

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**TÜFİT TAŞLARIN ZEMİN STABİLİZASYONUNDA KİREÇLE BİRLİKTE
KULLANILABİLİRLİĞİNİN STANDART DENEYLER VE
BİLGİSAYARLI TOMOGRAFİ TEKNİĞİ İLE ARAŞTIRILMASI**

DOKTORA TEZİ

İnş. Yük. Müh. Fatih YILMAZ

AĞUSTOS 2015

TRABZON



KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünce

Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : / /

Tezin Savunma Tarihi : / /

Tez Danışmanı :

Trabzon

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında
Fatih YILMAZ Tarafından Hazırlanan**

**TÜFİT TAŞLARIN ZEMİN STABİLİZASYONUNDA KİREÇLE BİRLİKTE
KULLANILABİLİRLİĞİNİN STANDART DENEYLER VE
BİLGİSAYARLI TOMOGRAFİ TEKNİĞİ İLE ARAŞTIRILMASI**

**başlıklı bu çalışma, Enstitü Yönetim Kurulunun 21 /07/2015 gün ve 1612 sayılı
kararıyla oluşturulan jüri tarafından yapılan sınavda
DOKTORA TEZİ
olarak kabul edilmiştir.**

Jüri Üyeleri

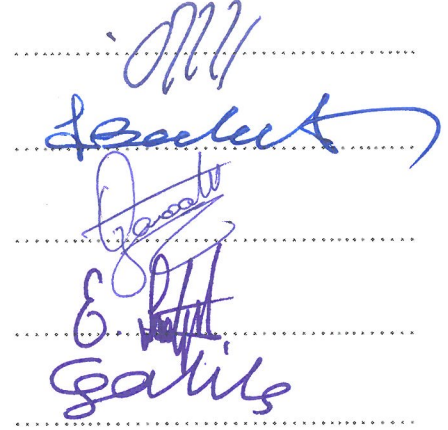
Başkan : Prof. Dr. Fahri Uluç ÖZBAYOĞLU

Üye : Prof. Dr. Fikri BULUT

Üye : Doç. Dr. Ahmet Şahin ZAIMOĞLU

Üye : Doç. Dr. Erol ŞADOĞLU

Üye : Yrd. Doç. Dr. Ümit ÇALIK



Prof. Dr. Sadettin KORKMAZ

Enstitü Müdürü

ÖNSÖZ

Önsözler son söz gibidir bir çalışmada... Sabır ile işlenen yolun, şükürle son bulmasıdır. Ve bu yolda emeği geçenlere bir gönül borcunun ödenmesidir aslında...

Tüfit taşların zemin stabilizasyonunda kireçle birlikte kullanılabilirliğinin standart deneyler ve bilgisayarlı tomografi tekniği ile araştırılmasını konu edinen bu çalışma, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda doktora tezi olarak gerçekleştirilmiştir.

Tez çalışmam boyunca ilgi, teşvik ve alakalarını esirgemeyen değerli hocam ve tez danışmanım Doç. Dr. Erol ŞADOĞLU'na teşekkürü bir borç bilirim. Tez izleme komitemde yer alan değerli hocalarım Prof. Dr. Bayram Ali UZUNER ve Prof. Dr. Fikri BULUT'a çalışmalarımındaki katkılarından dolayı saygıyla teşekkürlerimi sunarım.

Aynı yollarda yürüdüğümüz değerli meslektaşlarım ile Trabzon'da ve Bayburt'ta değerli vakitlerini ayırıp 'bir ucundan da biz turalım' diyen tüm arkadaşlarıma ayrı ayrı sevgiyle teşekkürü bir borç bilirim.

Yusuf Bey başta olmak üzere tüm ailesine, Beren Hanım ile birlikte tüm ailesine, Muhammet Berke Bey ile ailesine ve Mahmut Hüdayi Bey'in aile bireylerine ayrı ayrı teşekkür eder, saygılarımı sunarım.

İnşaat Mühendisliği'ni seçmemde çok büyük etkileri olan, maddi ve manevi desteklerini her an hissettiğim aileme ve zor günlerin destekçisi eşim Özlem YILMAZ'a teşekkürlerimi sunarım.

Varken sürülecek onca iz, bu yolu seçmemdeki yegâne kaynağım Hacı Baba'm ve kıymetli ailesine...

Fatih YILMAZ

Trabzon 2015

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Doktora Tezi olarak sunduğum ‘Tüfit Taşların Zemin Stabilizasyonunda Kireçle Birlikte Kullanılabilirliğinin Standart Deneyler ve Bilgisayarlı Tomografi Tekniği ile Araştırılması’ başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Doç. Dr. Erol ŞADOĞLU’nun sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuarlarda yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma süresince bilimsel çalışma ve etik kurallarına uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 05/08/2015

Fatih YILMAZ

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET	VII
SUMMARY	VIII
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	IX
TABLolar DİZİNİ.....	XIV
SEMBOLLER DİZİNİ	XVI
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Giriş	1
1.2. Amaçlar.....	2
1.3. Tezin Organizasyonu	2
1.4. Zemin Stabilizasyon Teknikleri.....	3
1.4.1. Mekanik Stabilizasyon.....	9
1.4.2. Kimyasal Stabilizasyon	10
1.4.2.1. Kireç ile Zemin Stabilizasyonu	12
1.4.2.2. Çimento ile Zemin Stabilizasyonu.....	16
1.4.2.3. Bitüm ile Zemin Stabilizasyonu	17
1.4.2.4. Puzolanlar ile Zemin Stabilizasyonu	18
1.5. Bilgisayarlı Tomografi ve Mühendislik Alanında Kullanımı.....	20
1.6. Literatür İncelemesi	23
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	54
2.1. Malzemeler	54
2.1.1. Doğal Malzeme.....	55
2.1.2. Bayburt Taşı.....	58
2.1.2.1. Bayburt Yeşil Taşı.....	62
2.1.2.2. Bayburt Beyaz Taşı.....	66
2.1.2.3. Bayburt Sarı Taşı.....	70

2.1.3.	Kireç	74
2.2.	Deneylerde Referans Alınan ASTM Standartları	77
3.	ARAŞTIRMA BULGULARI VE İRDELEME	79
3.1.	Deneylerden Elde Edilen Veriler	80
3.1.1.	Kıvam Limitleri	80
3.1.2.	Kompaksiyon Parametreleri	85
3.1.3.	Serbest Basınç Dayanımları.....	96
3.1.4.	Durabilite Tetkikleri	108
3.1.5.	Şişme Yüzdesi Deneyi.....	116
3.1.6.	Şişme Basıncı Deneyi	119
3.1.7.	Bilgisayarlı Tomografi ile Numunelerin Analizi.....	121
3.1.8.	Taramalı Elektron Mikroskopu Deneyi	135
4.	SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	139
5.	KAYNAKLAR	145
6.	EKLER	161

ÖZGEÇMİŞ

Doktora Tezi

ÖZET

TÜFİT TAŞLARIN ZEMİN STABİLİZASYONUNDA KİREÇLE BİRLİKTE
KULLANILABİLİRLİĞİNİN STANDART DENEYLER VE
BİLGİSAYARLI TOMOGRAFİ TEKNİĞİ İLE ARAŞTIRILMASI

Fatih YILMAZ

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Doç. Dr. Erol ŞADOĞLU
2015, 160 Sayfa, 21 Sayfa Ek

Rezervleri Bayburt şehri civarında bulunan Bayburt Taşı (BT) tüfit taşlar grubunda yer alan doğal bir puzolandır. Yeşil, beyaz ve sarı renkte, farklı fizikokimyasal özelliklere sahip üç türü bulunan bu taşların ocaklardan çıkarılmasında ve işlenmesinde modern teknolojilerin kullanılmamasının etkisiyle %70'lere varan atık malzemeler meydana gelmektedir. BT puzolanik özellik göstermesine rağmen, daha önce zemin stabilizasyonu çalışmalarında kullanılmamıştır. Çalışma kapsamında bir endüstriyel atık olan BT atıklarının zemin stabilizasyonunda kullanılabilirliği incelenmiştir.

