu numune ağırlığında izin verilen maksimum kayıp (%)
Granüler, PI>10	8-14
Granüler, PI<10	11-14
Kil	6-14
Silt	8-14
A-6, A7	7
A-2-6, A-2-7, A-4, A-5	10
A-1, A-2-4, A-2-5, A-3	14

Bitüm ile Zemin Stabilizasyonu

Bitümle stabilizasyon genellikle zeminin su iletkenliğini azaltma ve zemine bağlayıcılık özelliği kazandırmak için kullanılır. Bitüm diğer katkılardan farklı olarak zeminle kimyasal tepkimeye girmezler. Genellikle daneli zeminlerin stabilizasyonunda kullanılır. Aşırı sıcak veya soğuk ortamlarda asfalt malzemelerin gösterdiği sorunlar ortaya çıkar. Bitümün daneler arasında geçirimsizlik sağlayan bir işlevi vardır. Bitüm danelerin birbirine yapışmasını sağlar. Bunun yanı sıra zemindeki su geçirmez hale getirerek daneler arasında bulunan suların birbiriyle olan bağlarını korur veya her ikisini de aynı anda yapar. Bu yöntemde katkı maddesi olarak genelde yaklaşık %5-10 oranında asfalt veya katran kullanılır. Bitümle iyileştirme özellikle karayollarında ve yüzey kaplamalarında kullanılır (Uzuner, 2000).

Uçucu Kül ve Fırın Curufu ile Zemin Stabilizasyonu

Bu tür katkılar genellikle tek başına zemin stabilizasyon katkısı olarak kullanılmazlar. Çimento, kireç, bitüm gibi katkı malzemeleri ile birlikte kullanılır. İçerisinde yüksek miktarda

puzolanik madde içerir. Bu ürünler sanayi atığı ürünlerdir. Dolayısıyla bu atıkların kullanımı hem çevre kirliliğinin azaltılması hem de katı atık yönetimi açısından büyük önem teşkil etmektedir.

Termik santrallerinin atıklarının %75-80'lik kısmı uçucu kül geri kalanı ise taban külüdür. Türkiye'de 1990'lı yılların verilerine göre sadece %1 civarında uçucu külün yeniden kullanımı söz konusudur. Arta kalan kısmının ise depolanmasının veya atılmasının çevreye ve kamuya zararı büyüktür (Çalık, 2012).



ÜÇÜNCÜ BÖLÜM

Materyal ve Yöntem

Bu çalışmadaki temel amaç, kireç ile kil bir zemin stabilizasyonunda iki farklı incelikte öğütülmüş YBT atıklarının zemin iyileştirmelerinde kullanılabilirliğinin araştırılmasıdır. Bu bölümde çalışma kapsamında hazırlanan karışımların mühendislik özelliklerinin belirlenmesi için yapılan deneyler, kaynak alınan standartlar ve deney numunelerinin notasyon bilgileri sunulmuştur.

Materyal

Çalışma kapsamında kullanılan malzemeler; doğal zemin, kireç ve iki farklı incelikte öğütülmüş yeşil renkteki Bayburt taşı atıklarıdır. Zemin malzemesi Bayburt ilinin Demirözü ilçesinden zemin yüzeyinin yaklaşık 1,5-2 m derinliğinden alınmıştır. Alınan malzeme Bayburt Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Geoteknik Laboratuvarı'na getirilmiştir. Deneylere başlanılmadan önce doğal malzeme 24 saat etüvde kurutulmuştur. Daha sonra deney numunelerinin hazırlanması işlemine geçilmiştir. Şehir merkezinde bulunan ve çevre kirliliğine neden olan atık Bayburt taşları toplanmıştır. Deneylerde kullanılan sönmüş kireç Karsan Kireç Sanayi ve Ticaret A.Ş. firması tarafından üretilmiştir. Çalışmada kullanılan YBT iki farklı incelikte öğütme işlemine tabii tutulmuştur. Hazırlanan deney numuneleri %6 oranında kireç, %0, %5, %10, %15, %20 oranlarında iki farklı incelikte öğütülen YBT atıklarının kil zemine karıştırılması ile oluşturulmuştur.

Tablo 6. Deney Numuneleriyle İlgili Notasyon Bilgileri

Deney numunelerinin karışım oranları	Notasyon
Doğal zemin	Z
Doğal zemin ve kireç	ZK
Doğal zemin, kireç, %5 YBT	ZKY1/5
Doğal zemin, kireç, %10 YBT	ZKY1/10
Doğal zemin, kireç, %15 YBT	ZKY1/15
Doğal zemin, kireç, %20 YBT	ZKY1/20
Doğal zemin, kireç, %5 YBT	ZKY2/5
Doğal zemin, kireç, %10 YBT	ZKY2/10
Doğal zemin, kireç, %15 YBT	ZKY2/15
Doğal zemin, kireç, %20 YBT	ZKY2/20

*İnce daneli YBT: D₉₀ 260 µm, D₅₀ 65 µm, D₁₀ 8,73 µm malzeme

*İri daneli YBT: D₉₀ 1160 µm, D₅₀ 181 µm, D₁₀ 10,2 µm malzeme

Deneylerde kullanılan doğal malzeme Bayburt ili Demirözü ilçesindeki bir araştırma çukurundan yaklaşık 1.5-2 m derinliğinden temin edilmiştir. 40°9'50" kuzey enlemi ve 39°53'33" doğu boylamı koordinatlarında yer alan 1975m rakımlı bu bölgeden alınan doğal malzeme Bayburt Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Geoteknik Laboratuvarı'na getirilmiştir. Laboratuvara getirilen doğal zeminin tümü 0.425 mm elek açıklığı bulunan 40 No'lu elekten geçirilerek, deneylerde kullanılacak bir malzeme haline getirilmiştir. ASTM D 2487 (2011) standardına göre çalışmada kullanılan doğal malzemenin Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemi'ne göre zemin cinsi düşük plastisiteli kildir (CL). Çalışma kapsamında kullanılan kirece ait fizikokimyasal özellikler Tablo 7'de sunulmuştur.

Tablo 7. Kullanılan Kirecin Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri

KİMYASAL ANALİZLER	
SiO ₂ (%)	0.23
Al ₂ O ₃ (%)	0.11
Fe ₂ O ₃ (%)	0.40
AktifCaO(%)	65.00
MgO(%)	1.40
Ca(OH) ₂ (%)	85.80
FİZİKSEL ANALİZLER	
75 p elek üzeri (%)	3.8
Özgül ağırlık	2.37
pH değeri	12.4
Yoğunluk (Mg\m ³)	0.48

Bayburt ili sahip olduğu jeolojik yapı gereği çeşitli maden yataklarının oluşunu için uygun bir ortam sunmaktadır. Bununla birlikte bilinen maden yataklarının sayısı oldukça azdır. Bayburt ilindeki metalik madenler bakır ve krom yatak ve zuhurlarıdır. Merkez-Helvaköy ve Anzarya bakır sahasında 200.000 ton potansiyel kaynak belirlenmiştir. Kopdağı Bölgesi'nde %15-45 Cr₂O₃ tenörlü çok sayıda krom yatak ve zuhurları tespit edilmiştir (MTA, 2005).

Bayburt ili ve civarında bulunan ve “Bayburt Taşı” olarak bilinen Bayburt tuf ve tüfitleri ile ekonomisinde, özellikle yapıtaşı olarak kullanılması ile ticari bir öneme sahiptir. 2005 yılında Bayburt Valiliğinin talebi ile Maden Tetkik Arama Müdürlüğü tarafından Bayburt ilinde detay etütler gerçekleştirilmiş ve Toptepe, Sırataşlar, Gevenli, Konakdağ ve Gümüşdamla sahaslarında toplam 2.535.700 ton görünür rezerv tespit edilmiştir. Ayrıca Bayburt ili ve çevresinde Bayburt Taşı dışında traverten yatakları da bulunmaktadır. İldeki açık, koyu bej renkli ve resifal özellikli Jura kireçtaşları ile oniks ve granitler de bölgenin önemli doğaltaş potansiyelleri arasında yer almaktadır. Ayrıca, ilde bulunan bir diğer endüstriyel hammadde kaynağı ise Demirözü ilçesindeki Edire ve Gümüşgöze kil sahaslarıdır. %22 ile 31 arasında değişen Al₂O₃ içeriklerine sahip sahasların toplam görünür muhtemel kil rezervi 386.100 ton olarak belirlenmiştir (MTA 2005).

Bayburt Taşı genellikle dış cephe kaplamalarında, kalelerde, ibadethanelerde, çeşmelerde, taş kitabelerde, köprülerde, mezar taşlarında, türbelerde ve camilerde kullanılmaktadır. Yeşil, beyaz ve sarı renkleri olan Bayburt taşının bu tez çalışması kapsamında yeşil renkteki çeşidi kullanılmıştır.

Yeşil Bayburt Taşı, Bayburt bölgesinden temin edilmiştir. Malzeme öncelikle darbeli kırıcıya girebilmesi için balyozla kırılmış, sonra yatay ekseninde dönebilen bilyeli öğütücü ile öğütülmüştür. YBT, Bayburt ve çevresindeki illerde inşaat malzemesi olarak kullanılmaktadır. Genellikle dış cephe kaplamasında kullanılan YBT'nin kullanım örneği şekil 1'de sunulmuştur.



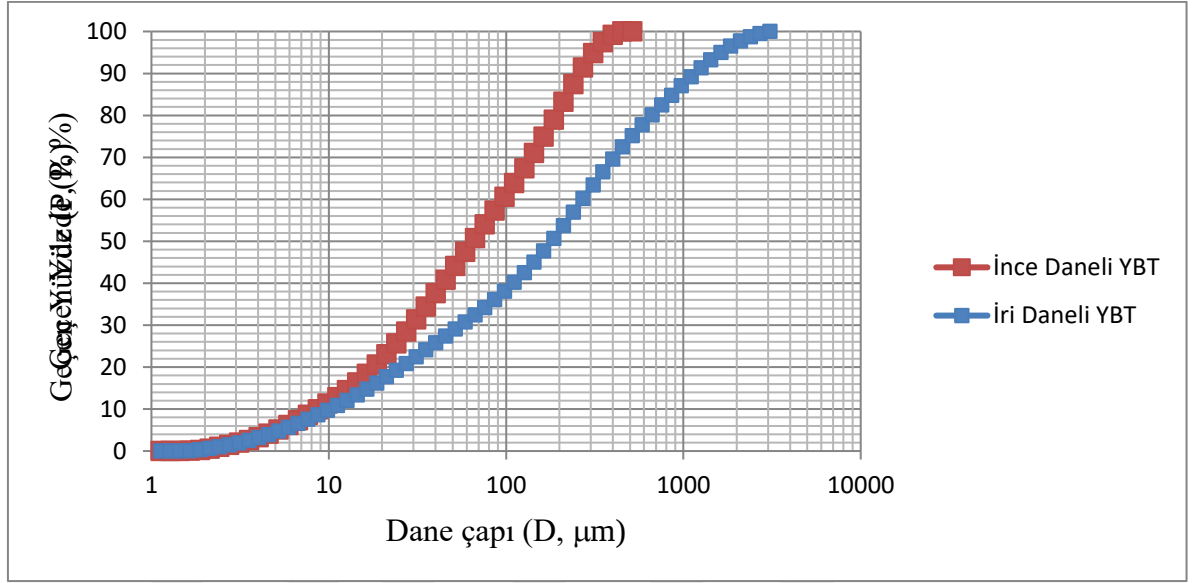
Şekil 1. Bayburt ili Petekkaya köyü camindeki yeşil Bayburt taşı kaplaması.

YBT'na ait kimyasal ve fiziksel özellikleri Tablo 8'de sunulmuştur.

Tablo 8. *BYT Kimyasal ve Fiziksel Özellikleri (Yılmaz, 2015, s.64)*

KİMYASAL ANALİZLER	
Toplam SiO ₂ (%)	68.22
Al ₂ O ₃ (%)	12,06
Fe ₂ O ₃ (%)	1,84
CaO (%)	2,17
MgO (%)	1,04
SO ₃ (%)	0,09
K ₂ O (%)	1,54
Na ₂ O (%)	6,08
Kızdırma Kaybı (%)	6,79
Cl (%)	0,0281
FİZİKSEL ANALİZLER	
45 µ elek üzeri (%)	5.0
Özgül ağırlık	2,30
Blaine (cm ² /g)	6250
Puzolanik aktivite	10,50

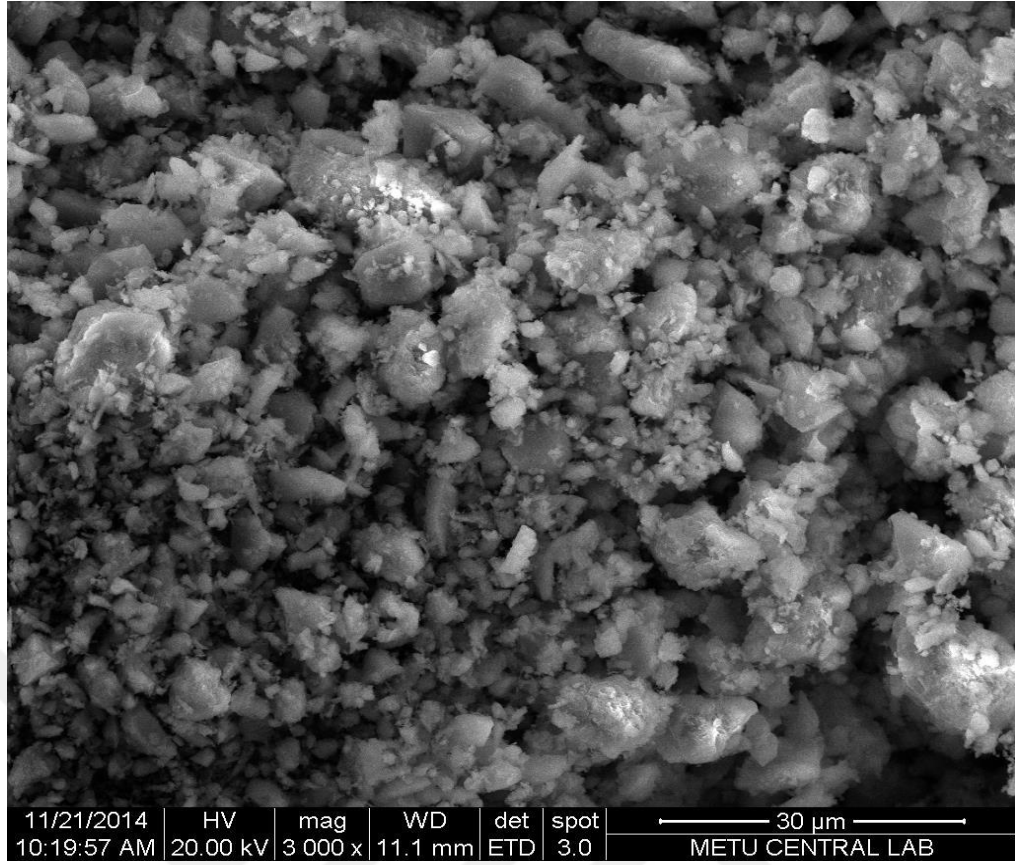
Öğütülmüş YBT atıklarının dane boyutu dağılımı testi Bayburt Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarı'nda lazer kırınım yöntemiyle yapılmıştır. Malzemeye ait dane boyutu dağılım eğrisi Şekil 2'de gösterilmiştir.



Şekil 2. Yeşil Bayburt taşı atıklarının granülometri eğrisi.

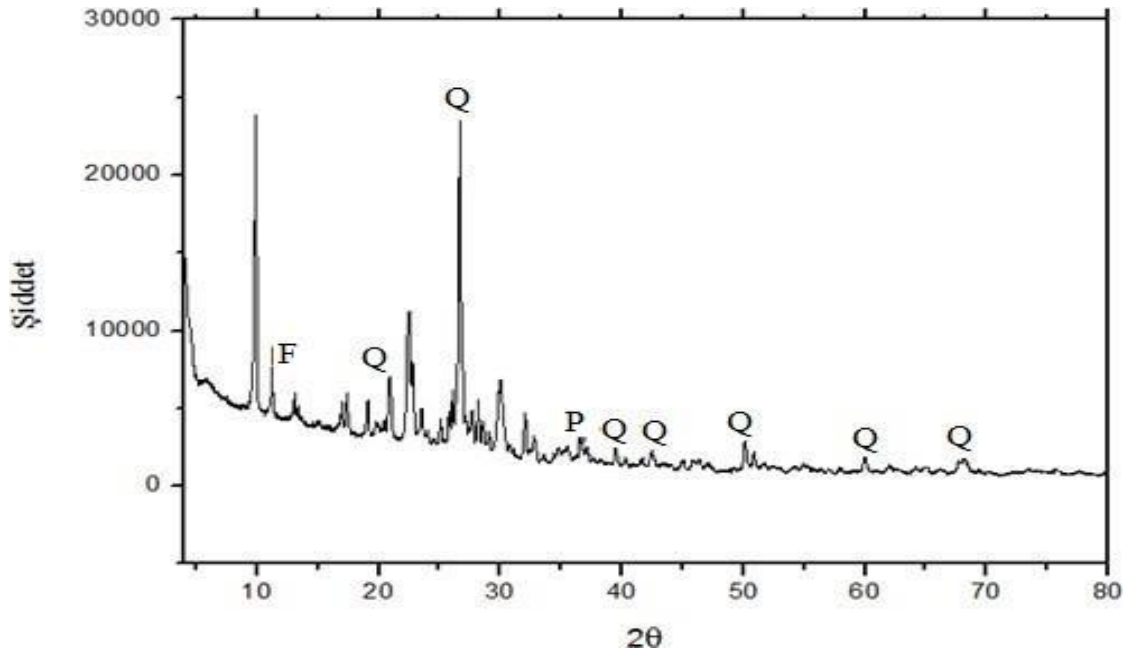
Şekil 2'den görülebileceği üzere ince daneli YBT'nin D_{90} değeri 260 µm iken iri daneli YBT'nin D_{90} değeri 1160 µm'dur. Yani ince daneli YBT olarak adlandırılan katkının %90'ı 260 µm altı malzeme iken iri daneli YBT olarak adlandırılan malzemenin %90'ı 1160 µm altı malzemedir. İnce daneli YBT'nin D_{50} değeri 65 µm iken iri daneli YBT'nin D_{50} değeri 181 µm'dur. Yani ince daneli YBT olarak adlandırılan katkının %50'ı 65 µm altı malzeme iken iri daneli YBT olarak adlandırılan malzemenin %50'ı 181 µm altı malzemedir. İnce daneli YBT'nin D_{10} değeri 8,73 µm iken iri daneli YBT'nin D_{10} değeri 10,2 µm'dur. Yani ince daneli YBT olarak adlandırılan katkının %10'ı 8,73 µm altı malzeme iken iri daneli YBT olarak adlandırılan malzemenin %10'ı 10,2 µm altı malzemedir.

YBT atıklarının SEM görüntüsü Şekil 3'de sunulmuştur.



Şekil 3. YBT atıklarının SEM görüntüsü. (Yılmaz, 2015, s.161)

YBT atıklarına yapılan XRD analizi sonucunda yapısında kuvars (Q), feldispat (F) ve periklas (P) minerallerine rastlanmıştır (Yılmaz, 2015). XRD analizi sonuçları Şekil 4'te sunulmuştur.



Şekil 4. YBT atıklarının XRD analizi. (Yılmaz, 2015, s.66)

Yöntemler

Bu bölümde çalışma kapsamında kullanılan yöntemlere ve deneylerde referans alınan standartlara yer verilmiştir.

Deneylerde referans alınan ASTM standartlar.

Tez çalışması kapsamında yapılan deneyler ilgili ASTM standartlarına uygun gerçekleştirilmiştir. Çalışma kapsamında deneylerde referans alınan ASTM standartları Tablo 9’ da mevcuttur.

Tablo 9. Deneylerle İlgili ASTM Standartları

Deneyin adı	Standart
X-ışını kırınım analizi	ASTM D 934 (2003)
Elek analizi	ASTM D 422 (2007)
Kıvam limitlerinin belirlenmesi	ASTM D 4318 (2010)
Standart kompaksiyon deneyi	ASTM D 698 (2007)
Serbest basınç deneyi	ASTM D 2166(2006)
Taramalı elektron mikroskopu deneyi	ASTM C 1723(2010)

Elek analizi, Atterberg limitleri, kompaksiyon ve serbest basınç deneyleri Bayburt Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Geoteknik Laboratuvarı’nda gerçekleştirilmiştir. Öğütme işlemleri Bayburt Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Laboratuvarı’nda gerçekleştirilmiştir. Lazer kırınım analizi, SEM, XRD ve FTIR ise Bayburt Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarı Uygulama ve Araştırma Merkezi’nde gerçekleştirilmiştir.

Öğütme işlemleri.

Öğütme işlemi Bayburt Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yapı Laboratuvarı’nda üç aşamalı gerçekleştirilmiştir. İlk aşamada laboratuvara getirilen Yeşil Bayburt Taşı darbeli kırıcıya girecek boyutta olması için balyozla kırılmıştır. İkinci aşamada yatay ekseninde dönen düşey öğütücüde 7000 gr bilyeler ile 15 dakikalık periyotlar halinde 10 tur öğütülmüştür. Öğütülmüş Yeşil Bayburt Taşı ince ve kaba taneli olmak üzere iki grupta değerlendirilmiştir.

Son aşamada ise Los Angeles Aşınma Cihazından alınan Yeşil Bayburt Taşı, bilyeli öğütücüde tekrar öğütülmüştür. 24 saat önceden etüvde 105°C’de ısıtılan bilyeler, 500 gr’ lık Yeşil Bayburt Taşını öğüterek daha ince taneli malzeme elde edilmiştir. Öğütme işleminde kullanılan cihazlara ait görüntüler Şekil 5, Şekil 6 ve Şekil 7’de verilmiştir.

Öğütme işlemleri sonrasında ince ve iri Yeşil Bayburt Taşı için Bayburt Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarı Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde lazer kırınım testleri yapılmıştır.



Şekil 5. Darbeli kırıcı.



Şekil 6. Aşınma cihazı.



Şekil 7. Bilyeli öğütücü.

Kıvam limitleri deneyleri.

Atterberg (1911) likit limit (LL) sıvı olarak akış göstermeyen zeminin en altı su içeriği olarak tanımlanmıştır (Holtz ve Kovacs 1981). Likit limitin mühendislik amaçlarına uygun bir şekilde deneysel olarak belirlenmesi ilk kez Casagrande (1932) tarafından gerçekleştirilmiştir (Head 1992). Kendi adıyla anılan Casagrande yönteminde, pirinç bir tas içerisinde karıştırılmış zemin örneği ile kaplanır. Yivle ikiye ayrıldığı ve yivin açtığı boşluğun 13 mm kapanıncaya kadar tasın tekrar levhaya düşürülmesini içermektedir.

1911 yılında İsveçli kimyager Albert Atterberg, ince taneli zeminlerin su muhtevasına göre farklı mühendislik özellikleri göstermesi, deneysel olarak kıvam limitleri şeklinde adlandırılmıştır. Kıvam limitleri ince taneli zeminlerde (kohezyonlu) zeminin değişen su oranına göre sertlik ve yumuşaklık durumuna bakılmasıdır. Atterberg tarafından bu durumları ayıran 3 tane sınır muhtevası bulunmaktadır. Şekil 22’de ince taneli zeminlerin kıvam limitleri grafiği verilmiştir.

Likit limit (LL , w_L); plastik ile likit durumları birbirinden ayıran su içeriğidir. Zemin kendi ağırlığı altında akabilir.

Plastik limit (PL , w_P); plastik ve yarı katı durumları birbirinden ayıran su içeriğidir.

Rötre, büzülme limit (SL , w_s); zeminin suya tam doygun olduğu minimum su içeriğidir.

Kompaksiyon.

Nemli zeminin tabaka tabaka serilip, sıkıştırılmasına kompaksiyon denilir. Kompaksiyon ile birlikte zeminin boşluk oranı ve porozitesi düşer. Rölatif sıkılığı ve taşıma gücü artar. Bunların yanı sıra geçirimsizlik ve oturma azalır. Kompaksiyonun kıstası o zemine

ait kuru yoğunluktur. Kuru yoğunluk değeri arttıkça kompaksiyon artar. Kuru yoğunluğun en yüksek olduğu anda su içeriği optimum su muhtevasıdır. Bir zeminin optimum su içeriği Proctor Deneyi ile bulunabilir.

Derin bir kap içine konulan kuru zemine bir miktar su ilave edilir. ASTM D 698 standardına göre hazırlanan karışım tabakalar halinde silindirik çelik kalıba yerleştirilir. Her tabakada 25 tane olmak üzere 3 kademede tokmak yardımı ile vurulur. Kalıptan çıkarılan sıkışmış zemin, 3 parçaya ayrılır. Darası alınan kaplara konulan numuneler, 24 saat etüve konulur. 24 saat sonra etüvden çıkarılan numuneler tartılarak su muhtevası bulunur. Yapılan deney en az 5 kez tekrar edilerek tamamlanır. Kompaksiyon eğrisinin oluşturulabilmesi için deney sonuçları p_k -w grafiğine işlenir. Bu sayede ρ_{max} ve w_{opt} elde edilir.

Serbest basınç deneyi.

Serbest basınç deneyi genellikle doymuş killi zeminlerdeki bir numunenin tek eksenli basınç uygulanarak kırılması dayanımının ölçümüdür. Kohezyonsuz, drenajlı ve yüksek taşıma gücü kapasitelerine sahip yani granüler zeminlere uygulanamaz.

Bu deney sırasında kırılma çoğunlukla diyagonal bir düzlemde gerçekleşir. Numunedeki oluşan kayma düzleminin alt ve üst yükleme başlıkları ile kesişmemesi için boy uzunluğu/çap oranı (h/d) en az iki olmalıdır. (Çalık, 2012)

Tez çalışmasında hazırlanan numuneler 100 mm yüksekliğinde 50 mm çapında silindirik numunelerdir. Hazırlanan numuneler 7, 28 ve 84 gün süre ile desikatörde küre tabii tutulmuştur. Serbest basınç deneyinde ilk olarak zemin 40 nolu elek ile elenmiştir. Elenen zemin %5, 10, 15 ve 20 oranlarında iri ve ince taneli öğütülmüş YBT ve kireç ile standart Proktor kalıbında sıkıştırılmıştır. Son olarak sıkıştırılan karışım örnek çıkartıcı ile standart Proktor kabından çıkarılıp hazırlanmıştır. Karışımların hazırlanma aşamaları Şekil 8’de sunulmuştur. Serbest basınç deneyi ile ilgili hazırlanan katkılı zemin numuneleri ve bu numunelerin desikatörde küre bırakılması Şekil 9’da gösterilmiştir. Deney aleti ve numuneler Şekil 10’ da gösterilmiştir.



Şekil 8. Karışımların hazırlanma aşamaları.



Şekil 9. Serbest basınç deneyi için hazırlanan numunelerin küre konulması.



Şekil 10. Deney aleti ve numuneler.

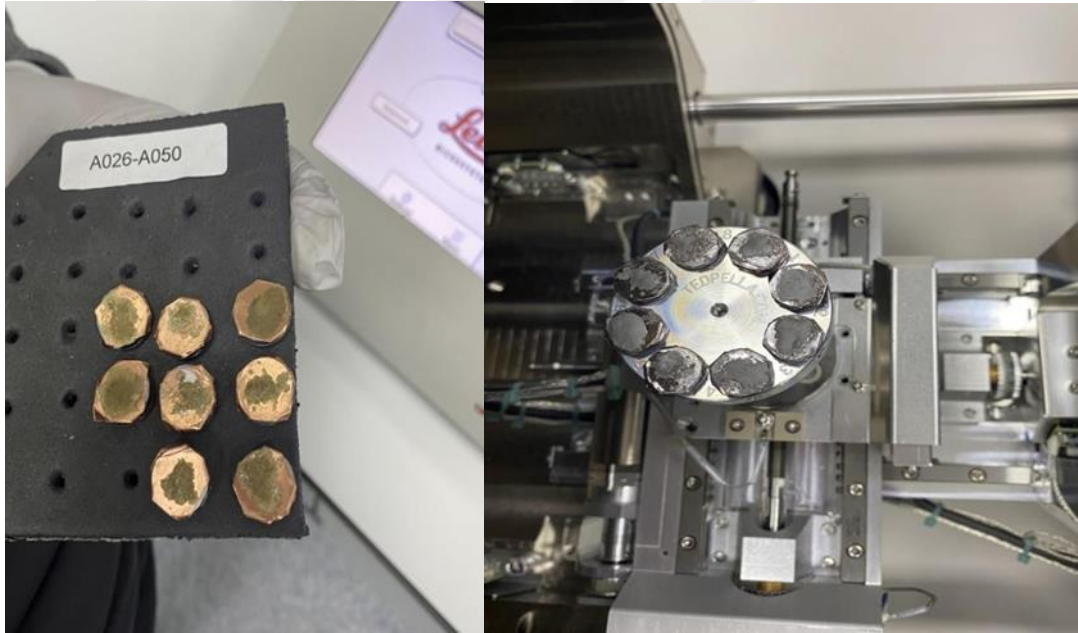
Taramalı elektron mikroskobu (SEM).

Taramalı elektron mikroskobu (SEM), odaklanmış bir elektron demetiyle numune yüzeyini tarayarak görüntü elde edilmesini sağlayan bir mikroskop çeşididir. Numunedeki atomlarla elektronlar etkileşerek numune yüzeyindeki topografi ile ilgili sinyaller üretir. Sinyallerin dedektörlerde toplanarak aktarılmasıyla görüntü oluşur.

Çalışma kapsamında üretilen numunelere ait SEM analiz incelemelerinde Bayburt Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarı Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde bulunan FEI marka Nova Nano SEM 450 model taramalı elektron mikroskobu kullanılmıştır. Analizde kullanılan SEM cihazı Şekil 11'de gösterilmiştir. Numunelerin iletken tabaka ile kaplanma aşaması Şekil 12'de gösterilmiştir.



Şekil 11. SEM cihazı.

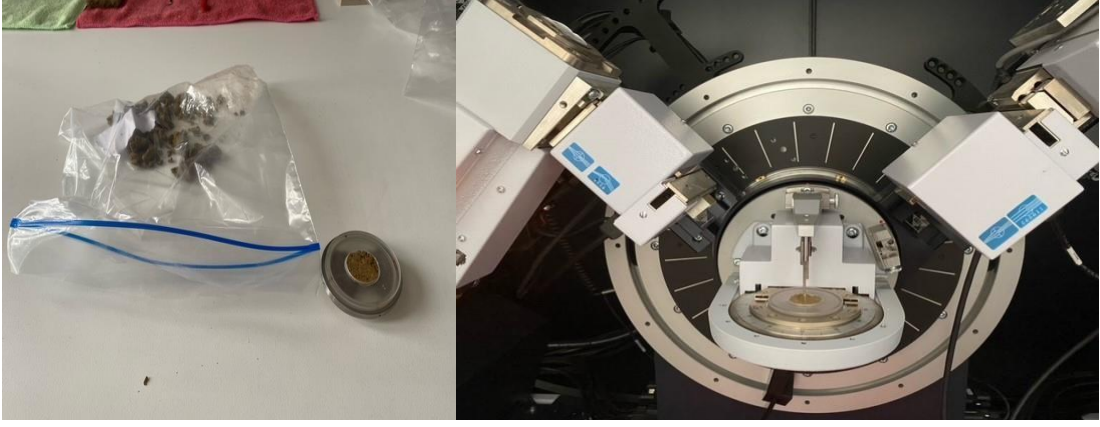


Şekil 12. Numunelerin iletken tabaka ile kaplanma aşaması.

X- ışını kırınım cihazı (XRD).

X-ışını kırınım yöntemi (XRD), kristal simetrisini ve yapısını tesis etmede kullanılan bir yöntemdir. Farklı olan her kristalin kırınım profilleri bir bakıma parmak izi gibi o kristali tarif edebilmektedir.

Çalışma kapsamında yapılan XRD analizlerinde Bayburt Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarı Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde bulunan Bruker marka D8 Discover XRD model cihazlar kullanılmıştır. XRD cihazı Şekil 13'de gösterilmektedir.



Şekil 13. XRD cihazı.

Fourier dönüşümü kızılötesi spektroskopi (FT-IR).

Fourier dönüşümü kızılötesi spektroskopi cihazı matematiksel Fourier dönüşümü ile ışığın kızılötesi yoğunluğuna karşı dalga sayısını ölçen analitik bir ekipmandır (Skoog vd., 1998).

Çalışma kapsamında yapılan FT-IR analizlerinde Bayburt Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarı Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde bulunan Fourier dönüşümü kızıl ötesi spektroskopi cihazı kullanılmıştır. Fourier dönüşümü kızıl ötesi spektroskopi cihazı Şekil 14'de gösterilmektedir.



Şekil 14. Fourier dönüşümü kızılötesi spektroskopi cihazı.

DÖRDÜNCÜ BÖLÜM

Araştırma Bulguları

Çalışma kapsamında Bayburt ili Demirözü ilçesinden alınan zemin numunesinin kireç ve yeşil Bayburt taşı ile stabilizasyonu incelenmiştir. Yeşil Bayburt taşının inceliğinin zeminin dayanıma etkisi araştırılmak üzere iri ve ince daneli olarak iki farklı numune düzeneği hazırlanmıştır. Zemine önce kireç, sonrasında %5, %10, %15 ve %20 oranlarında ince daneli ve iri daneli Yeşil Bayburt Taşı katılarak kıvam limitleri, kompaksiyon, serbest basınç deneyleri yapılmıştır. Bunların yanı sıra SEM, XRD ve FT-IR deneyleri ile hazırlanan numuneler mikro yapısal boyutta incelenmiştir. Bu bölümde deneylerden elde edilen bulgular ve bunların araştırılması aktarılmıştır.

Kıvam Limitleri

Çalışma kapsamında notasyonları önceden belirlenen ve belirlenen karışım yüzdelere uygun olarak hazırlanan numunelerin kıvam deneylerinden elde edilen sonuçlar Tablo 10'da yer almaktadır.

Çalışma kapsamında likit limit deneyi için koni penetrasyon yöntemi kullanılmıştır. Koni penetrasyon deney cihazı Şekil 15'te verilmiştir.



Şekil 15. Koni penetrasyon deney cihazı.

Likit limit tayini için 10 adet numunenin her biri için ASTM D 4318 standartına göre 40

nolu elekten geçirilmiş yaklaşık 150-180 gram numune spatula ile suyla çamur yapılır. Hazırlanan amur, metal deney kabına yerleştirilir. Koninin hazırlanan karışıma batması için 5 saniye sureyle düşmesi ve ardından batma miktarı ölçlr. Zeminin su içeriğinin belirlenmesi için batan koninin çevresinden örnek alınarak 24 saat sure ile etüve konulur. Bu aşama 5-6 kez tekrarlanabilir. 20 mm batmaya karşılık gelen su muhtevası o numunenin likit limiti olarak tayin edilir.

Plastik limit deneyi için zemin 40 nolu elekten geçirilir. Zemine az miktarda su eklenerek, cam yüzeyde avuç içi ile malzemenin inceltilmesi sağlanır. Bu inceltme işlemi ile 3 mm’ de ortaya çıkan çatlamalara karşılık gelen değer plastik limit değeridir.

Tablo 10. *Kıvam Deneyleri Sonuçları*

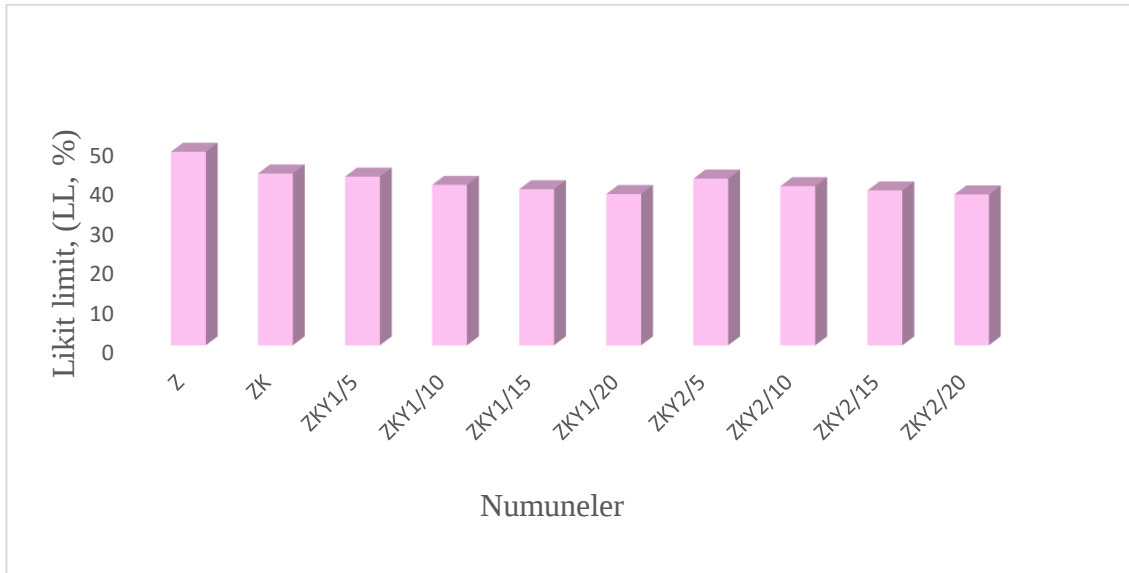
Deney Numuneleri	Likit Limit (%)	Plastik Limit (%)	Plastisiteİndisi (%)
Z	48,9	26,8	22,1
ZK	43,4	32,4	11
ZKY1/5	42,6	33,1	9,5
ZKY1/10	40,5	31,3	9,2
ZKY1/15	39,4	28,7	10,7
ZKY1/20	38,2	27,6	10,6
ZKY2/5	42,1	33,7	8,4
ZKY2/10	40,2	31,1	9,1
ZKY2/15	39,1	28,3	10,8
ZKY2/20	38,1	27,2	10,9

Kıvam limitleri deneyleri, numunelerin hazırlanmasından sonra bekletilmeden yapılmıştır. Hazırlanan numuneler arasında doğal zeminin likit limit ve plastisite indisi değerleri en yüksek veriler olurken, plastisite limit değeri en düşk değeri almıştır.

Doğal zemine YBT ilavesi yapılarak hazırlanan karışımlarda LL ve PI değerlerinde Z numunesine göre düşşler gözlenmiştir.

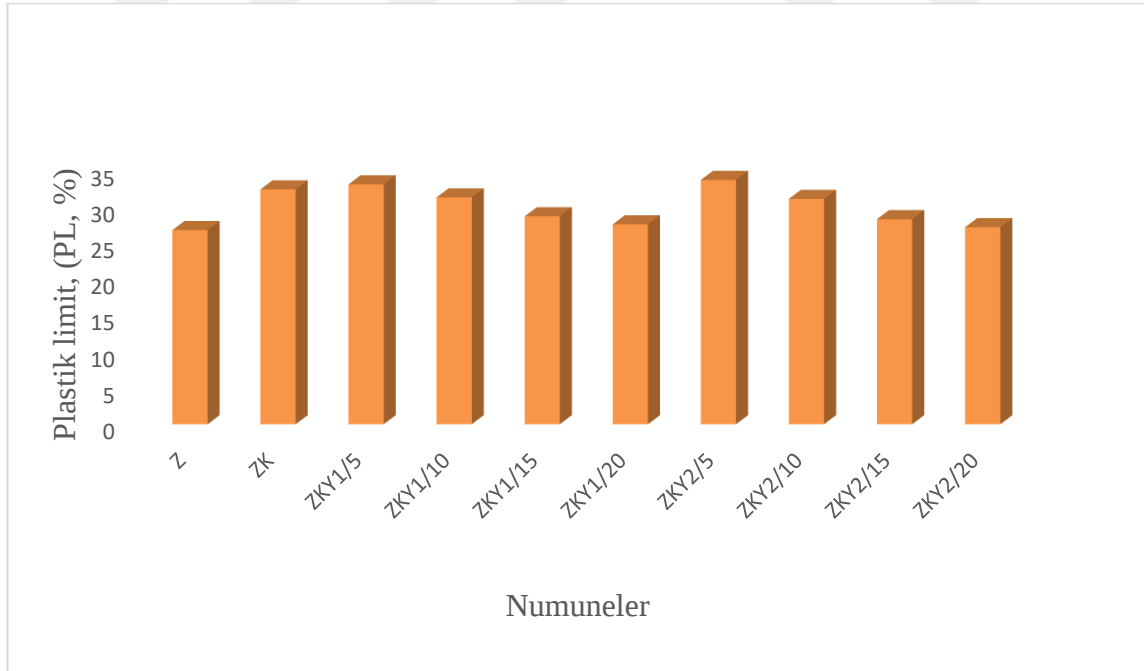
ZKY1 numunelerine ait likit limit değerlerinde artan Bayburt taşı oranında LL verilerinde azalmaların meydana geldiği belirlenmiştir. ZKY1 karışımlarının ZKY2 karışımlarına göre daha yüksek likit limit değerlerine sahip olduğu görülmüştür. Likit limit değerinin en düşk olduğu değer YBT nin %20 oranında kullanıldığı ZKY2/20 olduğu tespit edilmiştir.

ZKY1 numunelerinin likit limit değerlerinin ZKY2 numunelerinin likit limit değerinden kısmen daha yüksek olduğu bu değerlerin oldukça yakın oldukları tespit edilmiştir. şekil 16’da Z, ZK, ZKY1 ve ZKY2 numunelerine ait likit limit değerlerinin karşılaştırılmaları sunulmuştur. şekil 16 ve şekil 17’de anlaşılabileceği üzere YBT atıklarının ince veya iri daneli olmasının likit limit ve plastik limit değeri üzerinde kayda değer bir etkisinin olduğu tespit edilmemiştir.