Yüksek plastisiteli killi bir zeminin stabilizasyonunda kullanılan yeşil, beyaz ve sarı renkteki BT atıkları %0, %5, %10, %15 ve %20 oranlarında doğal malzeme ile kireçsiz ve %6 kireçli (optimum kireç oranı) olarak karıştırılmıştır. Hazırlanan karışımların indeks, dayanım, durabilite ve şişme gibi geoteknik özellikleri araştırılmıştır. Deneysel çalışmanın yanı sıra karışımların mikro yapısı taramalı elektron mikroskopu ve bilgisayarlı tomografi analizleriyle incelenmiştir.

BT atıklarının kireçle beraber kullanılmasının, dayanım değerlerinde doğal zemine ve sadece kireçli karışımlara göre güçlü bir iyileştirme meydana getirdiği görülmüştür. BT atıkları doğrudan zeminle karıştırıldıklarında ve kireçli karışımlarda en iyi dayanım veren sonuçlar beyaz renkli BT atıklarıyla elde edilmiştir. Tek eksenli basınç dayanımı değerlerine göre %10 beyaz BT atığı içeren kireçli ZKB10 karışımları, durabilite tetkiklerine göre %10 yeşil BT atığı içeren kireçli ZKY10 karışımları en yüksek değerleri vermiştir. Deneysel çalışmadan elde edilen veriler ışığında beyaz, sarı ve yeşil BT atıklarının zemin stabilizasyonu çalışmalarında kireçle birlikte kullanılabilir oldukları, bilgisayarlı tomografinin zemin mikro yapısının analizinde kullanılabilir bir yöntem olduğu sonucuna varılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Zemin stabilizasyonu, Kireç, Bayburt Taşı, Bilgisayarlı tomografi, Puzolanik reaksiyon

PhD. Thesis

SUMMARY

INVESTIGATION USAGE OF TUFFITE STONE WITH LIME IN SOIL STABILIZATION
BY STANDARD TESTS AND COMPUTED TOMOGRAPHY METHOD

Fatih YILMAZ

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Civil Engineering Graduate Program
Supervisor: Assoc. Prof. Erol ŞADOĞLU
2015, 160 Pages, 21 Pages Appendix

Bayburt Stone (BS), a kind of tuffite stone and natural pozzolan, has large reserve around Bayburt City in Turkey. The stone appears green, yellow and white colors because of various physicochemical features. Waste material, up to 70% of total stone, is produced during mining and processing of the stones due to the absence of modern technology . BS has never been used in soil stabilization studies despite its pozzolanic feature. Therefore, usage of BS wastes for soil stabilization is investigated in this study.

Test mixtures, for stabilization of high plasticity clayey soil, were prepared with 6% lime (optimum lime ratio) and without lime by adding 0%, 5%, 10%, 15% and 20% of green, white and yellow BS wastes. Index, strength, durability and swelling features of the test mixtures were examined. Besides the experimental studies, micro structure of test mixtures were investigated with scanning electron microscopy and computed tomography analyses.

Experimental results revealed that when BS wastes used with lime, it causes better improvement with respect to the soil-lime or the soil-BS mixtures. Maximum strength values, in comparison of white, green, and yellow BS, were obtained from white BS mixtures with lime or without lime. According to unconfined compressive strength test, the optimum results were achieved with ZKB10 mixtures including 10% of white BS wastes and %6 of lime, and according to durability tests, maximum results are attained from ZKY10 mixtures including %10 of green BS wastes and %6 of lime. In the light of the experimental study, white, yellow and green BS wastes have been found to be usable with lime for soil stabilization works and computed tomography has been found to be usable to analyze micro structure of soil.

Key Words: Soil stabilization, Lime, Bayburt Stone, Computed tomography, Pozzolanic reaction

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1.1.	Zemin türlerine göre stabilizasyon yöntemlerinin belirlenmesi 4
Şekil 1.2.	Stabilizasyon yöntemleri..... 5
Şekil 1.3.	Zemin gradasyon üçgeni 11
Şekil 1.4.	X-ışınlarında meydana gelen azalma 21
Şekil 1.5.	Bilgisayarlı tomografi cihazlarının gelişimi 21
Şekil 1.6.	Bilgisayarlı tomografi ile nesneden kesit alınması 22
Şekil 2.1.	Doğal malzemenin temin edildiği Demirözü ilçesinin konumu 56
Şekil 2.2.	Doğal malzemenin granülometri eğrisi..... 57
Şekil 2.3.	Doğal malzemenin XRD analizi sonuçları 57
Şekil 2.4.	Bayburt şehrinin konumu..... 59
Şekil 2.5.	Bayburt Taşı kullanım alanları 60
Şekil 2.6.	Laboratuvara getirilen atık haldeki Bayburt taşları 61
Şekil 2.7.	Atık taşların toz hali..... 61
Şekil 2.8.	Taşların toz haline getirilmesinde kullanılan öğütme ve taş kırma makineleri 62
Şekil 2.9.	Trabzon Zafanoz Camii ve dış kaplamasındaki BYT kullanımını detayı.. 63
Şekil 2.10.	Öğütülmüş BYT atıklarının dane boyutu dağılımı 64
Şekil 2.11.	BYT atıklarının 3000 kat büyütülmüş SEM görüntüsü 65
Şekil 2.12.	BYT atıklarının XRD analizi..... 66
Şekil 2.13.	Yapılarda BBT kullanımını örneği 67
Şekil 2.14.	Öğütülmüş BBT atıklarının dane boyutu dağılımı 68
Şekil 2.15.	BBT atıklarının 3000 kat büyütülmüş SEM görüntüsü 69
Şekil 2.16.	BBT atıklarının XRD analizi 70
Şekil 2.17.	Bayburt Yakutiye Camii kemerli ve BST kullanımını detayı..... 71
Şekil 2.18.	Öğütülmüş BST atıklarının dane boyutu dağılımı..... 72
Şekil 2.19.	BST atıklarının 3000 kat büyütülmüş SEM görüntüsü..... 73
Şekil 2.20.	BST atıklarının XRD analizi..... 74
Şekil 2.21.	Optimum kireç oranı tayininde kullanılan pH metre cihazı 75
Şekil 2.22.	ASTM D 6276'ya göre optimum kireç oranının tayini 76

Şekil 2.23.	Kirecin dane boyutu dağılımı	77
Şekil 3.1.	ZB, ZY, ZS karışımlarının likit limitleri.....	82
Şekil 3.2.	ZB, ZY, ZS karışımlarının plastik limitleri	83
Şekil 3.3.	ZB, ZY, ZS karışımlarının plastisite indisleri.....	83
Şekil 3.4.	ZKB, ZKY, ZKS karışımlarının likit limitleri.....	84
Şekil 3.5.	ZKB, ZKY, ZKS karışımlarının plastik limitleri.....	84
Şekil 3.6.	ZKB, ZKY, ZKS karışımlarının plastisite indisleri.....	85
Şekil 3.7.	Sıkıştırılmış zemin ve örnek alımı	86
Şekil 3.8.	ZY karışımlarının optimum su içerikleri	88
Şekil 3.9.	ZY karışımlarının maksimum kuru yoğunlukları	88
Şekil 3.10.	ZB karışımlarının optimum su içerikleri	89
Şekil 3.11.	ZB karışımlarının maksimum kuru yoğunlukları	89
Şekil 3.12.	ZS karışımlarının optimum su içerikleri.....	90
Şekil 3.13.	ZS karışımlarının maksimum kuru yoğunlukları.....	90
Şekil 3.14.	ZKY karışımlarının optimum su içerikleri	93
Şekil 3.15.	ZKY karışımlarının maksimum kuru yoğunlukları	93
Şekil 3.16.	ZKB karışımlarının optimum su içerikleri.....	94
Şekil 3.17.	ZKB karışımlarının maksimum kuru yoğunlukları	94
Şekil 3.18.	ZKS karışımlarının optimum su içerikleri.....	95
Şekil 3.19.	ZKS karışımlarının maksimum kuru yoğunlukları.....	95
Şekil 3.20.	Serbest basınç deneyi numuneleri.....	96
Şekil 3.21.	Deney numunelerine desikatör içerisinde 28 günlük kür uygulama.....	97
Şekil 3.22.	Numunelerin hazırlanma aşamaları	97
Şekil 3.23.	Tek eksenli serbest basınç dayanımı testi.....	98
Şekil 3.24.	ZY karışımlarının serbest basınç dayanımları	101
Şekil 3.25.	ZB karışımlarının serbest basınç dayanımları	101
Şekil 3.26.	ZS karışımlarının serbest basınç dayanımları	102
Şekil 3.27.	Kireçsiz karışımların serbest basınç dayanımı değerlerinin değişimi.....	102
Şekil 3.28.	ZKY karışımlarının serbest basınç dayanımları	106
Şekil 3.29.	ZKB karışımlarının serbest basınç dayanımları.....	106
Şekil 3.30.	ZKS karışımlarının serbest basınç dayanımları	107
Şekil 3.31.	Kireçli karışımların serbest basınç dayanımı değerlerinin değişimi.....	107
Şekil 3.32.	DÇÇ sonrası ZY karışımlarının serbest basınç dayanımları.....	110