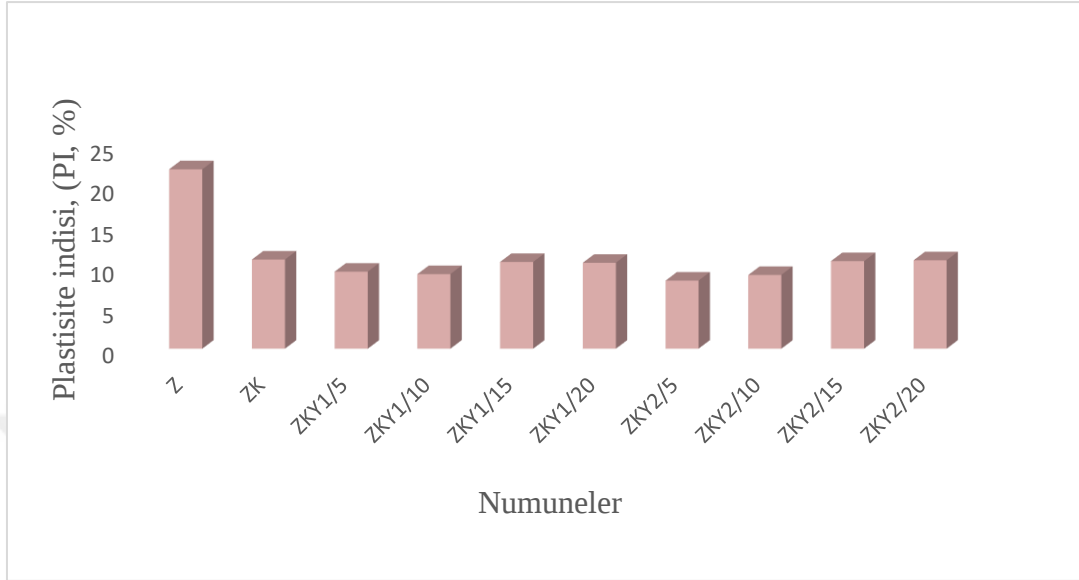
Şekil 16. Numunelere ait likit limit değerleri.

ZKY1 ve ZKY2 numunelerinin doğal zemin numunesine göre plastik likit değerinin arttığı gözlemlenmiştir. YBT oranının artması ile plastik limit değerinde düşüşler meydana gelmiştir. Plastik limit değerinin en yüksek olduğu değer YBT' nin %5 oranında kullanıldığı ZKY2/5 olduğu tespit edilmiştir. Şekil 16 ve Şekil 17'den anlaşılabileceği üzere YBT atıklarının ince veya iri daneli olmasının likit limit ve plastik limit değerleri üzerinde kayda değer bir etkisinin olduğu tespit edilmemiştir.

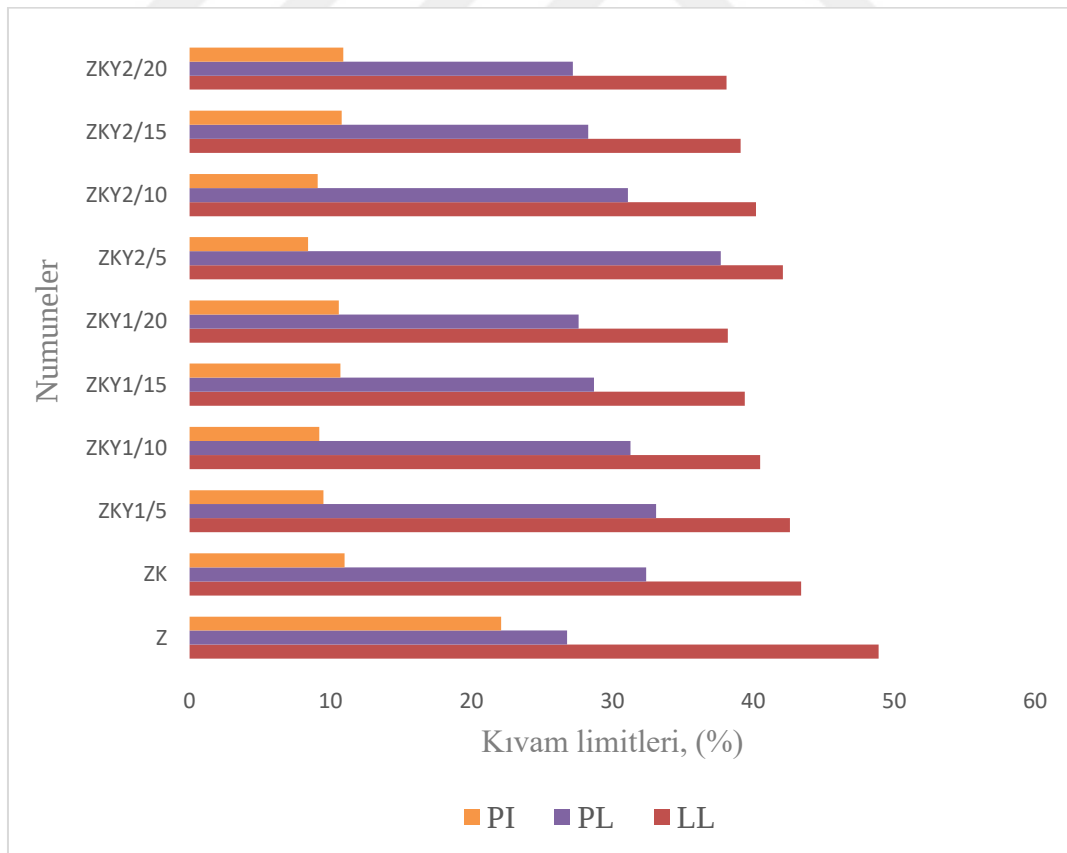


Şekil 17. Numunelere ait plastik limit değerlerinin karşılaştırılması.

Doğal zemine göre ZKY1 ve ZKY2 numunelerinin plastisite indisi değerinde azalma meydana gelmiştir. Artan YBT oranlarında ZKY1 ve ZKY2 numunelerine ait plastisite indisi değerlerinde düzensiz bir davranış söz konusudur. Şekil 18’de Z, ZK, ZKY1 ve ZKY2 numunelerine ait plastisite indisi değerlerinin karşılaştırılmaları grafikte sunulmuştur.



Şekil 18. Numunelere ait plastisite indisi değerlerinin karşılaştırılması.



Şekil 19. Deneydeki numunelere ait kıvam limitleri grafiği.

Kompaksiyon Parametreleri

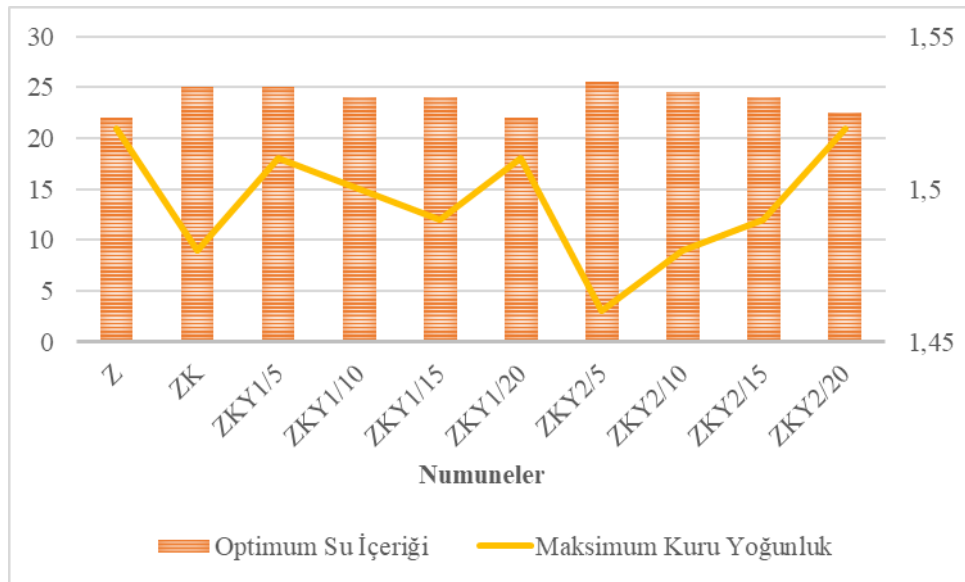
Çalışma kapsamında optimum su muhtevası ve maksimum kuru birim hacim ağırlık değerlerini elde etmek için her bir numuneden 6 adet olmak üzere toplamda 60 adet kompaksiyon yapılmıştır. Zemin, zemin ve kireç, %5, %10, %15 ve %20 YBT oranlarındaki farklı iki inceliklerdeki karışımların maksimum kuru yoğunlukları ve optimum su içerikleri ASTM D 698 standardına göre elde edilmiştir. Karışımlara ait maksimum kuru yoğunlukları ve optimum su içerikleri Tablo 11’de verilmiştir.

Tablo 11. Hazırlanan numunelerin kompaksiyon parametreleri

Numune	Maksimum kuru yoğunluk, (Mg/m ³)	Optimum su içeriği, (%)
Z	1,52	22
ZK	1,48	25
ZKY1/5	1,51	25
ZKY1/10	1,5	24
ZKY1/15	1,49	24
ZKY1/20	1,51	22
ZKY2/5	1,46	25,5
ZKY2/10	1,48	24,5
ZKY2/15	1,49	24
ZKY2/20	1,52	22,5

Doğal zemine kireç ve YBT atığı ilavesi ile birlikte optimum su içeriğinde artışlar meydana gelmiştir. Maksimum kuru yoğunluk değerlerinde ise azalmalar gözlemlenmiştir. Tablo 11 incelendiğinde doğal zemine eklenen kireç ve iri ve ince daneli YBT atıkları kullanılarak hazırlanan kompaksiyon sonuçları arasında yakın değerler çıktığı tespit edilmiştir.

Maksimum kuru yoğunluk değeri en yüksek ZKY2/20 numunelerinde görülürken, en düşük ZKY2/5 numunelerinde görülmüştür. Genel olarak kaba ve ince taneli YBT atıkları ve kireç ile hazırlanan numuneler için maksimum kuru yoğunluk 1,46-1,52 Mg/m³ arasında değişmektedir. Optimum su muhtevaları değerlerine bakıldığında ise %22-25,5 arasındaki değişimlerin olduğu tespit edilmiştir. YBT atığının öğütülmesi işlemi, optimum su içeriği ve maksimum kuru yoğunluk değerlerinde belirgin farklılıklara yol açmamıştır. Hazırlanan numunelerin kompaksiyon parametreleri Şekil 20’de sunulmuştur.



Şekil 20. Z, ZK, ZKY1 ve ZKY2 karışımlarına ait optimum su içeriği-maksimum kuru yoğunluk değerleri grafiği.

Serbest Basınç Dayanımları

Kompaksiyon deneyleri sonucunda optimum su içerikleri belirlenen karışımlar, standart bir kompaksiyon enerjisinde standart Proctor aleti ile sıkıştırılmıştır. Hazırlanan deney numuneleri 50 mm çapında ve 100 mm yüksekliğinde silindirik numunelerdir. Hazırlanan numuneler 7, 28 ve 84 gün süre ile desikatörde bekletilmiştir. Hazırlanan numunelerin serbest basınç dayanım sonuçları Tablo 12’de sunulmuştur. Tablo 12’de sunulan dayanım verileri incelendiğinde, doğal zeminin dayanımlarının kür süreleri boyunca değişim göstermediği görülmektedir. Doğal zemine kireç ilavesiyle birlikte 7 günlük kür süresi sonucunda 3,2 kat, 28 günlük kür süresi sonucunda 4, 7 kat, 84 günlük kür süresi sonucunda ise 5,3 kat dayanım artışları meydana gelmiştir. Burada zemine kireç eklenmesiyle birlikte meydana gelen dayanım artışları literatür ile uyumludur.

Bozkurt (2020), tarafından yapılan çalışmada sönmüş kireç ve sönmemiş kireç ile Yalova bölgesinden alınan kil karıştırılmıştır. Hazırlanan karışımlara kıvam limitleri, piknometre, hidrometre, kompaksiyon, serbest basınç, CBR ve plaka yükleme deneyleri uygulanmıştır. 1,7 ve 28 günlük kür süreleri sonunda katkısız kile göre katkılı kilin serbest basınç mukavemet değerlerinde daha iyi sonuçlara ulaşılmıştır.

Duman (2020), çalışmasında düşük plastisiteli kil ile %0, %5, %10, %15, %20 oranlarında Midyat taşı atığı ile kirecsiz ve optimum oranda kireç ile hazırlanan karışımların durabilite ve dayanım özellikleri incelenmiştir. Deneyler sonucunda Midyat taşı atığının tek başına etkin sonuçlar vermediği, kireç ile kombinasyonun iyileştirme sağladığı gözlenmiştir.

Çelik (2020), çalışmasında pomza taşının ham ve inceltilmiş halde kireçli/kireçsiz ilave edilerek düşük plastisiteli kil bir zeminin stabilizasyonunu incelemiştir. Hazırlanan karışımlara kıvam limitleri, kompaksiyon, serbest basınç, ıslanma – kuruma periyodu ve donma- çözülme deneyleri yapılmıştır. 7, 28 ve 84 günlük kür sürelerinin ardından elde edilen veriler ışığında pomza taşının inceltilmesinin tek başına etkili sonuçlar vermediği, kireçli numunelerinin dayanımının daha iyi olduğu saptanmıştır.

Tablo 12. ZKY1 Karışımlarına Ait Serbest Basınç Dayanımı Deney Sonuçları

Numune / Kür süresi	Tek Eksenli Serbest Basınç Dayanımı (kPa)		
	7. gün	28.gün	84.gün
Z	115,3	115,4	115,6
ZK	364	542,8	610,5
ZKY1/5	390,8	553,3	716
ZKY1/10	403,5	655,4	806,2
ZKY1/15	315,1	638,3	705,4
ZKY1/20	280,3	618,9	690,8
ZKY2/5	560	801,9	1002,9
ZKY2/10	652,9	852	1144,9
ZKY2/15	616,2	809,1	995,2
ZKY2/20	419,4	752	869,1

7 günlük serbest basınç sonuçlarına göre en yüksek dayanım ZKY2/10 numunesinde gözlenirken, bu numune ZKY1/10 numunesinden 1,5 kat fazla dayanım göstermiştir. Z numunesine kıyasla ZKY2/10 numunesi yaklaşık 5,5 kat daha fazla dayanım göstermiştir.

28 günlük kür süresi sonunda ZKY1 karışımları arasında en yüksek dayanımın ZKY1/10 karışımlarında meydana geldiği görülmüştür. ZKY2 karışımları arasında en yüksek dayanım ZKY2/10 karışımlarında meydana geldiği görülmüştür. %10 oranında ince öğütülmüş YBT atıklarının zemin ve kireçle karışımından elde edilen numune ZKY1/10, %10 oranında kalın öğütülmüş YBT atıklarının zemin ve kireç ile karışımından elde edilen numuneye ZKY2/10 kıyasla %30 daha fazla dayanım göstermiştir. ZKY2/10 numunesi 852 kPa değerine ulaşmış ve Z numunesine göre yaklaşık 7 kat daha fazla dayanıma ulaşmıştır.

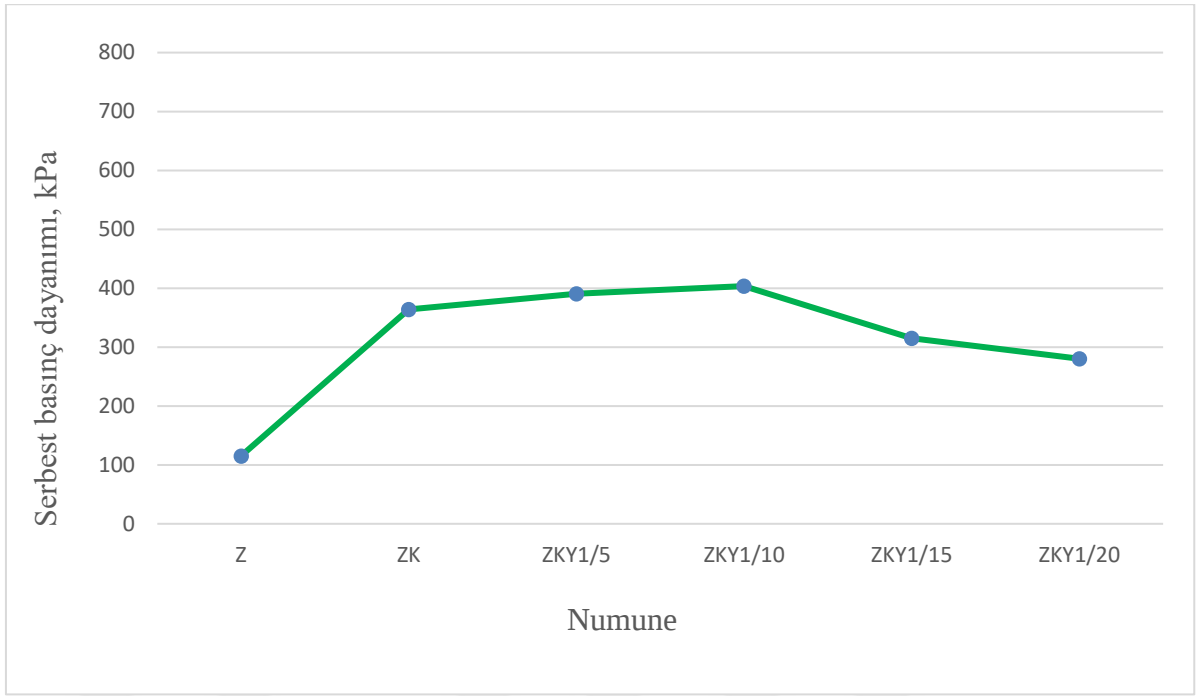
Desikatörde 84 gün kür edilen karışımların tek eksenli basınç dayanım testi sonuçlarda ise en yüksek dayanımı ZKY2/10 karışımının gösterdiği tespit edilmiştir. Bu değer ile ZKY2/10 numunesi Z numunesine kıyasla 84 günlük kür sonrasında dayanımı 10 kat daha fazla dayanım göstermiştir.

İnce daneli YBT atıklarını eklenerek oluşturulan ZKY1 numuneleri ile iri atıklarını

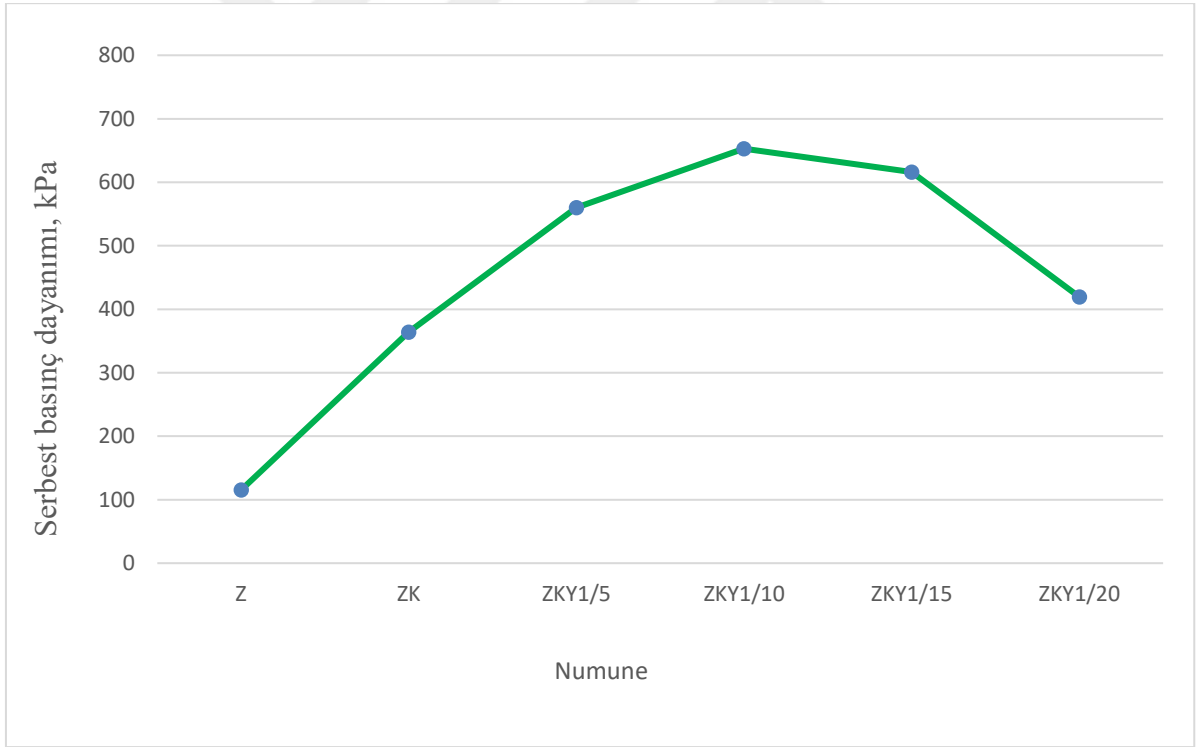
eklenerek oluşturulan ZKY2 numunelerinin serbest basınç dayanımı verileri karşılaştırıldığında, maksimum dayanımlarının %10 YBT atığı katılarak oluşturulan karışımlarda meydana geldiği tespit edilmiştir. Buna göre bu çalışma kapsamında optimum YBT atığı oranının %10 olduğu ifade edilebilir. 7 günlük kür süresi sonucunda ZKY2/10 numunesi ZKY1/10 numunesine göre %61, 28 günlük kür süresi sonucunda ZKY2/10 numunesi ZKY1/10 numunesine göre %30, 84 günlük kür süresi sonucunda ZKY2/10 numunesi ZKY1/10 numunesine göre %42 dayanım artışı göstermiştir. Burada meydana gelen dayanım artışları YBT atıklarının öğütülerek inceleneli olarak kullanılmasının, serbest basınç etkisi açıkça ortaya koymaktadır. 7, 28 ve 84 günlük kür sonunda elde edilen dayanım verilerinden çıkarılabilecek diğer bir sonuç ise, ZKY1 numunelerinin maksimum dayanımlarının, ZKY2 numunelerinin minimum dayanımlarından düşük olmasıdır. Bu sonuç, bir başka açıdan YBT atıklarının öğütülerek kullanılmasının ve durum neticesinde meydana gelen serbest basınç dayanımları üzerindeki incelik etkisinin ne kadar etkin olduğunu ortaya koymaktadır.

Kocabey (2019), düşük plastisiteli killerin kireçle stabilizasyonunda inceliğin etkisini araştırdığı çalışmada, 28 günlük kür süresi sonrası %6 kireç içeren öğütülmemiş SL6 ve öğütülmüş SGL6 karışımları ile en yüksek dayanım değerlerine ulaşmıştır. SGL6 numunesi SL6 numunesine göre %23,6 daha fazla dayanıma ulaşarak inceliğin dayanıma olan etkisini göstermiştir. Yılmaz (2015), doktora çalışmada tüfit taşların zemin stabilizasyonunda kireçle birlikte kullanılabilirliğini araştırmıştır. Serbest basınç dayanımı değerlerine göre durabilite tetkiklerine göre %10 yeşil BT atığı içeren kireçli ZKY10 karışımları maksimum değerleri vermiştir. İncelenen literatür çalışmaları da serbest basınç sonuçlarını destekler niteliktedir.

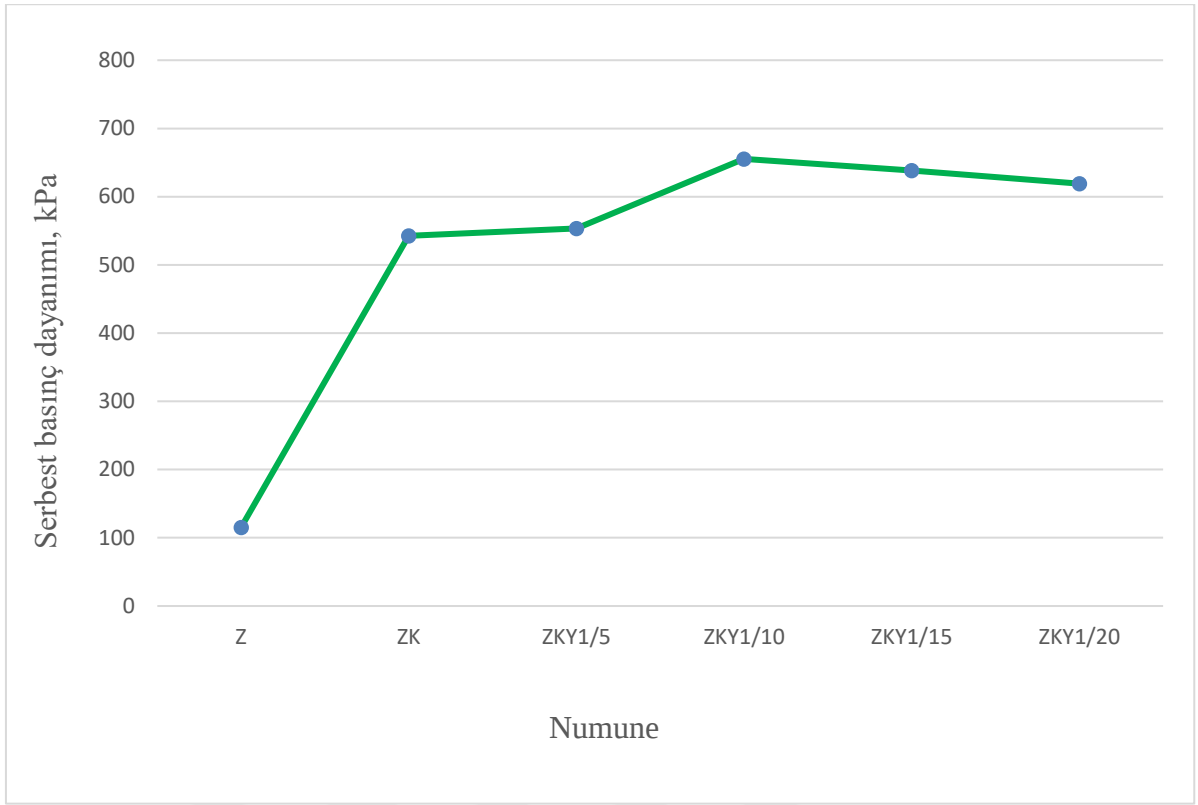
Tablo 12 incelendiğinde kür süreleri değişse de tek eksenli serbest basınç deneylerine göre ZKY2 grubunun ZKY1 grubuna göre daha iyi sonuçlar verdiği tespit edilmiştir. Numunelerin 7, 28 ve 84 günlük kür sonrası serbest basınç testi verileri Şekil 21, 22, 23, 24, 25, 26'da kür sürelerine göre ZKY1 ve ZKY2 numunelerinin serbest basınç dayanımlarının karşılaştırılması sunulmaktadır. Şekil 50, 51, 52'de, 7, 28 ve 84 günlük kür süreleri sonunda tüm numunelerin serbest basınç dayanımlarının karşılaştırılması Şekil 53'te sunulmuştur.



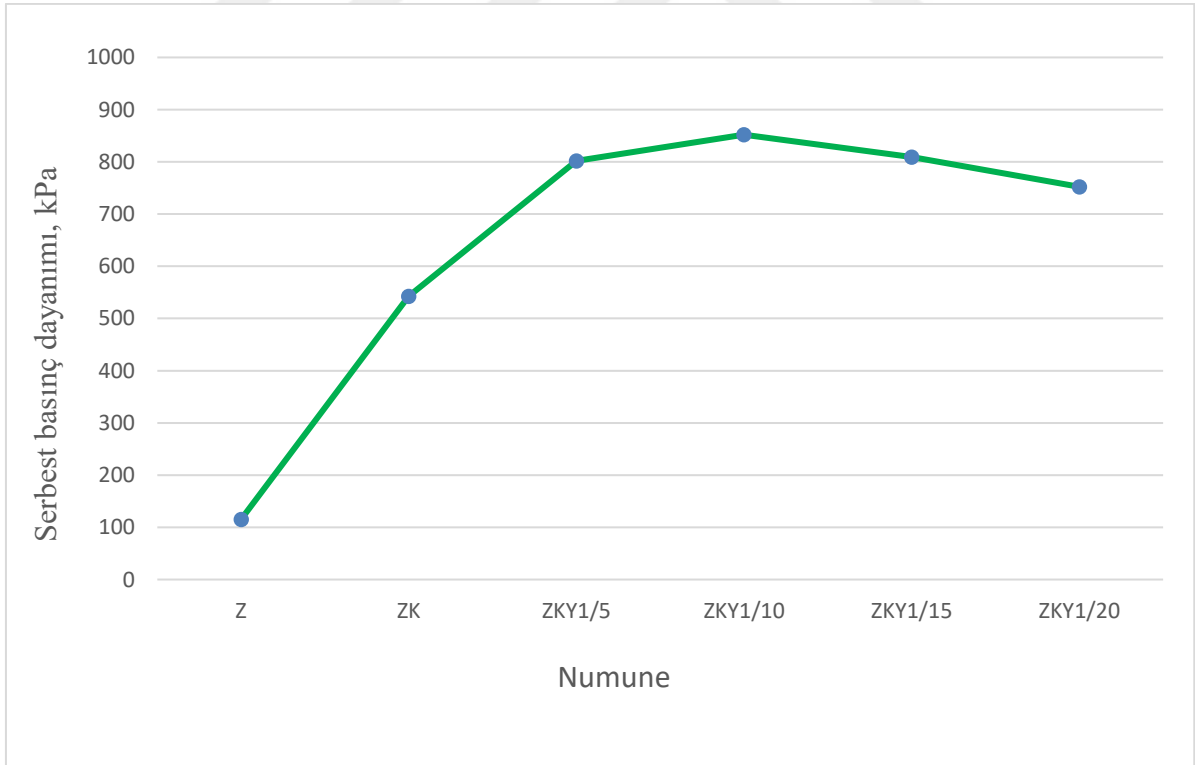
Şekil 21. ZKY1 numunelerinin 7 günlük kür sonrası serbest basınç dayanımları.



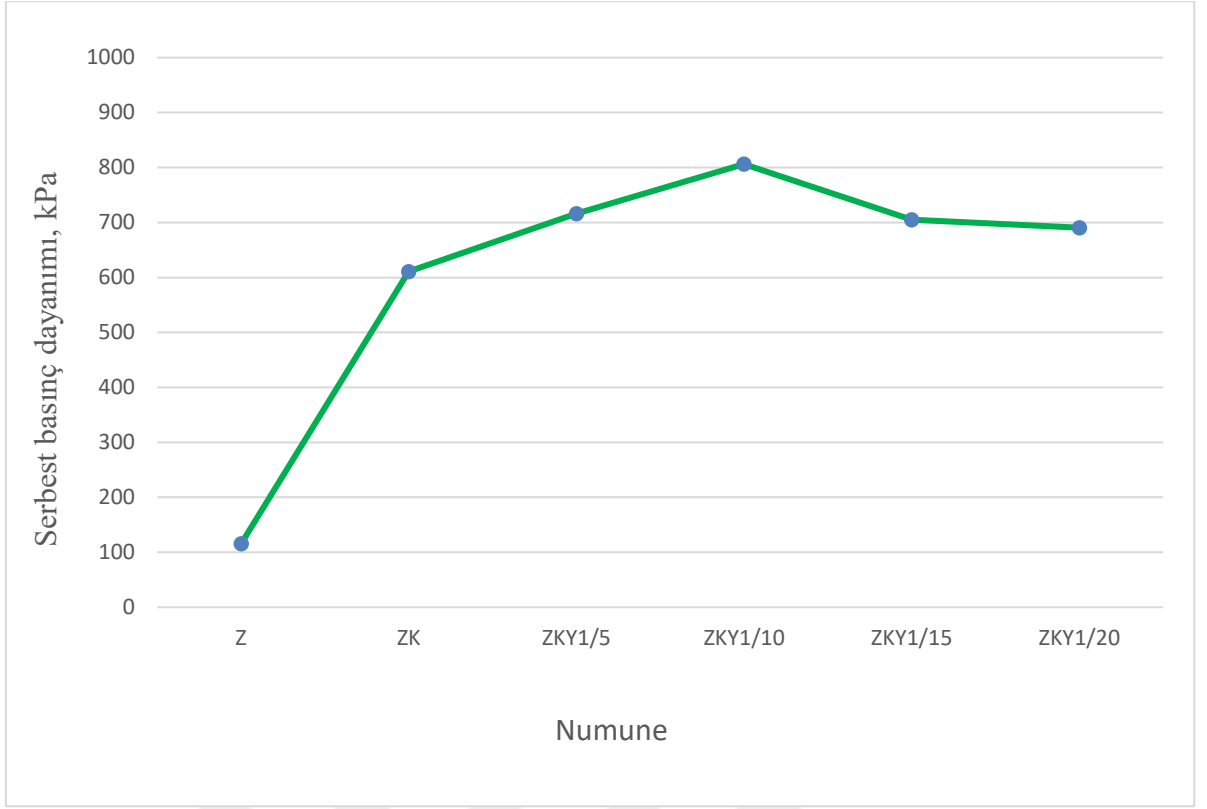
Şekil 22. ZKY2 numunelerinin 7 günlük kür sonrası serbest basınç dayanımları.



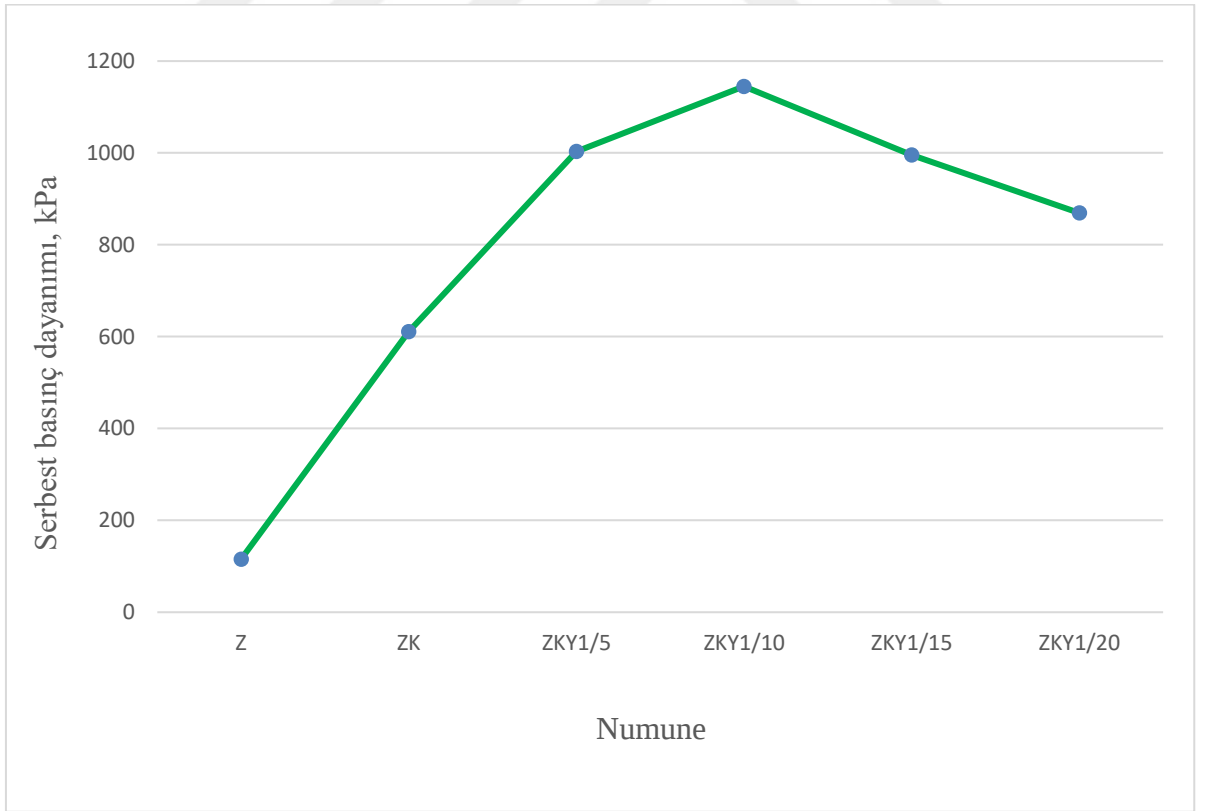
Şekil 23. ZKY1 numunelerinin 28 günlük kür sonrası serbest basınç dayanımları.



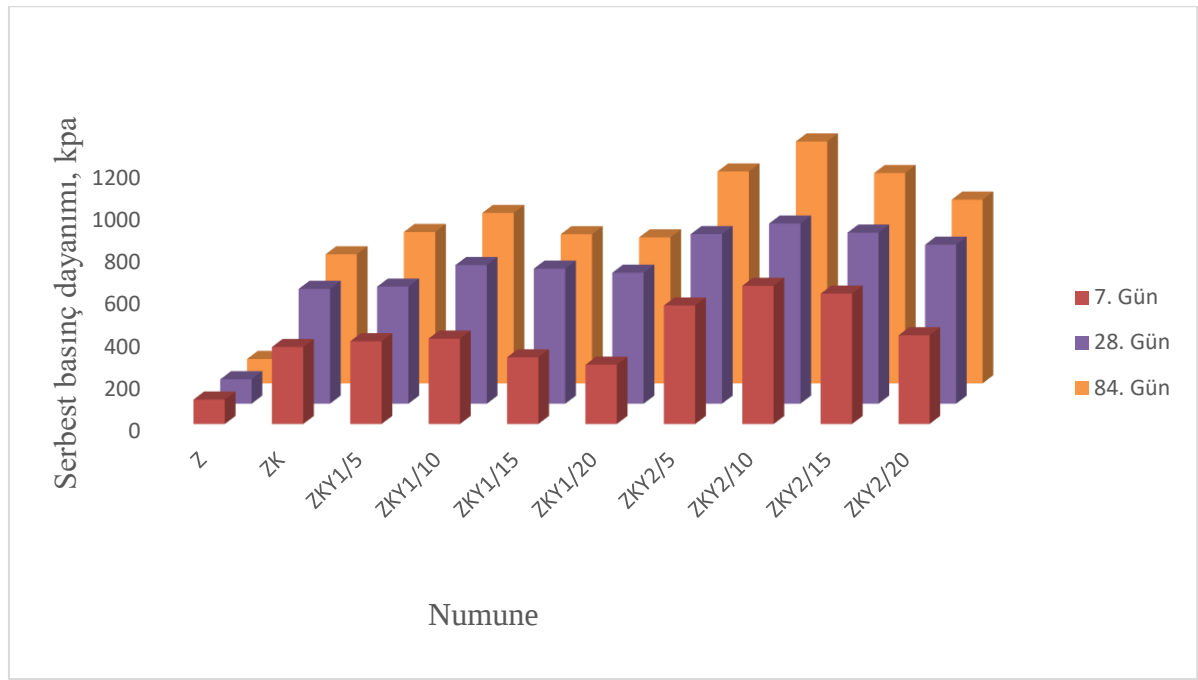
Şekil 24. ZKY2 numunelerinin 28 günlük kür sonrası serbest basınç dayanımları.



Şekil 25. ZKY1 numunelerinin 84 günlük kür sonrası serbest basınç dayanımları.



Şekil 26. ZKY2 numunelerinin 84 günlük kür sonrası serbest basınç dayanımları.



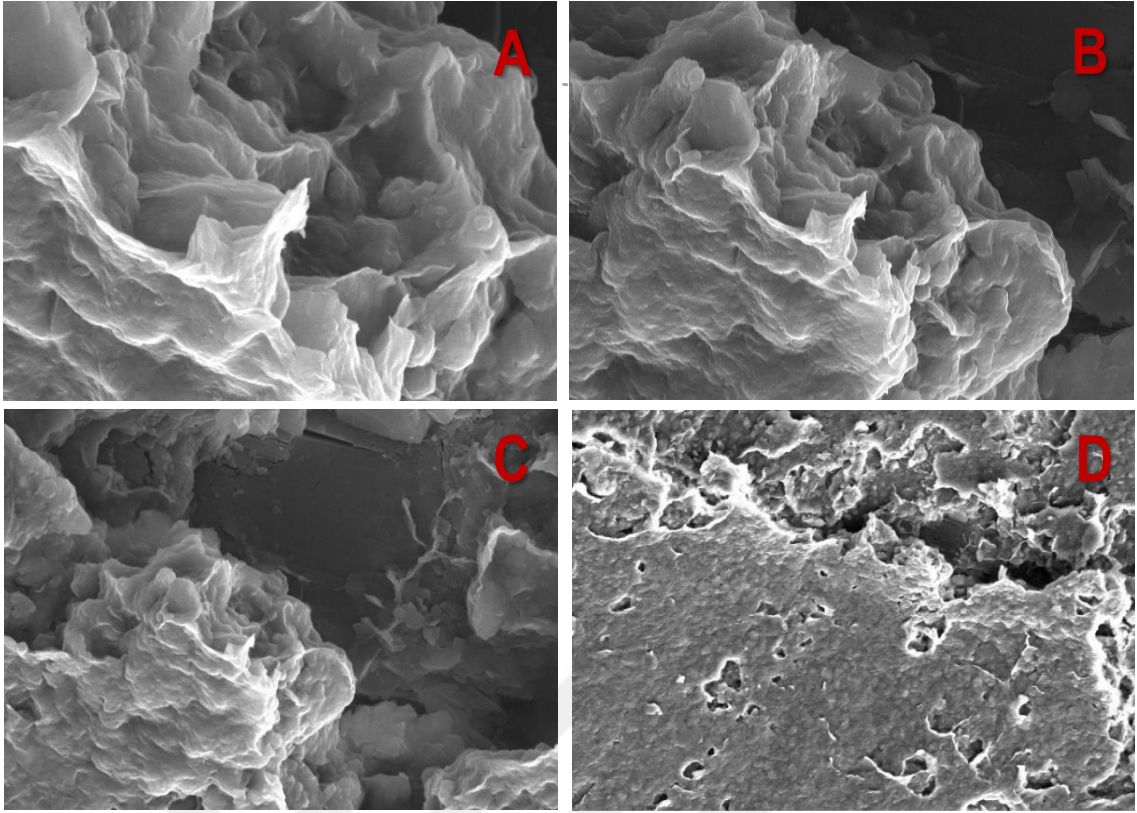
Şekil 27. Z, ZK, ZKY1 ve ZKY2 numunelerinin 7, 28 ve 84 günlük serbest basınç dayanımlarının karşılaştırılması.