Şekil 3.33.	DÇÇ sonrası ZB karışımlarının serbest basınç dayanımları	110
Şekil 3.34.	DÇÇ sonrası ZS karışımlarının serbest basınç dayanımları	111
Şekil 3.35.	DÇÇ sonrası kireçsiz karışımların serbest basınç dayanımı değişimi	111
Şekil 3.36.	DÇÇ sonrası ZKY karışımlarının serbest basınç dayanımları.....	114
Şekil 3.37.	DÇÇ sonrası ZKB karışımlarının serbest basınç dayanımları	114
Şekil 3.38.	DÇÇ sonrası ZKS karışımlarının serbest basınç dayanımları	115
Şekil 3.39.	DÇÇ sonrası kireçli karışımların serbest basınç dayanımı değişimi	115
Şekil 3.40.	Şişme yüzdesi deney numuneleri.....	116
Şekil 3.41.	ZY karışımlarının serbest şişme yüzdesi değerleri	117
Şekil 3.42.	ZB karışımlarının serbest şişme yüzdesi değerleri	118
Şekil 3.43.	ZS karışımlarının serbest şişme yüzdesi değerleri.....	118
Şekil 3.44.	ZY karışımlarının şişme basıncı değerleri	119
Şekil 3.45.	ZB karışımlarının şişme basıncı değerleri	120
Şekil 3.46.	ZS karışımlarının şişme basıncı değerleri.....	120
Şekil 3.47.	Bilgisayarlı tomografi cihazı	121
Şekil 3.48.	Numunelerin bilgisayarlı tomografi cihazına yerleştirilmesi	122
Şekil 3.49.	Bilgisayarlı tomografi numunelerinin üstten ve yandan görünümü	122
Şekil 3.50.	Kireçsiz karışımlarda HU ve SBD değerlerinin Q-Q grafikleri	125
Şekil 3.51.	Kireçli karışımlarda HU ve SBD değerlerinin Q-Q grafikleri.....	128
Şekil 3.52.	Hesap yapılacak alanın ve sınır şartlarının belirlenmesi.....	130
Şekil 3.53.	Numunelerin üç boyutlu görünümü ve eksenler üzerine yerleştirilmesi	131
Şekil 3.54.	Numunedeki farklı HU değerlerindeki bölgelerin görünümü.....	131
Şekil 3.55.	3D Doctor programında kireçli numunelerin 28. gün hacim analizi	132
Şekil 3.56.	Karışımların hacimlerinde meydana gelen değişimler	133
Şekil 3.57.	DÇÇ sonrası kireçli karışımlarda makro boşluk tespiti.....	134
Şekil 3.58.	Taramalı elektron mikroskobu.....	135
Şekil 3.59.	SEM analizi için hazırlanan numuneler.....	136
Şekil 3.60.	Zemin numunelerinin sırasıyla 1. gün, 28. gün ve DÇÇ sonrası 500 kat büyütülmüş SEM görüntüleri.....	137
Şekil 3.61.	ZK karışımlarının sırasıyla 1. gün, 28. gün ve DÇÇ sonrası 2500 kat büyütülmüş SEM görüntüleri.....	137
Şekil 3.62.	ZKB10 karışımlarının sırasıyla 1. gün, 28. gün ve DÇÇ sonrası 5000 kat büyütülmüş SEM görüntüleri.....	137

Şekil 3.63.	ZB20 karışımlarının sırasıyla 1. gün, 28. gün ve DÇÇ sonrası 10000 kat büyütülmüş SEM görüntüleri.....	138
Ek Şekil 1.1.	BYT atıklarının 3000 kat büyütülmüş SEM görüntüsü.....	161
Ek Şekil 1.2.	BYT atıklarının 6000 kat büyütülmüş SEM görüntüsü.....	162
Ek Şekil 1.3.	BYT atıklarının 12000 kat büyütülmüş SEM görüntüsü.....	162
Ek Şekil 1.4.	BYT atıklarının 24000 kat büyütülmüş SEM görüntüsü.....	163
Ek Şekil 1.5.	BST atıklarının 3000 kat büyütülmüş SEM görüntüsü.....	163
Ek Şekil 1.6.	BST atıklarının 6000 kat büyütülmüş SEM görüntüsü.....	164
Ek Şekil 1.7.	BST atıklarının 12000 kat büyütülmüş SEM görüntüsü.....	164
Ek Şekil 1.8.	BST atıklarının 24000 kat büyütülmüş SEM görüntüsü.....	165
Ek Şekil 1.9.	BBT atıklarının 3000 kat büyütülmüş SEM görüntüsü.....	165
Ek Şekil 1.10.	BBT atıklarının 6000 kat büyütülmüş SEM görüntüsü.....	166
Ek Şekil 1.11.	BBT atıklarının 12000 kat büyütülmüş SEM görüntüsü.....	166
Ek Şekil 1.12.	BBT atıklarının 24000 kat büyütülmüş SEM görüntüsü.....	167
Ek Şekil 2.1.	Doğal zemin numunesine ait kompaksiyon eğrisi.....	168
Ek Şekil 2.2.	ZB5 karışımına ait kompaksiyon eğrisi.....	169
Ek Şekil 2.3.	ZB10 karışımına ait kompaksiyon eğrisi.....	169
Ek Şekil 2.4.	ZB15 karışımına ait kompaksiyon eğrisi.....	170
Ek Şekil 2.5.	ZB20 karışımına ait kompaksiyon eğrisi.....	170
Ek Şekil 2.6.	ZY5 karışımına ait kompaksiyon eğrisi.....	171
Ek Şekil 2.7.	ZY10 karışımına ait kompaksiyon eğrisi.....	171
Ek Şekil 2.8.	ZY15 karışımına ait kompaksiyon eğrisi.....	172
Ek Şekil 2.9.	ZY20 karışımına ait kompaksiyon eğrisi.....	172
Ek Şekil 2.10.	ZS5 karışımına ait kompaksiyon eğrisi.....	173
Ek Şekil 2.11.	ZS10 karışımına ait kompaksiyon eğrisi.....	173
Ek Şekil 2.12.	ZS15 karışımına ait kompaksiyon eğrisi.....	174
Ek Şekil 2.13.	ZS20 karışımına ait kompaksiyon eğrisi.....	174
Ek Şekil 2.14.	ZK karışımına ait kompaksiyon eğrisi.....	175
Ek Şekil 2.15.	ZKB5 karışımına ait kompaksiyon eğrisi.....	175
Ek Şekil 2.16.	ZKB10 karışımına ait kompaksiyon eğrisi.....	176
Ek Şekil 2.17.	ZKB15 karışımına ait kompaksiyon eğrisi.....	176
Ek Şekil 2.18.	ZKB20 karışımına ait kompaksiyon eğrisi.....	177
Ek Şekil 2.19.	ZKY5 karışımına ait kompaksiyon eğrisi.....	177

Ek Şekil 2.20. ZKY10 karışımına ait kompaksiyon eğrisi.....	178
Ek Şekil 2.21. ZKY15 karışımına ait kompaksiyon eğrisi.....	178
Ek Şekil 2.22. ZKY20 karışımına ait kompaksiyon eğrisi.....	179
Ek Şekil 2.23. ZKS5 karışımına ait kompaksiyon eğrisi.....	179
Ek Şekil 2.24. ZKS10 karışımına ait kompaksiyon eğrisi.....	180
Ek Şekil 2.25. ZKS15 karışımına ait kompaksiyon eğrisi.....	180
Ek Şekil 2.26. ZKS20 karışımına ait kompaksiyon eğrisi.....	181