Taramalı Elektron Mikroskobu Deneyi

Taramalı elektron mikroskobu deneyi iki aşamada gerçekleştirilmiştir. İlk aşama numune hazırlama aşamasıdır. Bu aşamada kesme cihazı ile alüminyum ve elmas uçlu bıçakla numunelerin büyüklüğü uygun hale getirilir. Kalıplama cihazı ile parlatma işleminde veya mikroskoba monte etme işleminde zorluk çekilecek küçük numuneler kalıplanarak otomatik parlatma diskine sığacak hale getirilir. Tez çalışması için hazırlanan numuneler iletken olmadığı için püskürtme cihazıyla iletken bir tabaka (Au) ile kaplanır. Numune bu aşamada vakum altına alınır vakum altında alındığı için numunenin özelliğine göre kaplama işlemi ortalama 15 dakika sürer. İkinci aşamada ise numuneler cihaza yerleştirilir ve 60 dakika vakumlanma sürer. Ardından numunelere ait görüntüler alınabilir.

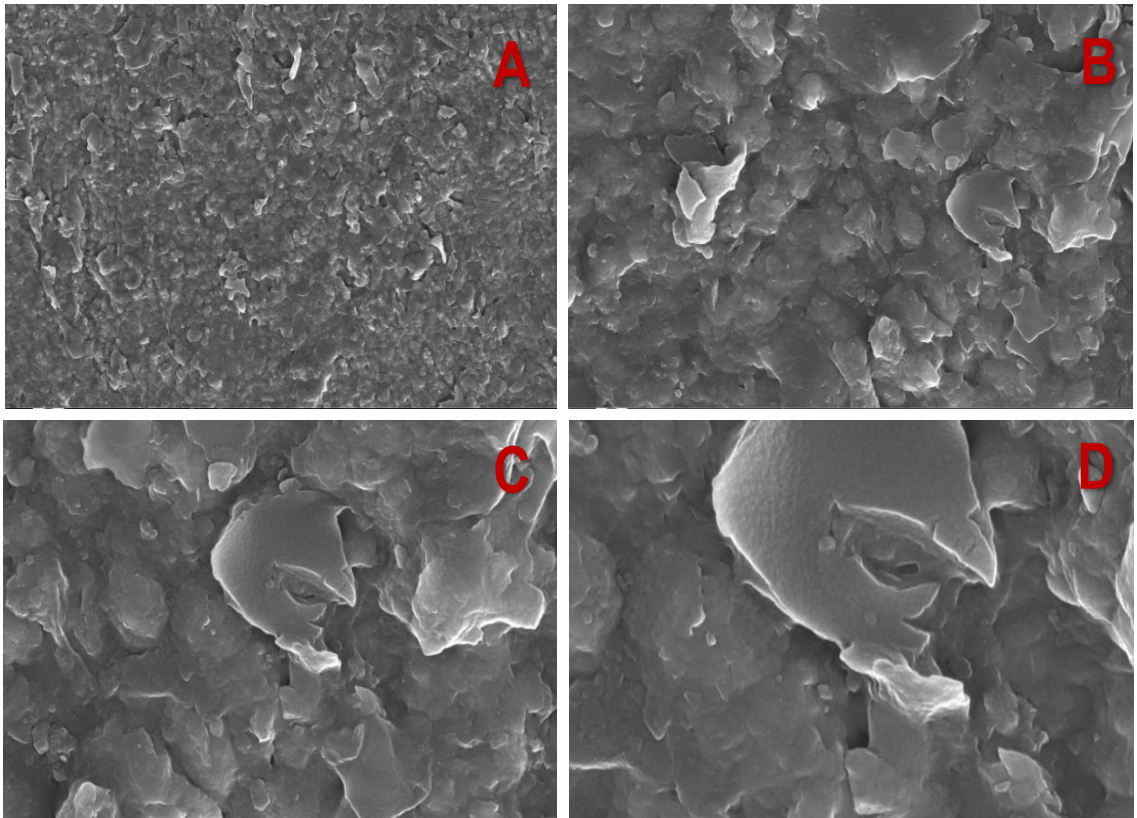
Taramalı elektron mikroskobu deneyi Z, ZK, ZKY1/10 ve ZKY2/10 karışımlarına uygulanmıştır. SEM analizinde doğal zemin ve kireçli numunenin yanı sıra %10 oranında kalın ve ince taneli YBT içeren karışımların kullanılmasının nedeni, serbest basınç dayanımı açısından en yüksek değerlerin bu numunelerden elde edilmiş olmasıdır.

Hazırlanan karışımlar 1000, 5000, 10000 ve 20000 kat büyütme yapılarak taramalı elektron mikroskobu deneyleri gerçekleştirilmiştir. Z numunelerinin SEM görüntüleri Şekil 28 ve 29'ta, ZK numunelerinin SEM görüntüleri Şekil 30 ve 31'de, ZKY1/10 numunelerinin SEM görüntüleri Şekil 32 ve 33'de, ZKY2/10 numunelerinin SEM görüntüleri Şekil 34 ve 35'te sunulmuştur.

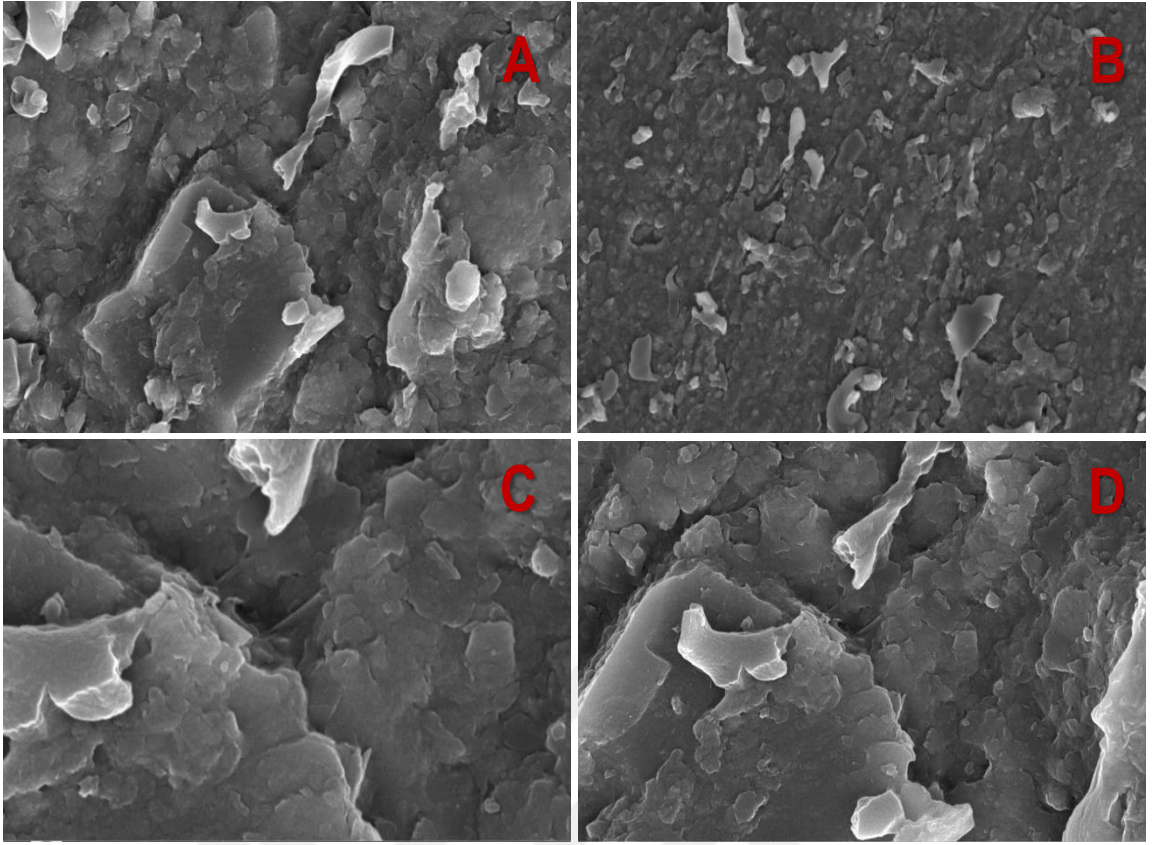


Şekil 28. Z numunelerinin 7. gün SEM görüntüleri.

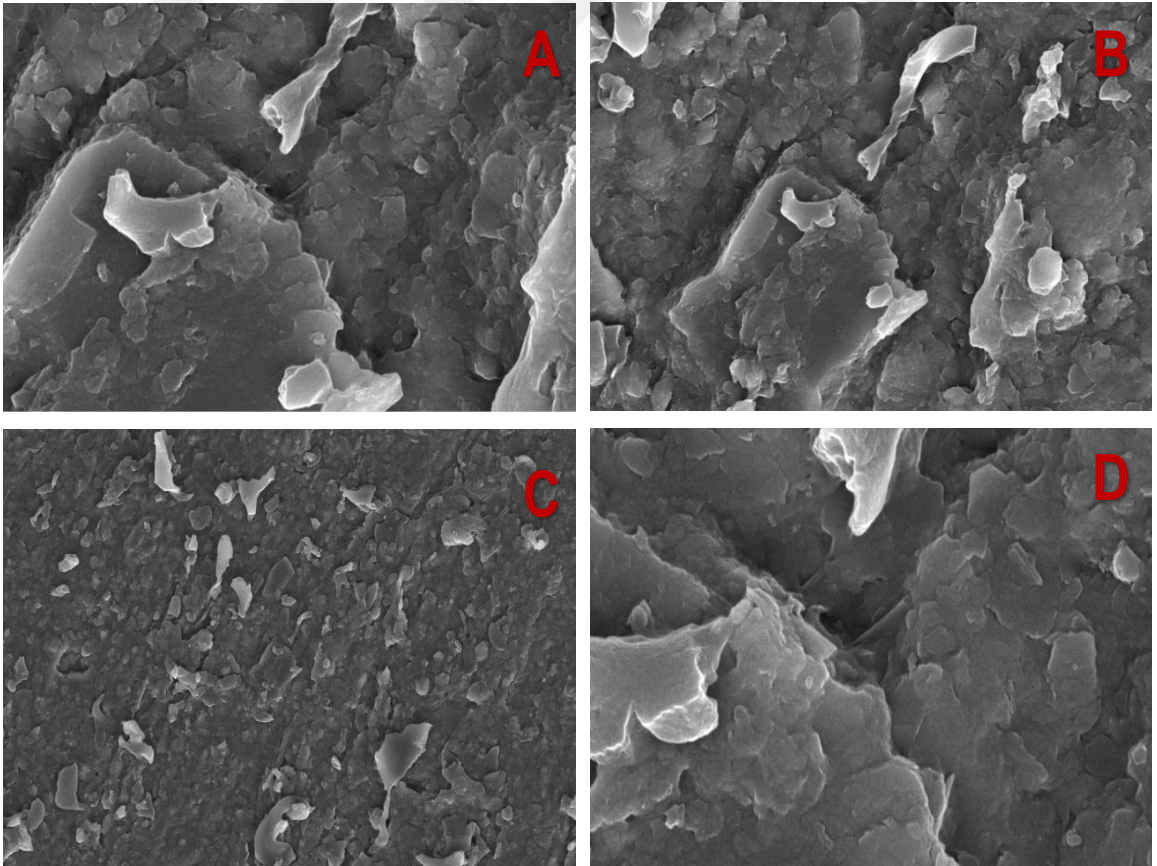
- | | |
|----------------------|---------------------|
| A) 10000 kat büyütme | C) 5000 kat büyütme |
| B) 20000 kat büyütme | D) 1000 kat büyütme |



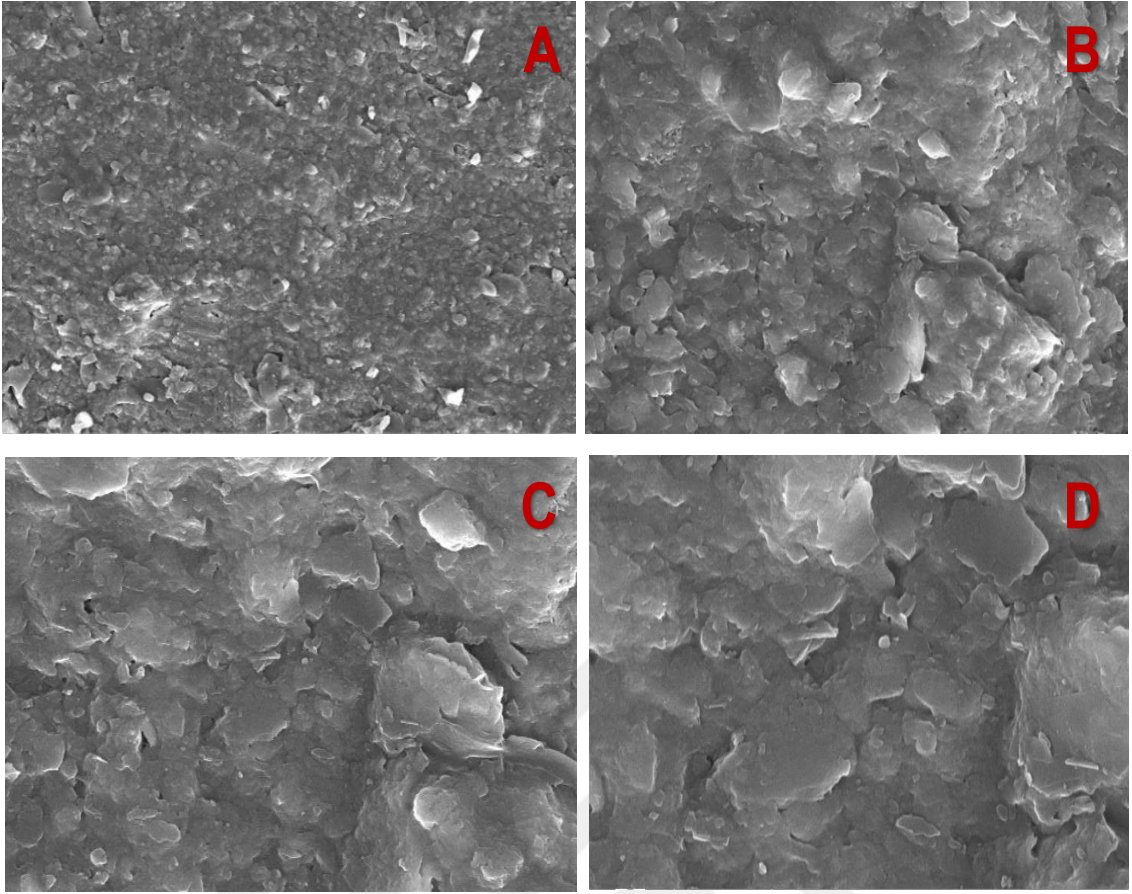
Şekil 29. Z numunelerinin 28. gün SEM görüntüleri.



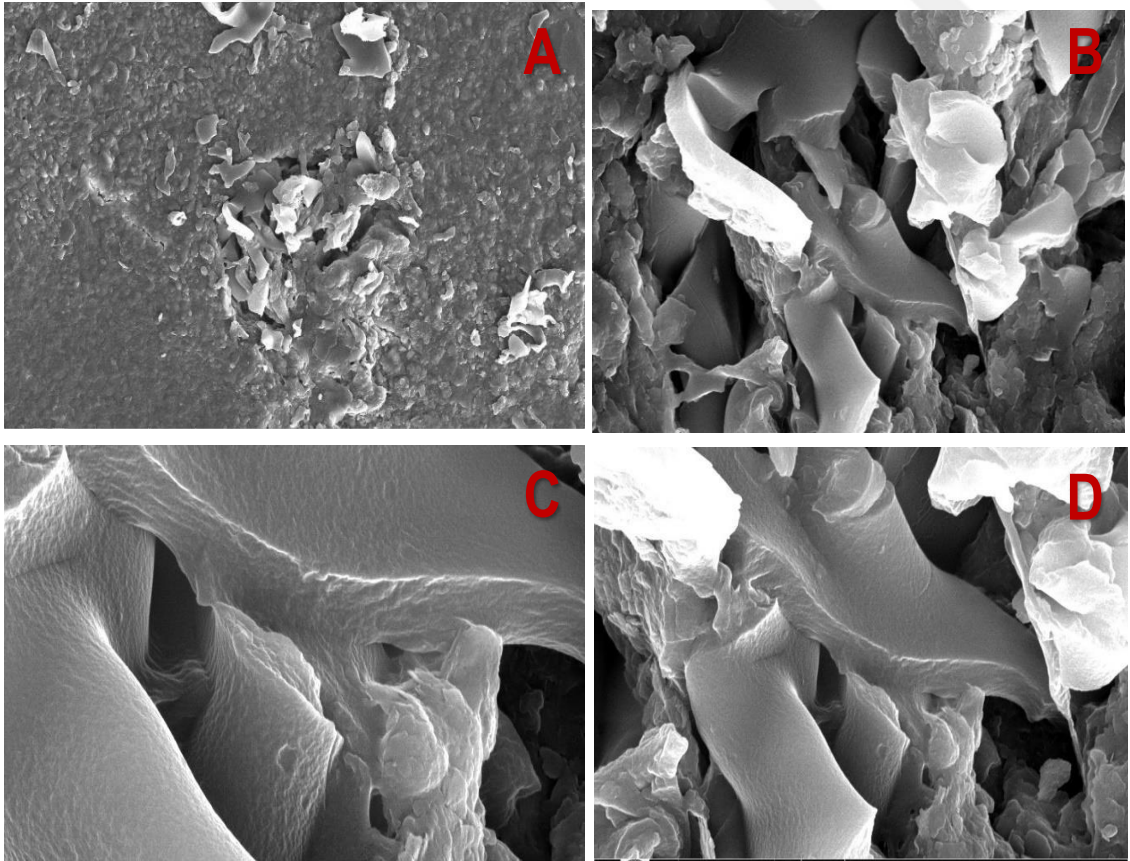
Şekil 30. ZK numunelerinin sırasıyla 7. gün SEM görüntüleri.



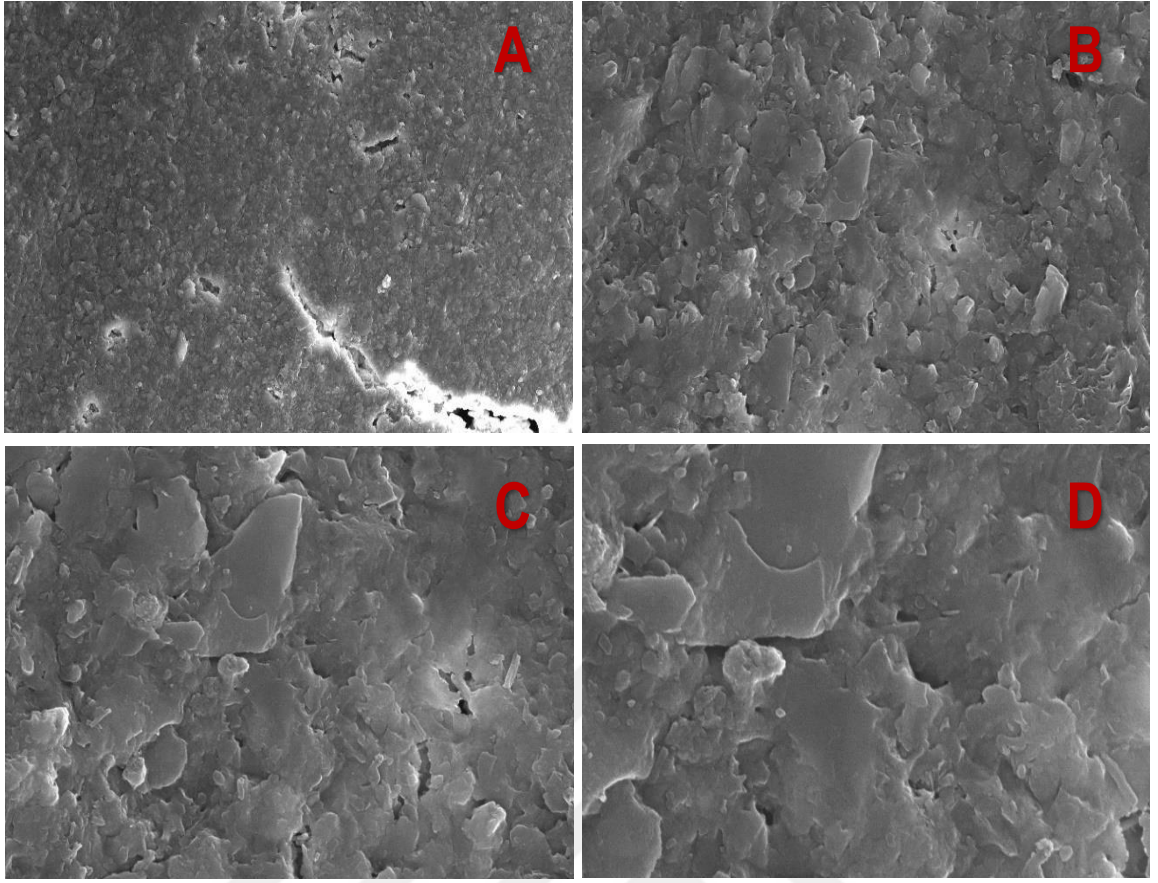
Şekil 31. ZK numunelerinin sırasıyla 28. gün SEM görüntüleri.