TABLULAR DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1.1. Zemin cinslerine göre stabilizasyon yöntemleri	6
Tablo 1.2. Stabilizasyon amacına göre kullanılacak zemin ıslah yöntemleri	7
Tablo 1.3. Zemin stabilizasyonunda yaklaşık maliyet tablosu.....	9
Tablo 1.4. Kimyasal stabilizasyonda katkı seçimi için rehber	12
Tablo 1.5. Kireç ve çimento stabilizasyonunda durabilite kriterleri	13
Tablo 1.6. Zemin cinslerine göre optimum kireç oranı değerleri.....	14
Tablo 1.7. Farklı zemin sınıflarına göre çimento miktarı	17
Tablo 1.8. Doğal puzolanların sınıflandırılması.....	18
Tablo 1.9. Farklı maddelere ait HU değerleri	23
Tablo 2.1. Deney numunelerine ait notasyonlar	55
Tablo 2.2. Doğal malzemenin özellikleri	58
Tablo 2.3. MTA raporuna göre BYT teknik analizi sonuçları	63
Tablo 2.4. BYT kimyasal ve fiziksel özellikleri	64
Tablo 2.5. MTA raporuna göre BBT teknik analizi sonuçları	67
Tablo 2.6. BBT kimyasal ve fiziksel özellikleri.....	68
Tablo 2.7. MTA raporuna göre BST teknik analizi sonuçları.....	71
Tablo 2.8. BST kimyasal ve fiziksel özellikleri	72
Tablo 2.9. Söndürülmüş kalker kireci kimyasal ve fiziksel özellikleri.....	74
Tablo 2.10. Kireç analizi sonuçları	76
Tablo 2.11. Deneyle referans alınan ASTM standartları	77
Tablo 3.1. Deney numunelerinin kıvam limitleri.....	81
Tablo 3.2. ZY karışımlarının kompaksiyon parametreleri.....	86
Tablo 3.3. ZB karışımlarının kompaksiyon parametreleri	86
Tablo 3.4. ZS karışımlarının kompaksiyon parametreleri.....	87
Tablo 3.5. ZKY karışımlarının kompaksiyon parametreleri	91
Tablo 3.6. ZKB karışımlarının kompaksiyon parametreleri	91
Tablo 3.7. ZKS karışımlarının kompaksiyon parametreleri.....	91
Tablo 3.8. ZY karışımlarının tek eksenli serbest basınç dayanımı sonuçları.....	98
Tablo 3.9. ZB karışımlarının tek eksenli serbest basınç dayanımı sonuçları.....	99

Tablo 3.10.	ZS karışımlarının tek eksenli serbest basınç dayanımı sonuçları	99
Tablo 3.11.	ZKY karışımlarının tek eksenli serbest basınç dayanımı sonuçları.....	103
Tablo 3.12.	ZKB karışımlarının tek eksenli serbest basınç dayanımı sonuçları	103
Tablo 3.13.	ZKS karışımlarının tek eksenli serbest basınç dayanımı sonuçları	103
Tablo 3.14.	ZY karışımlarının DÇÇ sonrası tek eksenli serbest basınç dayanımı sonuçları	108
Tablo 3.15.	ZB karışımlarının DÇÇ sonrası tek eksenli serbest basınç dayanımı sonuçları	108
Tablo 3.16.	ZS karışımlarının DÇÇ sonrası tek eksenli serbest basınç dayanımı sonuçları	109
Tablo 3.17.	ZKY karışımlarının DÇÇ sonrası tek eksenli serbest basınç dayanımı sonuçları	112
Tablo 3.18.	ZKB karışımlarının DÇÇ sonrası tek eksenli serbest basınç dayanımı sonuçları	112
Tablo 3.19.	ZKS karışımlarının DÇÇ sonrası tek eksenli serbest basınç dayanımı sonuçları	112
Tablo 3.20.	ZY, ZB ve ZS karışımlarının serbest şişme yüzdesi değerleri.....	117
Tablo 3.21.	ZY, ZB ve ZS karışımlarının şişme basıncı değerleri.....	119
Tablo 3.22.	Kireçsiz karışımların HU ve SBD değerleri	123
Tablo 3.23.	Kireçsiz karışımların Spearman's rho korelasyon testi sonucu	124
Tablo 3.24.	Kireçsiz karışımların DÇÇ sonrası Spearman's rho korelasyon testi sonucu	124
Tablo 3.25.	Kireçsiz karışımların korelasyon testi sonucu	126
Tablo 3.26.	Kireçsiz karışımların regresyon analizi sonuçları.....	126
Tablo 3.27.	Kireçli karışımların HU ve SBD değerleri.....	127
Tablo 3.28.	Kireçli karışımların Spearman's rho korelasyon testi sonucu	127
Tablo 3.29.	Kireçli karışımların DÇÇ sonrası Spearman's rho korelasyon testi sonucu	128
Tablo 3.30.	Kireçli karışımların korelasyon testi sonucu.....	129
Tablo 3.31.	Kireçli karışımların regresyon analizi sonuçları	129
Tablo 3.32.	Karışımların hacimsel değişimleri	132

SEMBOLLER DİZİNİ

A	: Aktivite
AASHTO	: Amerikan Devlet Karayolu ve Ulaştırma İdareleri Birliği
B	: Bentonit, Tahmin katsayısı
BBT	: Bayburt Beyaz Taşı
BST	: Bayburt Sarı Taşı
BT	: Bayburt Taşı
BYT	: Bayburt Yeşil Taşı
C	: Kalsit
CAH	: Kalsiyum alümina hidrate
CASH	: Kalsiyum alümina-silika hidrate
CBR	: Kaliforniya taşıma oranı
C _c	: Sıkışma indisi
CH	: Yüksek plastisiteli inorganik kil
CPT	: Konik penetrasyon deneyi
C _r	:Yeniden yükleme İndisi
CSH	: Kalsiyum silika hidrate
ÇŞB	: Türkiye Cumhuriyeti Çevre ve Şehircilik Bakanlığı
DÇÇ	: Donma-çözülme çevrimi
DÇÇS	: Donma-çözülme çevrimi sonrası
dk	: Dakika
F	: Feldispat
GP	: Kötü derecelenmiş çakıl
HU	: Tomografi değeri
I	: İllit
KB	: Türkiye Cumhuriyeti Kalkınma Bakanlığı
kPa	: Kilopaskal (kN/m ²)
LL	: Likit limit
M	: Montmorillonit
m ³	: Metreküp
mm	: Milimetre

MPa	: Megapaskal (MN/m ²)
MTA	: Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü
N	: Veri sayısı
Na ₂ O	: Sodyum oksit
P	: Ağırlıkça elekten geçen malzeme yüzdesi, Periklas
p	: Anlamlılık düzeyi
pH	: Hidrojen gücü
PI	: Plastisite indisi
PL	: Plastik limit
ppm	: Miligram/kilogram
Q	: Kuvars
q _u	: Serbest basınç dayanımı
r	: Korelasyon katsayısı
r ²	: Etki büyüklüğü
RSM	: Tepki yüzey yöntemi
SBD	: Serbest basınç dayanımı
SEM	: Taramalı elektron mikroskopu
SPT	: Standart penetrasyon deneyi
SW	: İyi derecelenmiş kum
TÇMB	: Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği
TS	: Türk Standartları
w	: Su muhtevası
w _{opt}	: Optimum su muhtevası
XRD	: X-ışını difraksiyon spektroskopisi
XRF	: X-ışını floresans spektroskopisi
Z	: Doğal malzeme
ZB	: Doğal malzeme ve Bayburt Beyaz Taşı karışımı
ZK	: Doğal malzeme ve kireç karışımı
ZKB	: Doğal malzeme, kireç ve Bayburt Beyaz Taşı karışımı
ZKS	: Doğal malzeme, kireç ve Bayburt Sarı Taşı karışımı
ZKY	: Doğal malzeme, kireç ve Bayburt Yeşil Taşı karışımı
ZS	: Doğal malzeme ve Bayburt Sarı Taşı karışımı
ZY	: Doğal malzeme ve Bayburt Yeşil Taşı karışımı

$^{\circ}$: Derece
$^{\circ}\text{C}$: Santigrat derece
\AA	: Angström (10^{-10} m)
μm	: Mikrometre
ρ_k	: Kuru yoğunluk
$\rho_{k\text{max}}$: Maksimum kuru yoğunluk

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Yer bilimleri, kayaların ve zeminlerin oluşumlarını, davranışlarını ve özelliklerini inceleyen bilim dalıdır. Zemin ise kayaların mekanik ve kimyasal ayrışması sonucu meydana gelen, içinde organik maddeler bulundurabilen ve yük altında büyük şekil değiştirmeler gösterebilen malzemelerdir. Zemin mekaniği hidrolik ve mekanik prensiplerden yararlanılarak zemin olarak nitelendirilen malzemelerin davranışlarını inceleyen bilim dalıdır.