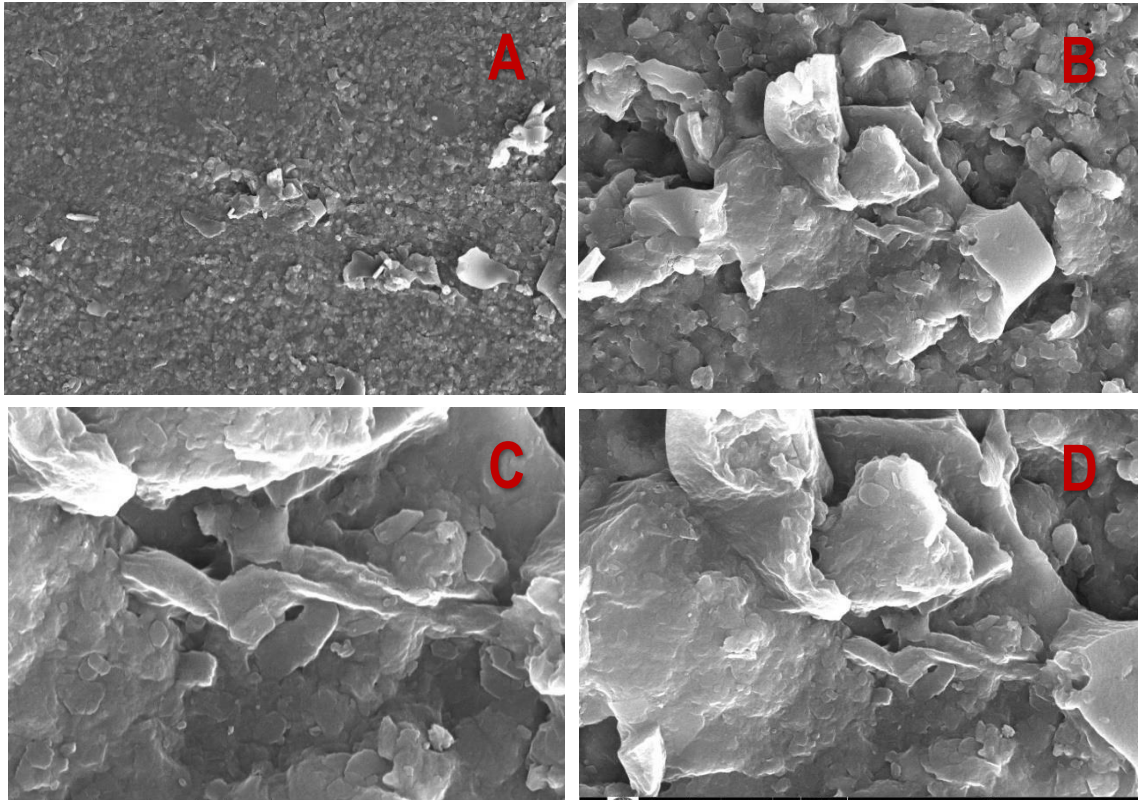
Şekil 32. ZKY1/10 numunelerinin 7. gün SEM görüntüleri.



Şekil 33. ZKY1/10 numunelerinin 28. gün SEM görüntüleri.



Şekil 34. ZKY2/10 numunelerinin 7. gün SEM görüntüleri.



Şekil 35. ZKY2/10 numunelerinin 28. gün SEM görüntüleri.

Hazırlanan karışımlar üzerinde yapılan mikroskopik analiz, numunelerin morfolojisindeki farklılıkları göstermektedir. Hazırlanan karışımlar 7 günlük kür süresi sonucunda morfolojik farklılıklar saptanmıştır. Diğer numunelerden farklı olarak Z numunesinde topaklı bir dizilim gözlenmiştir. ZK, ZKY1/10 ve ZKY2/10 karışımlarında morfolojik yapının tamamen değiştiği, bununla birlikte yapının daha sıkı bir hal aldığı gözlenmiştir. Elde edilen bu görüntüler serbest basınç dayanımı verilerini de destekler niteliktedir. Z numunesinin 7 ve 28 günlük görüntülerinde ciddi farklılıklar gözlenmemiştir.

Numunelerin genel anlamda 7 ve 28 günlük kür süreleri kıyaslandığında Z karışımının daha sürekli, ZK karışımının ise daha az sürekli olduğu belirlenmiştir. Kür süresinin artması ile fiziksel bağın iç içe geçmesi meydana gelmiş, ZKY2/10 karışımının ZKY1/10 karışımına göre daha sürekli olduğu tespit edilmiştir.

X- Işını Kırınım Cihazı (XRD)

Hazırlanan numunelerden alınan örnekler XRD incelemelerine tabi tutulmak üzere hava ile teması kesilerek vakumlu poşette muhafaza edilmiş ve analizin yapılacağı Bayburt Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarına götürülmüştür.

Z numunesi 7 günlük XRD analizinde silikon oksitin hakim yapıda olduğu görülmüştür. Analizde SiO_2 'i oluşturan bileşenlerin varlığı da dikkat çekmektedir. Z numunesinin 7 günlük XRD analizinde, 28 günlük XRD analizine kıyasla OK elementinin yoğunluğunun %3,87 azaldığı SiK elementinin ise %8,27 arttığı görülmüştür.

Z numunesine ait 7 günlük ve 28 günlük analiz sonuçları Tablo 13'de, 7 ve 28 güne ait XRD analizinin karşılaştırılması Şekil 36'te sunulmuştur.

ZK numunesi 7 günlük XRD analizinde Z numunesinde olduğu gibi silikon oksitin hakim yapıda olduğu görülmüştür. ZK numunesinin 7 günlük XRD analizinde, 28 günlük XRD analizine kıyasla OK elementinin yoğunluğunun %5,54 azaldığı SiK elementinin ise %9,87 arttığı görülmüştür.

ZK numunesine ait 7 günlük ve 28 günlük analiz sonuçları Tablo 14'de, 7 ve 28 güne ait XRD analizinin karşılaştırılması Şekil 37'de sunulmuştur.

ZKY1/10 numunesi 7 günlük XRD analizinde Z ve ZK numunesinde olduğu gibi silikon oksitin hakim yapıda olduğu görülmüştür. Bunların yanı sıra kalsit, kaolinit ve glokonit pikleri görülmüştür. ZKY1/10 numunesinin 7 günlük XRD analizinde, 28 günlük XRD analizine kıyasla OK elementinin yoğunluğunun %1,71, SiK elementinin ise %9,4 arttığı görülmüştür.

ZKY1/10 numunesine ait 7 günlük ve 28 günlük analiz sonuçları Tablo 14’de, 7 ve 28 güne ait XRD analizinin karşılaştırılması Şekil 38’te sunulmuştur.

ZKY2/10 numunesi 7 günlük XRD analizinde Z, ZK ve ZKY1/10 numunesinde olduğu gibi silikon oksitin hakim yapıda olduğu görülmüştür. Bunların yanı sıra kalsit, kaolinit ve glokonit pikleri görülmüştür. ZKY2/10 numunesinin 7 günlük XRD analizinde, 28 günlük XRD analizine kıyasla OK elementinin yoğunluğunun %5,45 azaldığı SiK elementinin ise %6,53 arttığı görülmüştür.

ZKY2/10 numunesine ait 7 günlük ve 28 günlük analiz sonuçları Tablo 14’de, 7 ve 28 güne ait XRD analizinin karşılaştırılması Şekil 39’da sunulmuştur.

Tablo 13. Z Numunesine Ait 7 ve 28 Günlük Analiz Sonuçları

Element	7 GÜN		28 GÜN	
	Ağırlık %	Atom %	Ağırlık %	Atom %
O K	43,39	58,84	39,52	55,12
Mg K	2,68	2,39		
Al K	13,68	11	11,66	9,64
Si K	28,78	22,24	37,05	29,44
Ca K	7,05	3,81	6,98	3,89
Fe K	4,43	1,72	4,8	1,92

Tablo 14. ZK Numunesine Ait 7 ve 28 Günlük Analiz Sonuçları

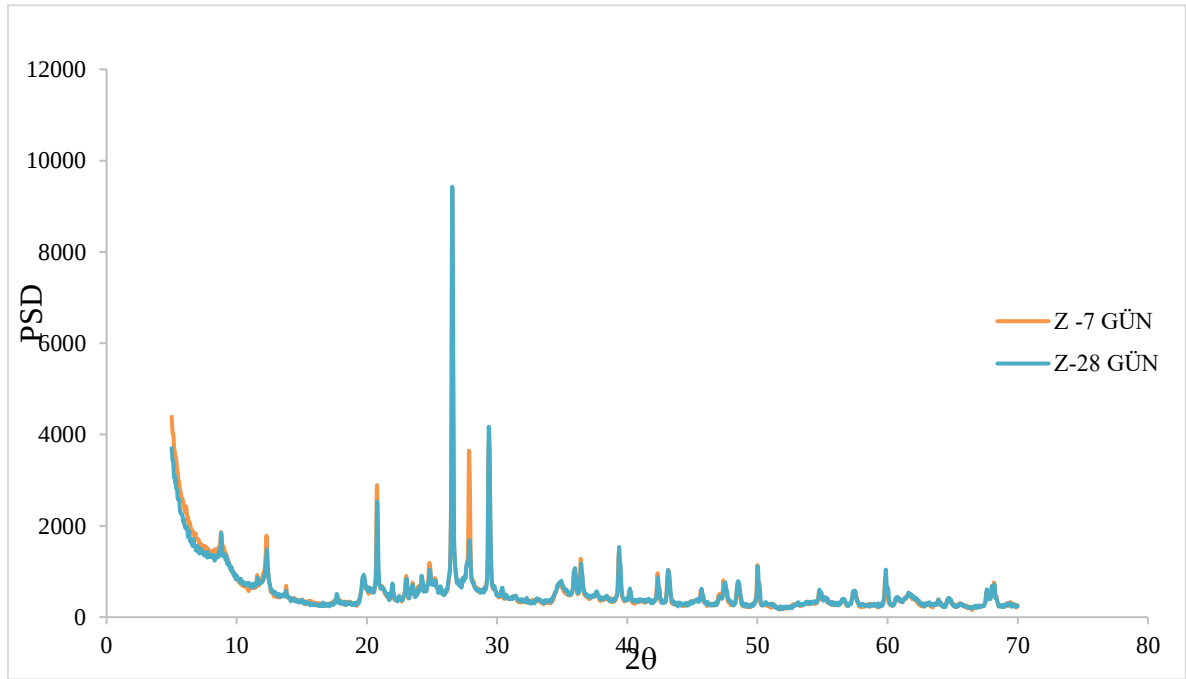
Element	7 GÜN		28 GÜN	
	Ağırlık %	Atom %	Ağırlık %	Atom %
O K	39,52	55,12	45,06	60,87
Mg K			2,42	2,15
Al K	11,66	9,64	11,22	8,99
Si K	37,05	29,44	27,18	20,91
Ca K	6,98	3,89	10,57	5,7
Fe K	4,8	1,92	3,54	1,37

Tablo 15. ZKY1/10 Numunesine Ait 7 ve 28 Günlük Analiz Sonuçları

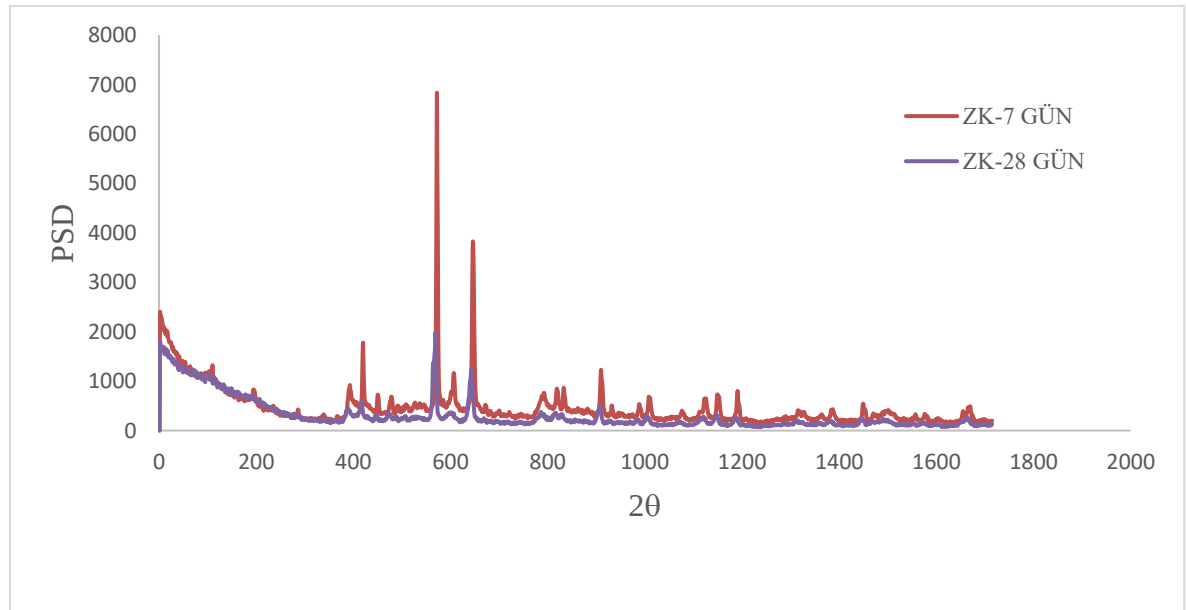
Element	7 GÜN		28 GÜN	
	Ağırlık %	Atom %	Ağırlık %	Atom %
C K			16,21	25,44
O K	42,38	58,1	40,67	47,93
Mg K	2,09	1,88	1,79	1,39
Al K	12,07	9,81	9,22	6,45
Si K	30,2	23,59	20,8	13,96
Ca K	9,09	4,98	7,65	3,6
Fe K	4,17	1,64	3,67	1,24

Tablo 16. ZKY2/10 Numunesine Ait 7 ve 28 Günlük Analiz Sonuçları

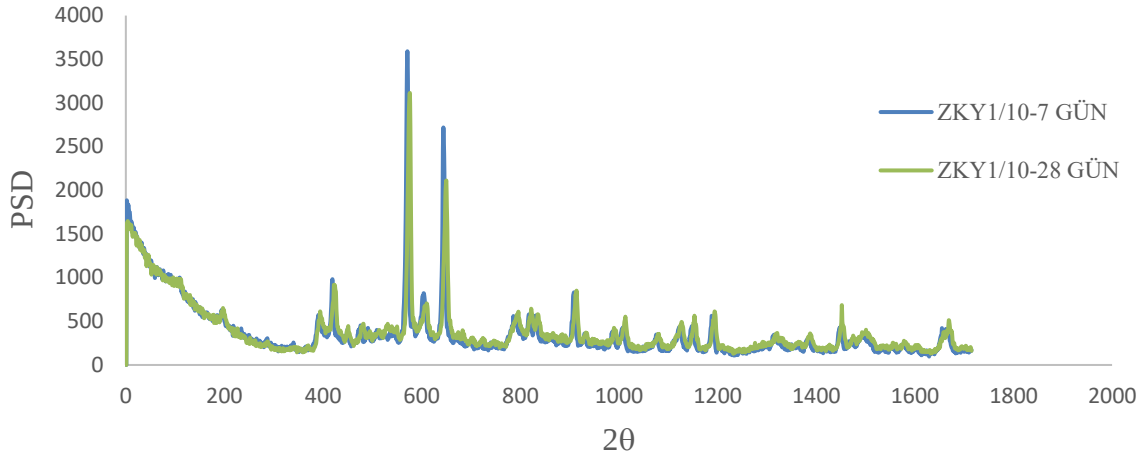
Element	7 GÜN		28 GÜN	
	Ağırlık %	Atom %	Ağırlık %	Atom %
O K	38,51	54,61	43,96	60,37
Mg K	1,63	1,52	2,5	2,26
Al K	13,31	11,2	10,55	8,59
Si K	31,04	25,08	24,51	19,18
Ca K	8,09	4,58	15,09	8,27
Fe K	7,42	3,02	3,39	1,33



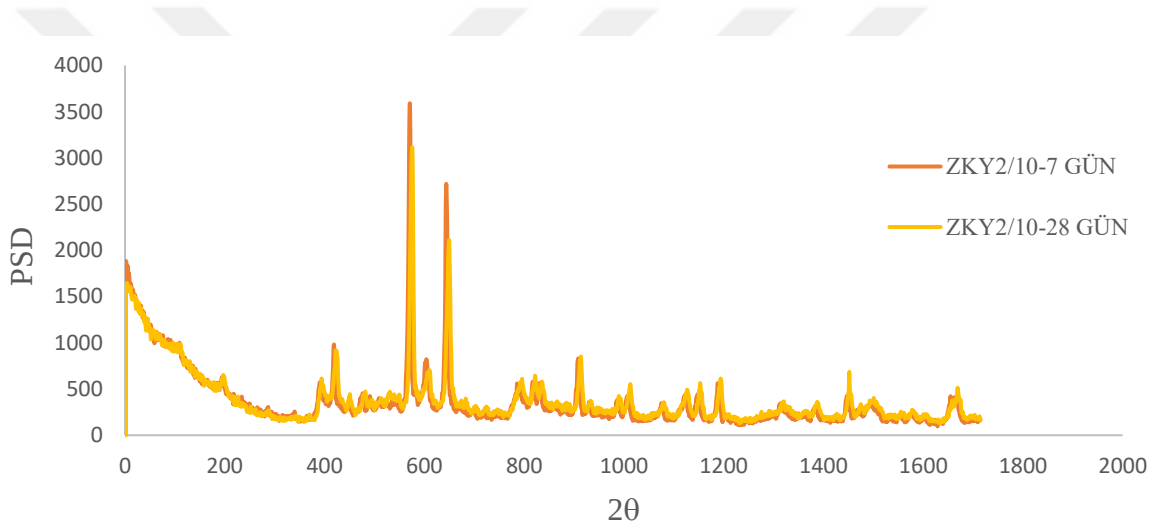
Şekil 36. Z numunesinin 7 ve 28 günlük XRD analizi.



Şekil 37. ZK numunesinin 7. ve 28. Günlük XRD analizi.



Şekil 38. ZKY1/10 numunesinin 7. ve 28. Günlük XRD analizi.



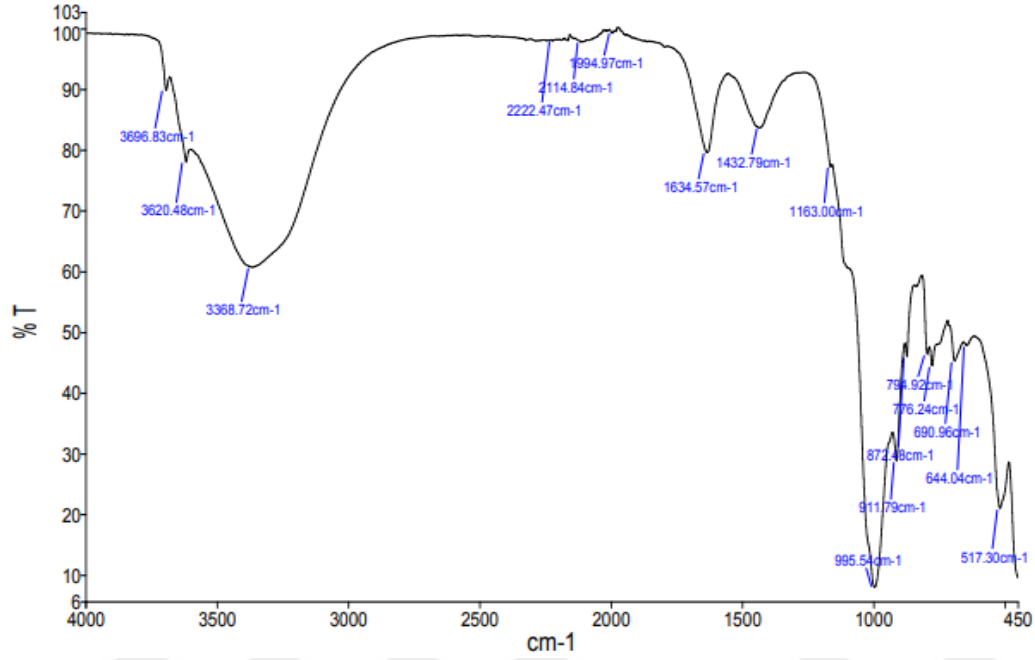
Şekil 39. ZKY2/10 numunesinin 7. ve 28. Günlük XRD analizi.