Stabilizasyon en genel anlamıyla, zeminlerin sahip olduğu özelliklerin amaca uygun hale getirilmesi işlemidir (Önalp, 1983). Zemin özelliklerinin iyileştirilmesi yöntemleri iki grupta değerlendirilebilir:

- Toprak dolgular için uygun zemin dolgusu hazırlama yöntemleri
 - a. Kompaksiyon yöntemleri
 - b. Katkı maddeleri (kireç, çimento, uçucu kül vb.) ile zeminlerin iyileştirilmesi
- Yerinde iyileştirme amacıyla uygulanabilecek yöntemler
 - a. Mekanik yöntemler
 - b. Hidrolik yöntemler
 - c. Hafif malzemelerin kullanılması
 - d. Donatılı zemin (metal veya geosentetik donatılar)

Stabilizasyon tekniklerinin amacı, mühendislik özellikleri zayıf olan zeminlerin hacimsel stabilite, mukavemet, permeabilite, dayanım ve durabilite parametrelerinin iyileştirilmesidir. Zeminin geoteknik özellikleri belirlendikten sonra kullanılacak stabilizasyon tekniğine karar verilmelidir. Zeminin mühendislik özelliklerinin yetersiz olduğu durumlarda karşılaşılan problemleri çözmek için yaygın olarak kullanılan yöntemler şu şekilde sıralanabilir:

- ✓ İstenmeyen zeminin kazınıp taşınarak yerine istenen özelliklerdeki zemini koyma,
- ✓ Üstyapı projesinin yapısal elemanlarının boyutlarının değiştirilmesi ve kullanılan malzemenin kalitesinin arttırılması,

✓ Mevcut zemin özelliklerinin iyileştirilmesi (Balta, 1984).

Zemin stabilizasyonu çalışmalarında birçok değişkenin aynı anda ele alınması gereklidir. Stabilizasyonun kalitesi; zemin özellikleri, ortamın türü, katkı maddelerinin özellikleri, çevre koşulları ve ekonomik veriler gibi etkenlerden doğrudan etkilenmektedir (Mitchell, 1976). Günümüzde katı atık yönetimi kapsamında endüstriyel atıkların stabilizasyon çalışmalarında kullanılabilir hale gelmesi zemin mekaniği açısından önemli olduğu kadar, çevre mühendisliği ve katı atıkların yeniden değerlendirilebilmesi açısından da bir o kadar öneme sahiptir.

1.2. Amaçlar

Bu çalışmanın ana amacı, orijin olarak tuf/tüfit taşlar grubunda yer alan Bayburt Taşı'nın (BT) endüstriyel atıklarının zemin stabilizasyonunda kullanılabilirliğinin incelenmesidir. Bir başka ifade ile Bayburt Beyaz Taşı'nın (BBT), Bayburt Sarı Taşı'nın (BST) ve Bayburt Yeşil Taşı'nın (BYT) işlenmesi sonucunda meydana gelen endüstriyel atıkların zemin stabilizasyonunda kullanılıp kullanılmayacağını irdelemektir. Bu amaca binaen, stabilizasyon çalışmalarında kireçli ve kireçsiz numuneler hazırlanarak gerekli zemin mekaniği deneylerinin yapılması ve sonuçların yorumlanması hedeflenmektedir.

Tuf, volkanik patlamalar sonucu ortaya çıkan volkanik küllerden oluşan bir kaya türüdür. İçeriğinde %50'den fazla tuf bulunan kayalar tüflü olarak kabul edilir. Tüfit, tuf ve adi taş kırıntılarının karışımından meydana gelen yapıdır. Maden aramaları tuf/tüfit grubunda yer alan BT'nin, Bayburt şehri ve yakın bölgelerinde 180 milyon metreküp rezervinin bulunduğunu göstermiştir. Bayburt şehri civarında bulunan ve farklı fizikokimyasal özelliklere sahip olan bu taşlar bölge ekonomisi için oldukça önemli bir yere sahiptir.

1.3. Tezin Organizasyonu

Doktora tez çalışması kapsamında hedeflenen amaçlar ve tez içeriği ile ilgili ayrıntılar, zemin stabilizasyon yöntemlerinin açıklanması, bilgisayarlı tomografiyle ilgili genel bilgiler ve literatür çalışmalarının özetleri Bölüm 1'de; deneysel çalışmada yer alan materyaller (doğal malzeme, kireç, BBT, BYT, BST) ve deneysel metodoloji (laboratuvar

testleri ile ilgili prosedürler, numune hazırlama, saklama ve isimlendirme vb.) ile ilgili bilgiler Bölüm 2’de; farklı üç türe sahip BT atıklarının zemin stabilizasyonunda kireçli ve kireçsiz karışımlar halinde kullanılmasına ait deneyler, deney verilerinin analizi ve sonuçları ile çalışmaya ait bulgularının irdelenmesi Bölüm 3’de; tezdin elde edilen sonuçlar ve araştırılabilecek farklı konular ile ilgili öneriler Bölüm 4’de; tez kapsamında yararlanılan kaynaklar Bölüm 5’te ve ilgili ekler Bölüm 6’da yer alacak şekilde bu doktora tezi organize edilmiştir.

1.4. Zemin Stabilizasyon Teknikleri

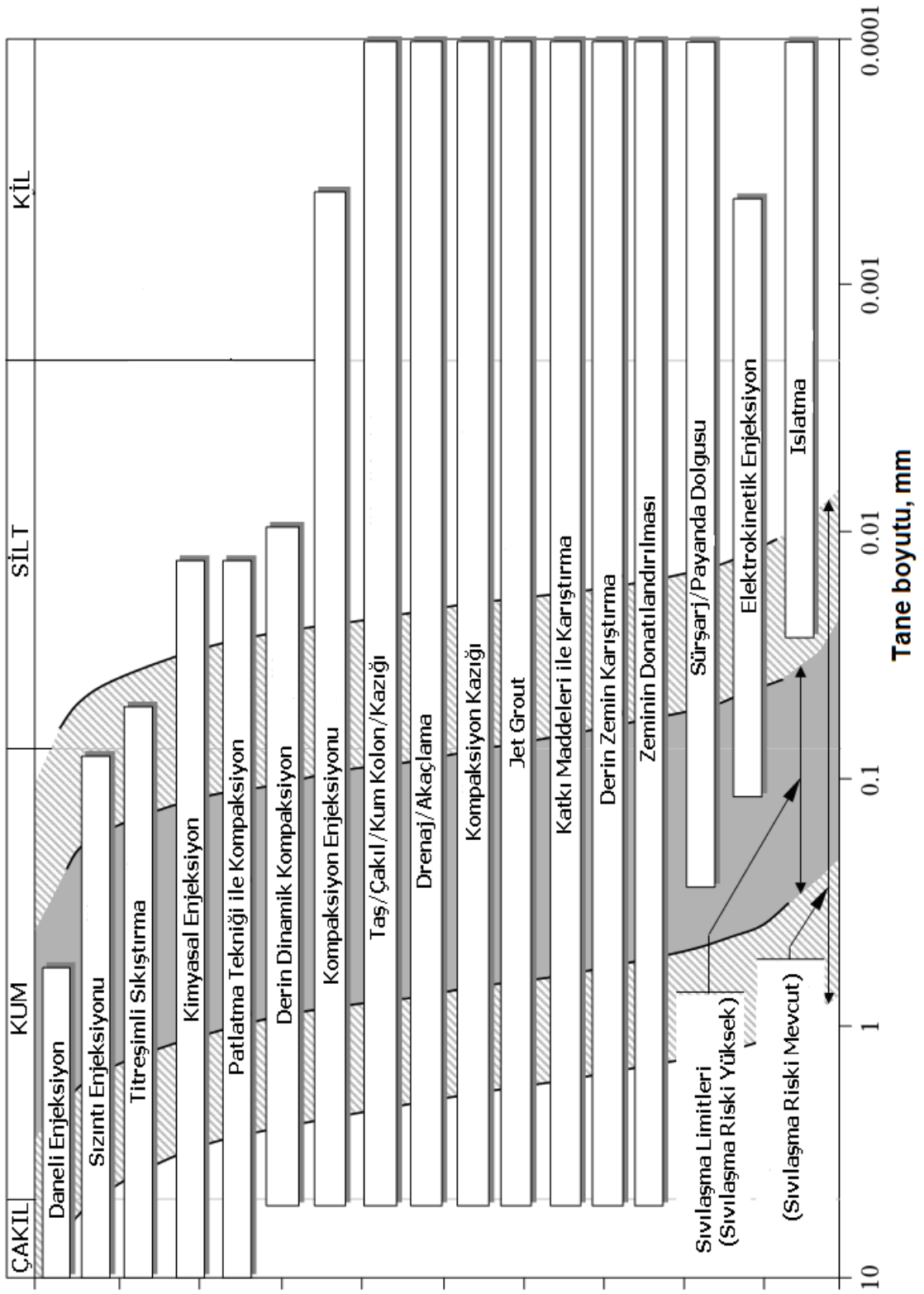
Olumsuz zemin özellikleri mekanik, fiziksel, hidrolik ve kimyasal olmak üzere dört şekilde iyileştirilebilir. Zeminin kayma dayanımı arttırmak, oturmaları azaltmak, yüke maruz kalan zemin davranışını iyileştirmek ve zeminden su sızıntısını azaltmak bu yöntemlerin uygulanmasının temel nedenidir. Zemin stabilizasyon yöntemleri zeminin kohezyonlu olup olmadığına, suya doygunluğuna, konsolidasyon durumuna ve içindeki organik madde miktarına göre farklılık arz eder (Yıldırım, 2002). Mühendislik yapılarında geoteknik özellikleri yetersiz zeminlerle karşılaşıldığında uygulanabilecek çözümler; zayıf zeminin kaldırılması, farklı bir malzeme ile sıkıştırılması veya temel sistemlerinin büyütülmesidir (Ingles ve Metcalf, 1973).

Zemin stabilizasyonu çalışmaları genellikle mekanik ve kimyasal stabilizasyon olmak üzere iki ana grupta toplanmıştır (Lambe vd., 1990; Hausmann, 1990; McCallister ve Petry, 1990; Puppala ve Hanchanloet, 1996; Kota vd., 1996). Mekanik stabilizasyon, katkı maddeleri kullanmadan zemin özelliklerini değiştirmeye yarayan yöntemler iken, kimyasal stabilizasyon aynı amaç doğrultusunda bu işlemlerin çeşitli katkıları yardımıyla yapılması manasına gelmektedir (Lambe vd., 1990).

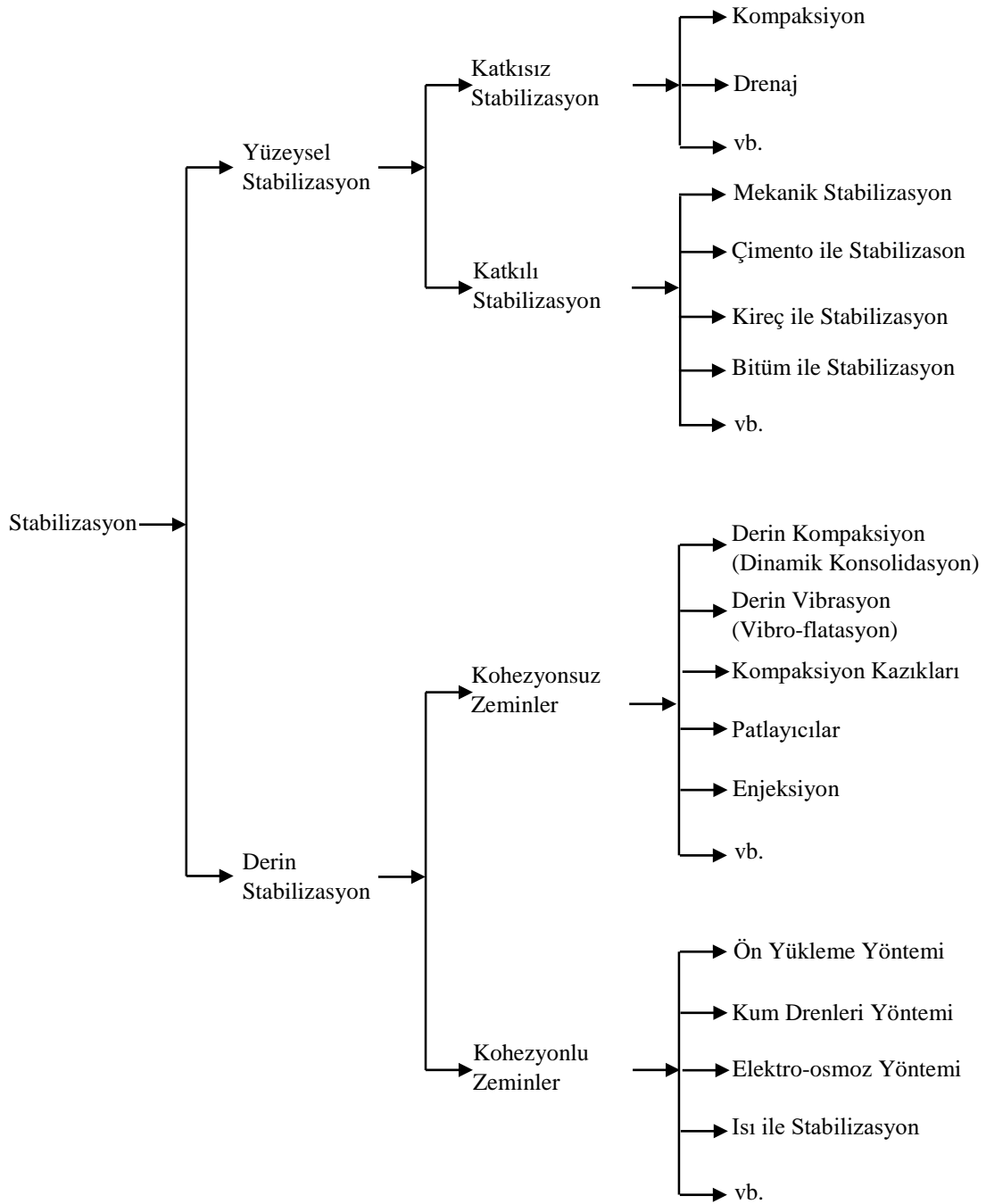
Van Impe (1989), stabilizasyon yöntemlerinde farklı bir gruptandırmaya giderek bu yöntemleri üç grupta toplamıştır. Bunlar, sırasıyla şu şekilde ifade edilmiştir:

- ✓ Geçici etkiye sahip kozmetik yöntemler,
- ✓ Kalıcı etkiye sahip, hiçbir katkı kullanılmaksızın uygulanan yöntemler,
- ✓ Katkı maddeleri kullanılarak gerçekleştirilen kalıcı etkili yöntemler.

Mitchell ve Gallagher (1998) zemin türlerine göre değişen stabilizasyon yöntemlerini Şekil 1.1’deki gibi sunarken, Uzuner (2013) zemin ıslah yöntemlerini Şekil 1.2’deki gibi açıklamıştır.



Şekil 1.1 Zemin türlerine göre stabilizasyon yöntemlerinin belirlenmesi (Mitchell ve Gallagher, 1998).



Şekil 1.2. Stabilizasyon yöntemleri (Uzuner, 2013).