Fourier Dönüşümü Kızılötesi Spektroskopisi (FT-IR).

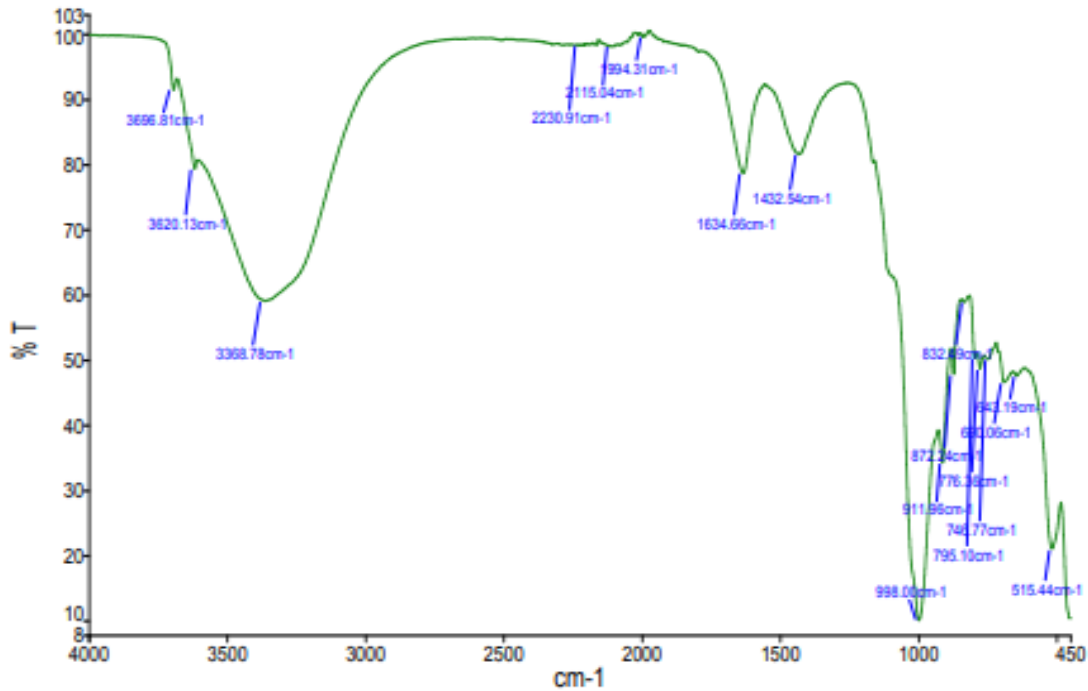
Fourier dönüşümü kızılötesi spektroskopisi Z, ZK, ZKY1/10 ve ZKY2/10 numuneleri için 7 ve 28 günlük kür süreleri sonunda alınmıştır. Numunelerin FT-IR spektrumu ölçümü 450-4000 cm^{-1} dalga boyu aralığında yapılmıştır. Spektrumdaki titreşimler anlaşılır, temizdir. Spektrumdaki titreşimler yalnızca numuneden kaynaklanan titreşimlerdir.

FT-IR spektrumları incelendiğinde 3696.83 cm^{-1} , 3620.48 cm^{-1} , 3368.72 cm^{-1} dalga boyundaki titreşimlerde OH kovalent bağındaki gerilmeler; 1432.79 cm^{-1} , 1163.00 cm^{-1} dalga boyundaki titreşimde CH_3 , CO_3 'ın gerilme titreşimleri görülmektedir. 1400-450 cm^{-1} arası parmak izi bölgesi olarak adlandırılır. Bu bölgede 995.54 cm^{-1} , 911.79 cm^{-1} piklerinde C-O, C-N ve Si-O bağları görülmektedir. 776.24 cm^{-1} pikindeki titreşimlerde ise Al_2OH görülmektedir.

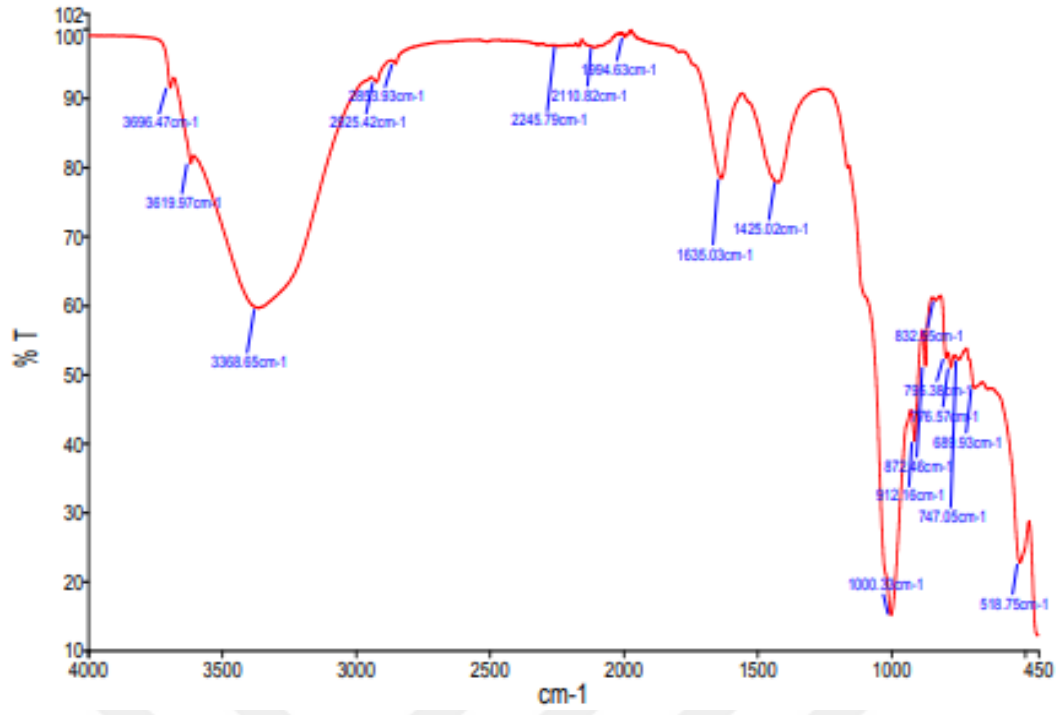
Z numunesine ait 7. Gün FT-IR spektrumu Şekil 40'ta, Z numunesine ait 28. Gün FT-IR spektrumu Şekil 41'de, ZK numunesine ait 7. Gün FT-IR spektrumu Şekil 42'de, ZK numunesine ait 28. Gün FT-IR spektrumu Şekil 43'de, ZKY1/10 numunesine ait 7. Gün FT-IR spektrumu Şekil 44'te, ZKY1/10 numunesine ait 28. Gün FT-IR spektrumu Şekil 45'de, ZKY2/10 numunesine ait 7. Gün FT-IR spektrumu Şekil 46'de, ZKY2/10 numunesine ait 28. Gün FT-IR spektrumu Şekil 47'de verilmiştir.



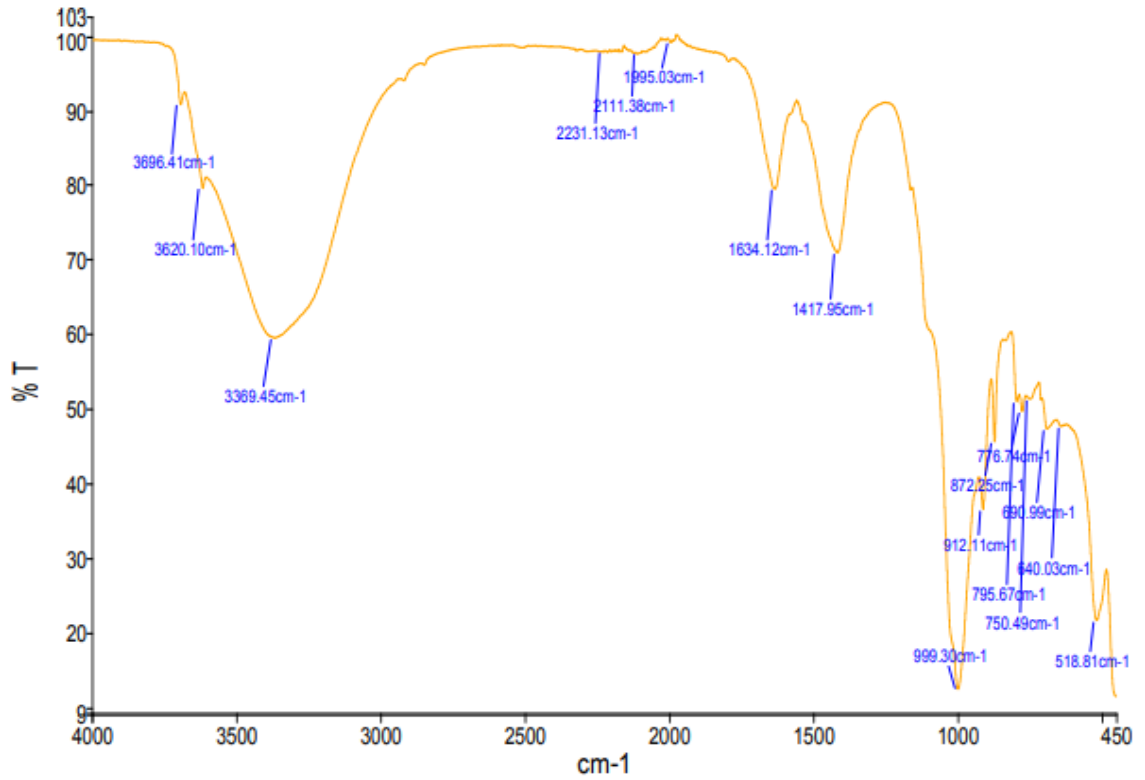
Şekil 40. Z numunesinin 7. gün FT-IR spektrumu.



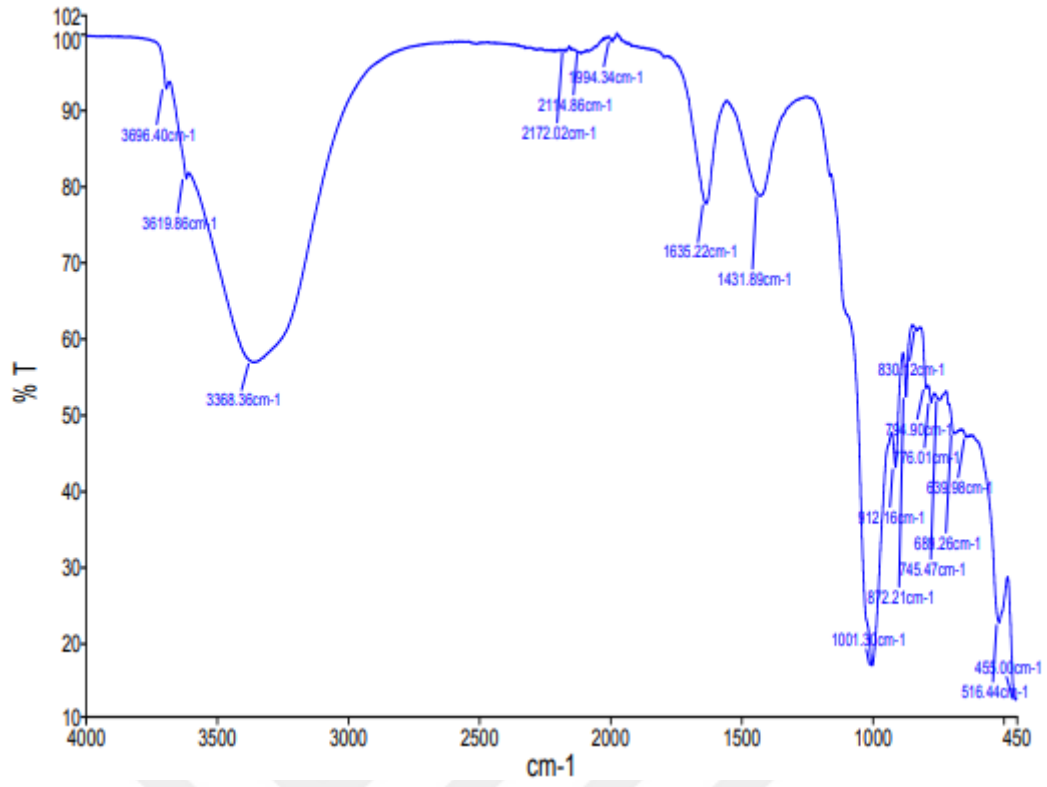
Şekil 41. Z numunesinin 28. gün FT-IR spektrumu.



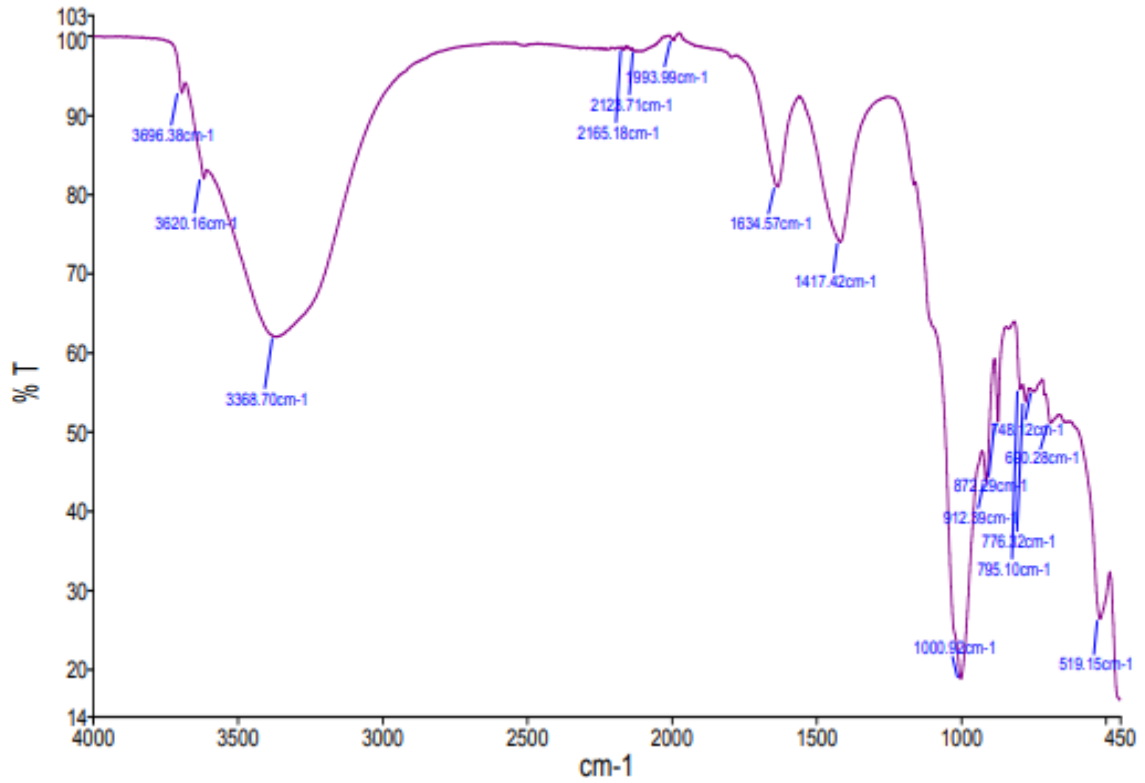
Şekil 42. ZK numunesinin 7. gün FT-IR spektrumu.



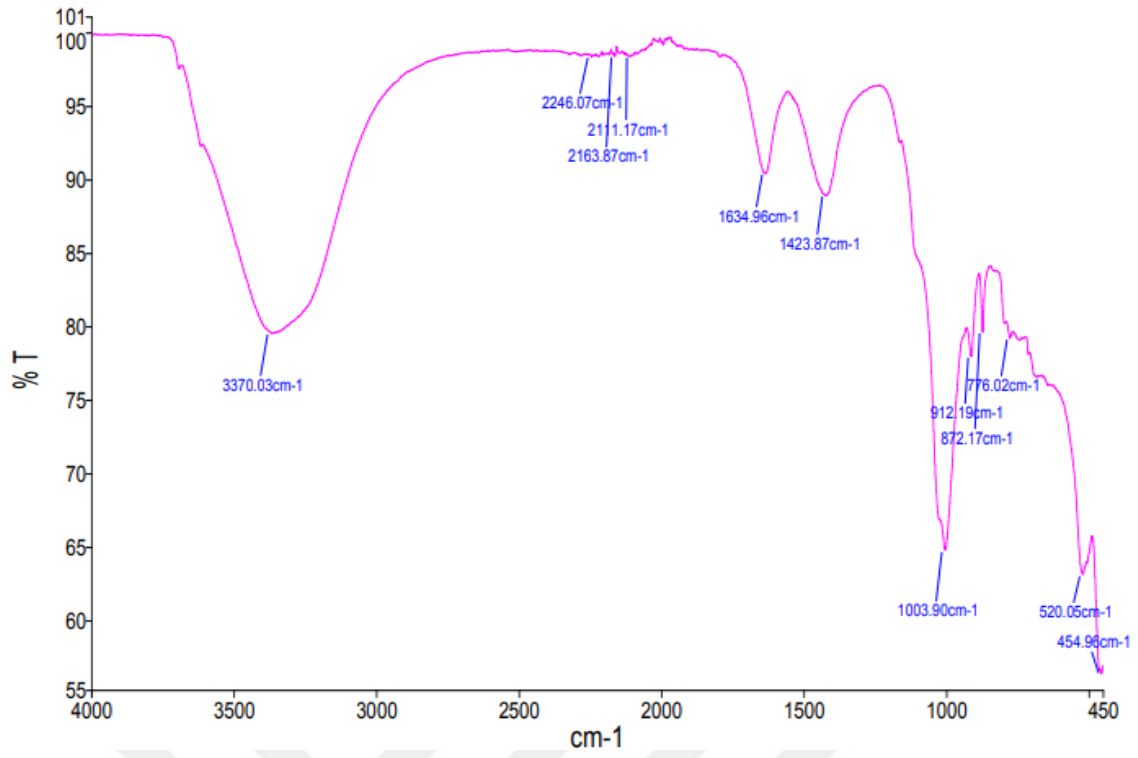
Şekil 43. ZK numunesinin 28. gün FT-IR spektrumu.



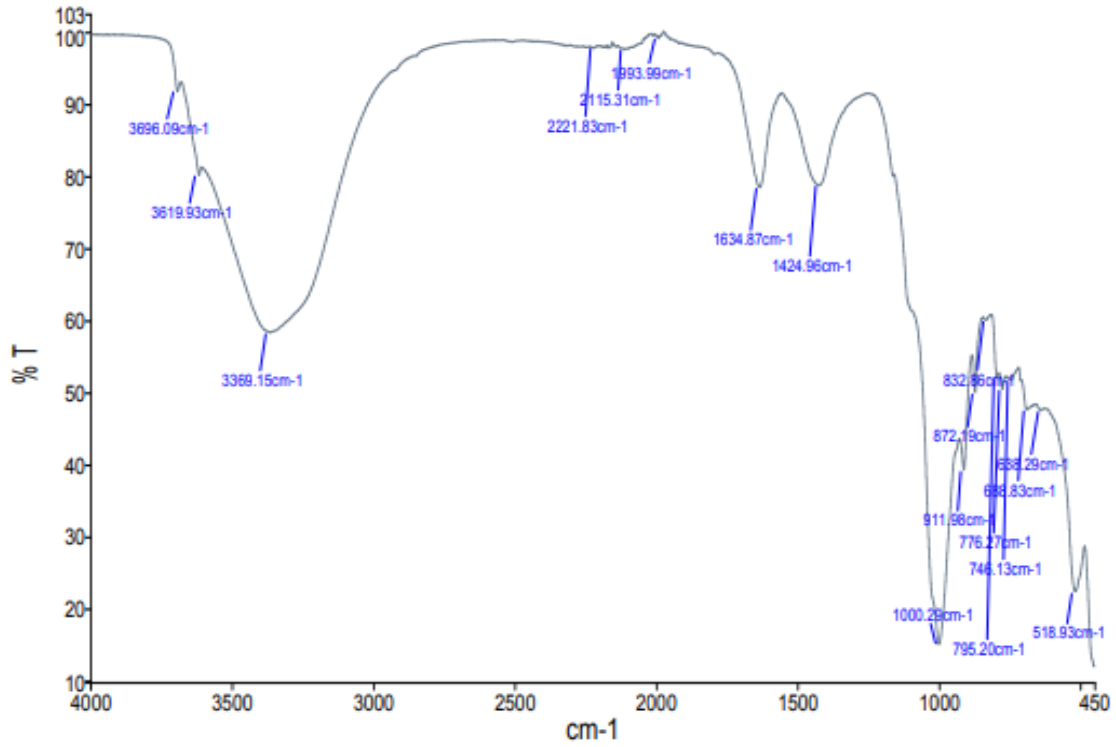
Şekil 44. ZKY1/10 numunesinin 7. gün FT-IR spektrumu.