Stabilizasyon çalışmaları amacına ve zemin cinslerine göre farklılık arz eder. Hunt (1986 ve 1994) tarafından sunulan zemin cinslerine göre stabilizasyon yöntemleri Tablo 1.1 yardımıyla ifade edilmiştir. Stabilizasyon amacına göre kullanılacak zemin ıslah yöntemleri ise Tablo 1.2’de yer almaktadır (U.S. Army Corps. of Eng., 2003).

Tablo 1.1. Zemin cinslerine göre stabilizasyon yöntemleri (Hunt, 1986 ve 1994).

Zemin cinsleri		Stabilizasyon yöntemleri
Çeşitli dolgular	Sığ	Kazı/Geri dolgu
	Derin	Dinamik kompaksiyon, kum kolonlar
Organik zeminler	Sığ	Kazı/Geri dolgu, geotekstil
	Derin	Sürşarj, geotekstil, kum kolonlar
	Tabakalı	Sürşarj, patlatma tekniği, dinamik kompaksiyon, kompaksiyon enjeksiyonu, kum kolonlar, taş kolonlar
Yumuşak killer	Sığ	Kazı/Geri dolgu, geotekstil
	Derin	Sürşarj, geotekstil, kum veya kireç kolonlar
	Tabakalı	Sürşarj, dinamik kompaksiyon, kompaksiyon enjeksiyonu, kum veya kireç kolonlar
Killer		Mekanik stabilizasyon, kireç stabilizasyonu, termal (dondurma), elektro-osmoz, geosentetik, drenaj
Gevşek siltler	Sığ	Kazı/Geri dolgu, tuz katkısı
	Derin	Dinamik kompaksiyon, sürşarj, taş kolonlar, elektro-osmoz, vakum kuyuları
Gevşek kumlar	Sığ	Çimento veya bitüm stabilizasyonu, dinamik kompaksiyon
	Derin	Vibroflatasyon, vibrokompaksiyon, dinamik kompaksiyon, enjeksiyon, taş kolonlar, drenaj kuyuları, termal (dondurma)
Sıvılaştırılabilen zeminler		Dinamik kompaksiyon, enjeksiyon, taş kolonlar, drenaj
Şişen zeminler		Kireç stabilizasyonu, drenaj, çimento, uçucu kül, tuz, kimyasal katkıları
Çatlaklı kayalar		Enjeksiyon, ankraj, şatkrit, yüzey altı yatay drenaj

Tablo 1.2. Stabilizasyon amacına göre kullanılabilen zemin ıslah yöntemleri (U.S. Army Corps. of Eng., 2003).

Amaçlar	Stabilizasyon yöntemleri
Sıvılaşma direncini arttırmak. Deplasmanları azaltmak.	Vibrokompaksiyon Taş kolonlar Derin dinamik kompaksiyon Patlayıcı tekniği ile kompaksiyon Çakıl kolonlar Jet grout Kompaksiyon enjeksiyonu Granüler kolonlar (kum ve çakıldan)
Farklı oturmaya maruz kalabilecek yapıların zeminlerini ıslah etmek. Farklı oturma, deformasyon ve kırılma direncinin arttırmak.	Kompaksiyon enjeksiyonu Jet grout Mini kazıklar
Ani oturmaları azaltmak.	Vibrokompaksiyon Derin dinamik kompaksiyon Patlayıcı tekniği ile kompaksiyon Kompaksiyon enjeksiyonu Jet grout Granüler kolonlar (kum ve çakıldan)
Konsolidasyon oturmalarını azaltmak.	Ön yükleme (sürşarj) Jet grout Kompaksiyon enjeksiyonu Taş kolonlar Elektro-osmoz
Konsolidasyon oturması oranını arttırmak.	Sürşarj dolgulu veya dolgusuz düşey drenler Granüler kolonlar (kum ve çakıldan)
Şev stabilitesini arttırmak.	Payanda dolgusu Çakıl drenler Granüler kolonlar (kum ve çakıldan) Kompaksiyon enjeksiyonu Jet grout Zemin çivi ve vidaları
Şişen zeminleri ıslah etmek.	Kireç stabilizasyonu Çimento stabilizasyonu Mekanik stabilizasyon Drenaj
Erozyon direncini arttırmak.	Bioteknik stabilizasyon Mekanik stabilizasyon Kompaksiyon

Tablo 1.2'nin devamı

Amaçlar	Stabilizasyon yöntemleri
Sızıntı yollarını kapamak ve/veya su akımı doğrultusundaki borulanmayı azaltmak.	Kompaksiyon enjeksiyonu Penetrasyon enjeksiyonu
Çatlaklardan ve birleşim yerlerinden su kaçaklarını engellemek.	Kompaksiyon enjeksiyonu
Göçen zeminleri ıslah etmek.	Derin dinamik kompaksiyon Vibrokompaksiyon Enjeksiyon

Geoteknik mühendisliği açısından zemin stabilizasyon tekniği olarak hangi yöntem seçilirse seçilsin, elde edilen sonuçları sahada standart penetrasyon deneyi (SPT) ve konik penetrasyon deneyi (CPT) ile kontrol etmek son derecede önemlidir. Elde edilen veriler yeterli olmadığı takdirde, istenilen özellikler elde edilinceye dek stabilizasyon işlemleri farklı biçimlerde tekrar edilmelidir (Kayabalı, 2010).

Tablo 1.1 ve Tablo 1.2'den görülebileceği üzere farklı amaçlara yönelik birçok stabilizasyon yöntemleri mevcuttur. Her bir yöntemin uygulanmasında belirli maliyetlerin göz önüne alınması gerekmektedir. Zemin stabilizasyonunda yaklaşık maliyet tablosu (U.S. Army Corps. of Eng.,2003) Tablo 1.3'de sunulmuştur.

Jet grout yöntemi gibi çok yüksek maliyetli çalışmaların yanı sıra, kompaksiyon gibi düşük maliyetli çalışmaların da içinde yer aldığı stabilizasyon konusunun tüm detaylarına çalışma kapsamında inilmeyecek, kısaca mekanik stabilizasyondan bahsedilip, ardından kimyasal stabilizasyon ve türleri hakkında bilgi verilecektir. Daha sonra bilgisayarlı tomografi ile ilgili genel bilgilere ve literatür incelemesine yer verildikten sonra bu bölüm sonlandırılacaktır.

Tablo 1.3. Zemin stabilizasyonunda yaklaşık maliyet tablosu (U.S. Army Corps. of Eng., 2003).

Metodlar	Göreceli Maliyet	\$/m	\$/m ²	\$/m ³	Referans
Derin dinamik kompaksiyon	Düşük	-	8-32	5	FHWA (1998)
Vibrokompaksiyon	Düşük-Orta	Arka dolgusuz 15, Granüler arka dolgulu 25	-	1-4	
Taş kolonlar	Orta	45-60	-	-	
Çakıl drenler	Orta	11-22	-	-	Ledbetter (1985)
Patlatma tekniği ile kompaksiyon	Düşük	-	-	2-4	Adailer (1996)
Jet grout	Yüksek-Çok yüksek	Sızma kontrolü 30-200, Kazı sahasının desteklenmesi 95-650	-	-	FHWA (1998)
Zemin çivileri	Orta-Yüksek	-	Geçici 165-775, sürekli 160-400	-	
Kompaksiyon enjeksiyon	Düşük-orta	-	-	5-50	
Derin zemin karıştırılması	Yüksek-Çok yüksek	-	-	100-150	
Kimyasal enjeksiyon	Yüksek	-	-	150-400	Hayward (1996)
Bioteknik stabilizasyon	Uygulamaya bağlı	Bitkilendirilmiş geogridler 40-100	Şevi ağ şeklinde saran bitkilendirme 275-550	-	ASCE (1997)
Zeminin değiştirilmesi	Orta	-	-	10-20	Hayward (1996)
Düşey drenler	Düşük	1.2-4	-	-	FHWA (1998)
Taneli Enjeksiyon	Orta	-	-	3-30	Adailer (1996)

1.4.1. Mekanik Stabilizasyon

Mekanik stabilizasyon iki veya daha fazla zeminin farklı oranlarda birbiriyle karıştırılması sonucu istenilen şartları sağlayan zeminin elde edilmesi olarak

tanımlanabilir. Bu uygulama ile yük altında kalıcı deformasyonlar meydana getirmeyen stabil zeminlerin elde edilmesi sağlanmış olur (Tunç, 2002). Mekanik stabilizasyonda ayrıca zeminin bir kısmı uzaklaştırılarak kompaksiyon uygulaması yapılabilir. İşin amacına göre uygun granülometri seçilmelidir (Uzuner, 2013).