Şekil 45. ZKY1/10 numunesinin 28. gün FT-IR spektrumu.

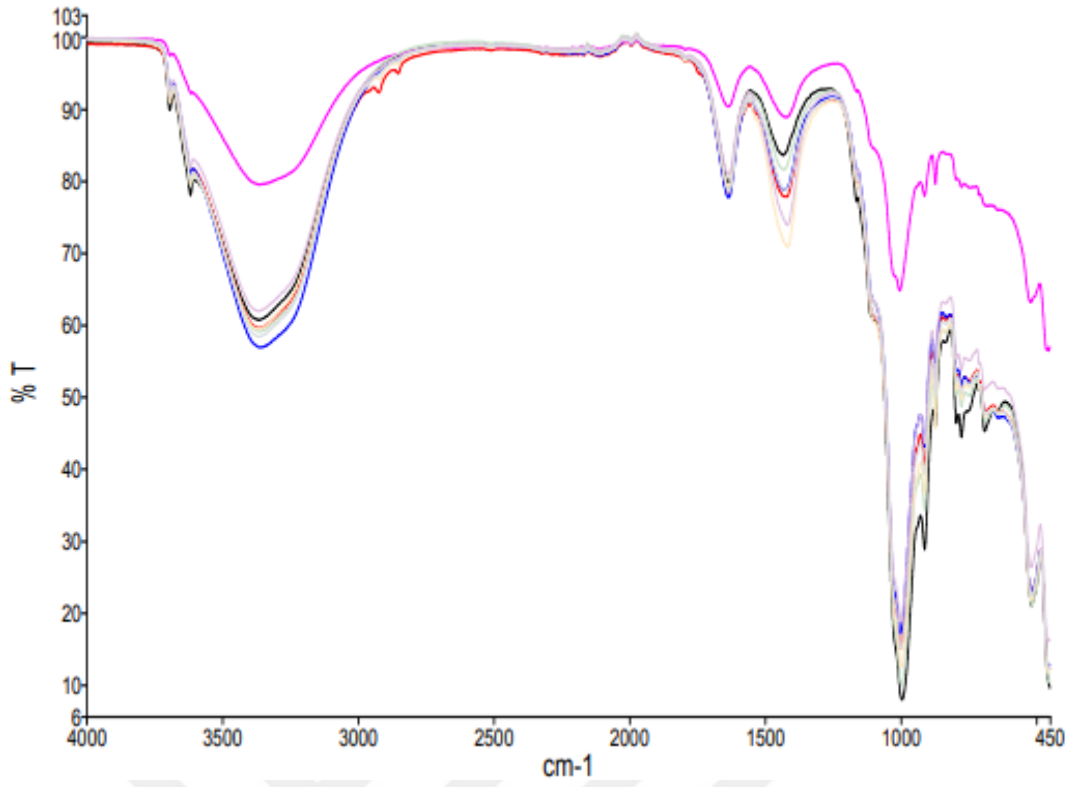


Şekil 46. ZKY2/10 numunesinin 7. gün FT-IR spektrumu.



Şekil 47. ZKY2/10 numunesinin 28. gün FT-IR spektrumu.

Z, ZK, ZKY1/10 ve ZKY2/10 numunelerinin 7 günlük FT-IR Spektrumu Şekil 48’te sunulmuştur.



Şekil 48. Z, ZK, ZKY1/10 ve ZKY2/10 numunelerinin 7 günlük FT-IR Spektrumu.

Z, ZK, ZKY1/10 ve ZKY2/10 numunelerinin 7 günlük FT-IR Spektrumu ile 28 günlük FT-IR Spektrumu incelediğinde aynı sonuçlar çıktığı saptanmıştır.

BEŞİNCİ BÖLÜM

Sonuç ve Öneriler

Bu yüksek lisans çalışmasında düşük plastisiteli kil bir zemin kireç ve YBT atıkları ile stabilize edilmiş, YBT atıklarının inceliğinin indeks ve dayanım üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Çalışma sonucunda aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

⇒ İri daneli YBT atıklarının %90'ı 1160 mikron altı malzeme iken öğütme işlemleri sonucunda ince daneli YBT atıklarının %90'ı 260 mikron altına inmiştir. Öğütme işleminde numunelerin karıştırılma zamanı ve hızı arttıkça numunelerin özgül yüzey alanında artış gözlenirken boyutunda ise azalmalar meydana gelmiştir.

⇒ Genel olarak ZKY1 karışımlarının likit limit değerlerinin ZKY2 karışımlarına oranla daha fazla, plastik limit değerlerinin ise daha az olduğu belirlenmiştir. Zemin ve kirece YBT atığı eklenmesiyle birlikte plastik limit değerleri azalırken, plastisite indisi değerleri ile ilgili doğrusal bir azalış veya artış olmamıştır.

⇒ Kompaksiyon parametreleri değerlendirildiğinde zemine ince veya iri daneli YBT atığı katkısının eklenmesinin maksimum kuru yoğunluk ve optimum su içeriği sonuçlarını belirgin bir şekilde etkilemediği tespit edilmiştir. En düşük maksimum kuru yoğunluk değeri 1,46 Mg/m³ ile ZKY2/5 numunesinde görülürken, 1,52 Mg/m³ ile Z ve ZKY2/20 numunelerinde en yüksek değerini almıştır. Optimum su muhtevaları %22-25,5 arasında tespit edilmiştir.

⇒ Doğal zemine kireç eklenmesi ile elde edilen numunelere 7 günlük kür süresinin ardından yapılan serbest basınç dayanım testi sonuçlarına göre numunelerdeki dayanım üç kattan fazla artmıştır. ZKY2/10 numunelerinin dayanımları en yüksek değere ulaşmış ve Z numunesine oranla 5 kat daha fazla dayanıma gelmiştir. Hazırlanan numunelerde ince taneli YBT atığının olduğu gruptaki serbest basınç dayanımlarının iri taneli YBT atığının olduğu gruptaki dayanımlara göre daha yüksek değerlere ulaştığı tespit edilmiştir.

⇒ Desikatörde 28 gün kür yapılan karışımların serbest basınç dayanımları incelendiğinde ZKY2/10 numunesinin 852 kPa değerine ulaştığı belirlenmiştir. 84 günlük kür sonunda dayanım 1144,9 kPa değerine ulaşmıştır. Karışımlarda en yüksek dayanım değerleri ince daneli YBT atığı kullanılarak hazırlanan ZKY2/10 numunesinden elde edilmiştir.

⇒ Farklı kür süreleri sonunda hazırlanan karışımlar incelendiğinde ZKY2 grubunun ZKY1 grubuna göre daha fazla dayanıma ulaşması, YBT atıklarının incelik etkisini ortaya koymuştur.

⇒ SEM analizinde numunelerin 1000x, 5000x, 10000x ve 20000x boyutlarında görüntüleri alınmıştır. %10 oranında YBT ve kireç katkılı zeminin morfolojik yapısı incelendiğinde, Z numunesinin yüzeyine göre daha sıkı yapıda olduğu görülmüştür. Farklı kür sürelerindeki numunelerin morfolojik dizilim farklılıkları serbest basınç deneyi sonuçlarını destekleyici niteliktedir.

⇒XRD analizinde Z, ZK, ZKY1/10 ve ZKY2/10 numunelerinin 7 ve 28 gün kür süresindeki yapısı ve kristal simetrisi incelenmiştir. İncelenen bütün numunelerde silikon oksitin hakim yapıda olduğu gözlenirken, ZKY1/10 ve ZKY2/10 numunelerinde kalsit, kaolinit ve glokonit pikleri tespit edilmiştir.

⇒ FT-IR analizinde farklı kür sürelerinde Z, ZK, ZKY1/10 ve ZKY2/10 numunelerinin Fourier dönüşümü ile ışığın kızılötesi yoğunluğuna karşı dalga sayısı ölçülerek, belirli frekanslarda verdikleri moleküler bağ titreşimleri sinyalleriyle atomik düzeyde bilgi edinilmiştir. Dalga boyu 450-4000 cm^{-1} dalga boyu aralığındadır, spektrumdaki titreşimler anlaşılır ve temizdir. FT-IR spektrumu incelendiğinde 7 günlük ve 28 günlük sonuçların aynı çıktığı izlenmiştir.

Yapılan tez çalışması sonrasında yapılabilecek araştırmalar için verilebilecek tavsiyeler aşağıda sıralanmıştır:

¶Bu çalışmada kullanılan doğal malzeme düşük plastisiteli kildir. Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırılması Sistemi'ne göre farklı sınıfta zeminlerle çalışma genişletilebilir.

¶ Çalışma kapsamında dayanım verileri incelenmiştir. Durabilite, geçirimsizlik, şişme gibi parametrelerin katkı malzemesinin inceltilmesiyle nasıl değişeceği araştırılabilir.

¶Katı atık yönetimi kapsamında farklı atıkların inceltilerek zemin stabilizasyonda kullanılabilirliği incelenebilir.

Kaynakça

- Abd El-Aziz, M. A., Abo-Heshema, M. A., & El-Shourbagy, M. (2004). The Effect of Lime-Silica Fume Stabilizer on Engineering Properties of Clayey Subgrade. *Fourth Mansoura International Engineering Conference (4th IEC), Faculty of Engineering*, 196(1), 320-322.
- Alosman, S. O. (2019). *Improving some geotechnical properties of organic soil by using waste stone powder* (Yüksek lisans tezi). <https://tez.yok.gov.tr> adresinden edinilmiştir. (Tez no. 609514)
- Al-Rawas, A. A., Taha, R., Nelson, J. D., Al-Shab, T. B., & Al-Siyabi, H. (2002). A comparative evaluation of various additives used in the stabilization of expansive soils. *Geotechnical Testing Journal*, 25(2), 199-209.
- Balatan, F. (2019). *Kurşun-çinko maden atığının zemin stabilizasyonunda değerlendirilmesi* (Yüksek lisans tezi). <https://tez.yok.gov.tr> adresinden edinilmiştir. (Tez no.661770)
- Bell, F. G. (1996). Lime stabilization of clay mineral sand soils. *Engineering Geology*, 42(1), 223- 237.
- Bozkurt, E. (2020). *Arazide yüksek su muhtevası içeren bir kilin kireç ile stabilizasyonu* (Yüksek lisans tezi). <https://tez.yok.gov.tr> adresinden edinilmiştir. (Tez no.629836)
- Buhler, R. L., & Cerato, A. B. (2007). Stabilization of oklahoma expansive soils using lime and class c fly ash, geodenver congress. *New Peaks In Geotechnics*, 225(1), 1-10. <https://doi.org/10.1061/40906>.
- Çalık, Ü. (2012). *Perlitin puzolanik katkı olarak kireç ile birlikte zemin stabilizasyonunda kullanımı*, (Doktora tezi).<https://tez.yok.gov.tr> adresinden edinilmiştir. (Tez no. 300926)
- Çalık, Ü., & Şadoğlu E. (2014). Classification, shear strength, and durability of expansive clayey soil stabilized with lime and perlite, *Natural Hazards*, 71(1), 1289-1303.
- Çelik, Z. H. (2020). *Zemin stabilizasyonunda pomza taşının incelik etkisinin incelenmesi* (Yüksek lisans tezi). <https://tez.yok.gov.tr> adresinden edinilmiştir. (Tez no. 610712)
- Çimen, Ö. (2005). Pomzanın Mühendislik Karakteristikleri ve Yüksek Plastisiteli Bir Kilin Stabilizasyonda Kullanılması, *Türkiye Pomza Sempozyumu*, Isparta, 251-257.
- Dağlı, E. (2021). *Uçucu kül stabilizasyonunun killi zeminlerin dayanım ve durabilite özelliklerine etkisi* (Doktora tezi). <https://tez.yok.gov.tr> adresinden edinilmiştir. (Tez no. 673127)
- Duman, V. (2020). *Midyat taşı atıklarının düşük plastisiteli kil zemin stabilizasyonunda kullanılabilirliği* (Yüksek lisans tezi). <https://tez.yok.gov.tr> adresinden edinilmiştir. (Tez no. 633580)
- Durmaz, M., & Baran, Y. (2020). Stabilization and experimental study of clay soils with nutshell ash, *euroasia journal of mathematics, engineering, Natural & Medical Sciences International Indexed And Refereed*, 2667-6702.
- Edil, T. B., Acosta, H. A., & Benson, C. H. (2006). Stabilizing soft fine grained soils with fly ash, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 18(2), 283-294.
- Faluyi, S. O., & Amu, O. O. (2005). Effects of lime stabilization on the ph values of lateritic soils in ado-ekiti, *Nigeria, Journal of Applied Sciences*, 5(1), 192- 194.
- Fidan, D. (2016). *Killerin stabilizasyonunda doğal puzolanik katkı maddesi inceliğinin*

dayanım ve durabiliteye etkisi (Yüksek lisans tezi). <https://tez.yok.gov.tr> adresinden edinilmiştir. (Tez no.444951)

- Ghosh, A., & Subbarao, C. (2007). Strength characteristics of class f fly ash modified with lime and gypsum. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 133(7), 757-766.
- Harichane, K., Ghrici, M., Khebizi, W., & Missoum, H. (2010). Effect of combination of lime and natural pozzolana on the durability of clayey soils, *The Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 15(1), 1194-1210.
- Huat, B. B. K., Maail, S., & Mohamed, T. A. (2005). Effect of chemical admixtures on the engineering properties of tropical peat soils. *American Journal of Applied Sciences*, 2(7), 1113-1120.
- Ingles, O. G., & Metcalf, J. B. (1973). Soil stabilization, *John Wiley & Sons*, New York.
- Kalkan, E., & Akbulut, S. (2004). The positive effects of silica fume on the permeability, Swelling Pressure and Compressive Strength of Natural Clay Liners, *Engineering Geology*, 73(1), 145-156.
- Keskin S. N., Sungur A., Akan R., & Uzundurukan S. (2017). İnce daneli zeminlerde katkı maddelerinin ve donma-çözülme çevriminin serbest basınç dayanımına etkisi. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 5(3), 473 – 478.
- Kocabey, S. (2019). *Düşük plastisiteli killerin kireçle stabilizasyonunda inceliğin etkisi* (Yüksek lisans tezi). <https://tez.yok.gov.tr> adresinden edinilmiştir. (Tez no. 533972)
- Kumar, B. R. P., & Sharma, R. S. (2004). Effect of fly ash on engineering properties of expansive soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 130(7), 764-767.
- Kumar, A., Walia, B. S. & Bajaj, A. (2007). Influence of fly ash, lime and polyester fiber on compaction and strength properties of expansive soils, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 19(3), 242-248.
- Lin, D. F., Lin, K. L., & Luo, H. L. (2007). A comparison between sludge ash and fly ash on the improvement in soft soil. *Journal of the Air-Waste Management Association*, 57, 59-64.
- Manasseh, J., & Olufemi, A. I. (2008). Effect of lime on some geotechnical properties of Igumale shale, *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 13, 1-12.
- MTA. (2005). Bayburt Doğal Taş Potansiyesi Maden Jeolojisi Raporu. Ankara: MTA.
- Mishra, J., Yadav R. K., & Singhai, A. K. (2014). Effect of granite dust on index properties of lime stabilized black cotton soil. *International Journal of Engineering Research and Science&Technology*, 3(1), 19-23.
- Nelson, J. D., & Miller, D. J. (1992). Expansive soils-problems and practice in foundation and pavement engineering, Londra: *John Willey and Sons Inc.*, 259-261.
- Okafor, F., O. & Okonkwo, U. N. (2009). Effects of rice husk on some geotechnical properties of lateritic soil. *Leonardo Electronic Journal of Practices and Technologies*, 15, 67-74.
- Rikhtehgar, A. Y. (2016). Investigating of effects of nano-materials and nano-polymers on clay. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 10,(1), 307-311.
- Sarıgöl, H.A. (2021). *Polimerler katkılı yüksek plastisiteli bir kilde donma-çözünme çevrimlerinin gerilme-şekil değiştirme davranışına etkisi* (Yüksek lisans tezi). <https://tez.yok.gov.tr> adresinden edinilmiştir. (Tez no. 677443)

- Sbahieh, S., & Teymur, B. (2018). *International Society For Soil Mechanics And Geotechnical Engineering. The Effect Of Fiber Reinforcement On The Behavior Of Cemented Sand L'effect du renforcement de fibre sur le comportement du sable cimenté*. Retrieved from <https://www.researchgate.net/publication/346967739>.
- Seco, A., Ramírez, F., Miqueleiz, L. & García, B. (2011). Stabilization of expansive soils for use in construction, *Applied Clay Science*, 51(1), 348-352.
- Sivapullaiah, P. V., & Lakshmikantha, H. (2005). Lime stabilized illite as a liner. *Ground Improvement*, 9(1), 39-45.
- Seyrek, E. (2018). Engineering Behavior Of Clay Soils Stabilized With Class C and Class F Fly Ashes. *Sci Eng Compos Master*, 25(2), 273-287.
- Skoog, D.A., Holler, F.J., & Nieman, T.A. (1998). *Principles of Instrumental Analysis*, 5th (Edition, Kılıç, E., Köseoğlu, F., Yılmaz, H.) Bilim Yayıncılık, Ankara, s. 850.
- Taş, M. (2020). *Uçucu kül, Bayburt taşı ve mermer tozu endüstriyel atıklarının zemin stabilizasyonunda kullanılabilirliğinin araştırılması* (Yüksek lisans tezi). <https://tez.yok.gov.tr> adresinden edinilmiştir. (Tez no. 609976)
- Tumluer, G. (2006). *Çimento katkılı kumlu zeminlerin mukavemeti* (Yüksek lisans tezi). <https://tez.yok.gov.tr> adresinden edinilmiştir. (Tez no. 183645)
- Tunç, A. (2002). Yol Mühendisliğinde Geoteknik ve Uygulamaları, İstanbul: Atlas Yayın Dağıtım, 912.
- Türedi, Y., Örnek M., Bal B.B., & Işık A. O. (2017). Çelikhane Cürufu Katkısının Cbr Sonuçlarına Etkisinin Araştırılması. 7. Geoteknik Sempozyumu, 22-23-24 Kasım İstanbul.
- U. S. Army Corps of Eng. (2003). *Guidelines on Ground Improvement for Structures and Facilities*, Research No. 20314-1000, Dept of the Army, Washington.
- Uzuner, B., A., 2013. *Temel mühendisliğine giriş*. Trabzon, Derya Kitabevi, 342-359.
- Wong, L. S., Hashim, R., & Ali, F. H. (2008). Strengt hand Permeability of Stabilized Peat Soil. *Journal of Applied Sciences*, 8(21), 3986-3990.
- Yarbaşı, N., Kalkan, E., & Akbulut, S. (2007). Modification of the Geotechnical Properties, as influenced by Freeze-Thaw of Granular Soils with Waste Additives, *Cold Regions Science and Technology*, 48(2), 44-54.
- Yılmaz, A.O., Alp. İ., Demir, C., Arslan, M., & Kolaylı, H. (2005). *Bayburt Tüfünün (Bayburt Taşı) Fiziksel, Mekanik, Petrografik Özellikleri*. TMMOB, Maden Müh. Odası.
- Yılmaz, F. (2015). *Tüfit taşların zemin stabilizasyonunda kireçle birlikte kullanılabilirliğinin standart deneyler ve bilgisayarlı tomografi tekniği ile araştırılması* (Doktora tezi). <https://tez.yok.gov.tr> adresinden edinilmiştir. (Tez no. 397321)
- Zha, F., Liu, S., Du, Y., & Cui, K. (2008). Behavior of Expansive Soils Stabilized with Fly Ash, *Natural Hazards*, 47(3), 509-523.

Özgeçmiş

Elmas Fulya TÜMER, ... tarihinde ...'de doğdu. İlköğretimini ...'nda, ortaokulu ...'nda ve lise öğrenimini ...'nde tamamladı ve ... yılında mezun oldu. ... yılında ... bölümünü derece ile bitirdi. ... yılında KPSS ile ...'ne memur olarak atandı. ... yılında DGS ile ...'nde başladığı lisans eğitimini ... yılında tamamladı. ... yılında ...'nın düzenlediği ... kazanarak İnşaat Mühendisi unvanını aldı. Aynı yıl ...'nda tezli yüksek lisans eğitimine başladı. İyi derecede İngilizce bilen TÜMER, evli ve iki çocuk annesidir.