Mekanik stabilizasyon, zemini kazıma, ıslah etme ve yeniden yerine yerleştirme aşamalarından meydana gelmektedir (Edil vd., 2002). Zemin ıslah edilirken, birbirinden farklı özellikler ihtiva eden zeminlerin karışımında karışımın homojen olması gerekmektedir (Rodriquez vd., 1973; Dunn, 1966). Mekanik stabilizasyonun amaçları Winterkorn ve Fang (1975) tarafından şu şekilde ifade edilmiştir:

- ✓ Gradasyonun düzeltilmesi,
- ✓ Likit limit ve plastisite indisi değerlerinin düşürülmesi,
- ✓ Drenaj özelliklerinin artırılması,
- ✓ Oturmaların ve donma-çözülme etkilerinin azaltılması,
- ✓ Dayanım ve durabilite özelliklerinin artırılması,
- ✓ Kapilaritenin azaltılması.

1.4.2. Kimyasal Stabilizasyon

Katkı maddeleri ile zemin stabilizasyonu öncelikle ulaşım yapılarının tabakalarında kullanılmaya başlanmıştır. Bunun yanı sıra su yapılarında da bu uygulamadan yararlanılmıştır. Kimyasal stabilizasyonun bir diğer uygulama alanı ise hafif yapı temelleridir. Böylece mühendislik özellikleri yetersiz olan zeminlerin iyileştirilmesi sağlanmıştır (Önalp, 1983). Kimyasal stabilizasyon yöntemi zemin özelliklerinin iyileştirilmesi açısından en etkin ve uygun maliyetli yöntemdir (Kukko, 2000).

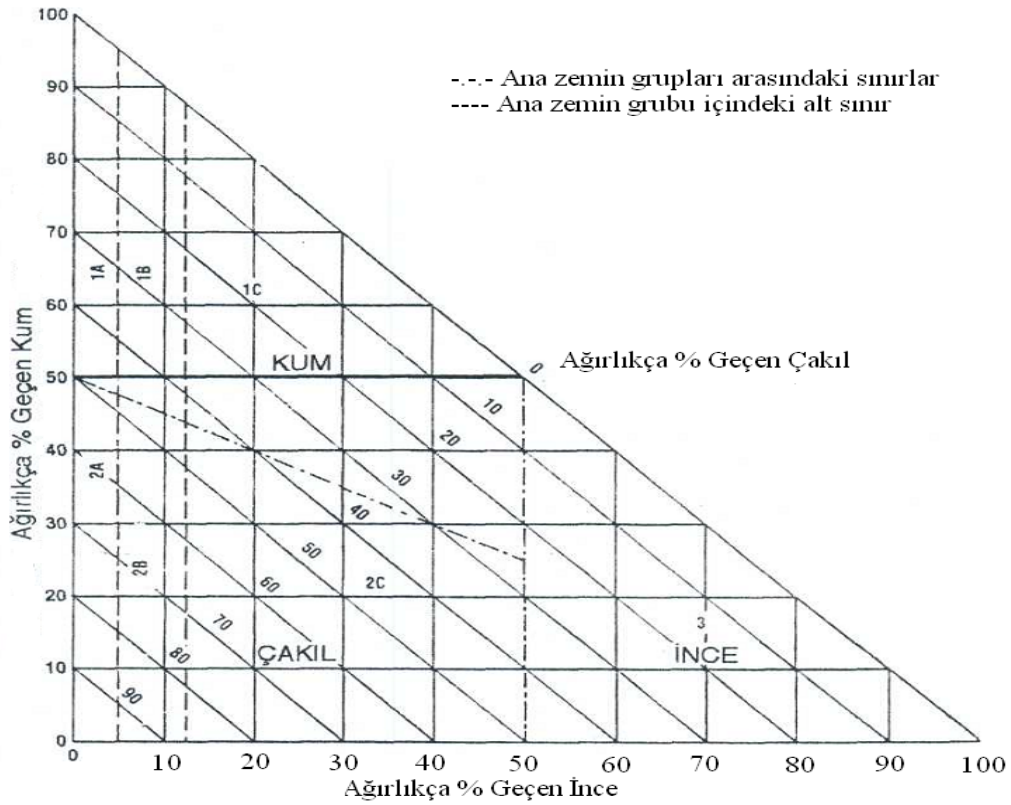
Kimyasal stabilizasyonun ana amaçları şu şekilde özetlenebilir:

- ✓ Hacim sabitliğini sağlama,
- ✓ Dayanımı artırma,
- ✓ Meydana gelebilecek deformasyonları azaltma,
- ✓ Durabiliteyi artırma,
- ✓ Permeabiliteyi azaltma,
- ✓ Aşınabilirliği azaltma,
- ✓ Taşıma gücünü artırma,
- ✓ Oturmaları azaltma,

- ✓ Değişkenliği kontrol etme,
- ✓ Şişme ve büzülme azaltma,
- ✓ Şev kaymalarını önlemek üzere güvenlik sayısını artırma (Pektaş, 2012).

Katkı maddeleriyle stabilizasyonda, çevre ve yükleme koşullarına göre zeminin geoteknik özelliklerinin güvenli, ekonomik ve doğal bir malzeme ile iyileştirilmesi amaçlanmaktadır. Yaygın olarak kullanılan katkı maddeleri kireç, çimento, bitüm ve bazı özel kimyasal bileşiklerdir (Hausmann, 1990).

Zeminin ufalanma karakteristikleri baz alınarak hazırlanan üçgen gradasyon nomogramı Şekil 1.3'de sunulmuştur. Bu şekle göre zemine ait ufalanma karakteristikleri belirlenir ve buna en uygun stabilizatörün cinsi tespit edilir (Tunç, 2001). Kimyasal stabilizasyonda katkı seçimi için bir başka rehber ise U.S. Army Corps. of Eng. (2003) tarafından sunulmuş olup, Tablo 1.4'te ifade edildiği biçimdedir.



Şekil 1.3. Zemin gradasyon üçgeni (Tunç, 2001).

Tablo 1.4. Kimyasal stabilizasyonda katkı seçimi için rehber (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	-	Çimento katkısı sadece iyi gradasyonlu zeminlerde ve 4 No.lu elekten geçen en az %45 olduğu durumlarda
2B	GW GP GW-GC GP-GC	Bitüm Çimento Kireç K-Ç-P*	PI<10 PI<30 PI>12 PI<25	-	
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 ve puzolan kombinasyonu

** $PI \leq 20 - ((50-200 \text{ No.lu elekten geçen yüzde})/4)$

1.4.2.1. Kireç ile Zemin Stabilizasyonu

Dolgu malzemesi kriterlerini sağlamayan, serbest basınç dayanımı ve CBR değerleri düşük ve şişme potansiyelleri yüksek zeminlerin kullanılabilirlik özelliklerini arttırmak amacıyla belli fiziksel ve kimyasal özelliklere sahip toz halinde sönmüş veya sönmemiş kireçle katılması ve karıştırılması şeklinde yapılan iyileştirme işlemine kireçle stabilizasyon denilmektedir (Kavak vd., 2008).

Killi zeminlerin kireçle iyileştirilmesi yöntemi yıllardır yaygın bir şekilde kullanılan ve birçok ülkede tren yolu, kara yolu, park alanı ve yapı inşaatlarında öncelikli olarak

tercih edilen yöntemdir (Goldberg ve Klein, 1952; Clare ve Crunchley, 1957; Terrel vd., 1979). Ladd vd. (1960) kireçle kilin girdiği reaksiyonu analiz edebilmek amacıyla çalışmalarda bulunmuşlardır. Kireçle stabilizasyon sonucu meydana gelen olaylar; katyon değişimi, çimentolaşma ve karbonatlaşmadır (Yıldırım, 2002). Özellikle montmorillonit mineralleri içeren killer, kireçle birlikte çimentolaşma olayını gerçekleştirirler (Yıldız, 1998).

Killi zemine kireç ilavesiyle plastisite indisi değerlerinde azalmalar meydana gelmektedir (Özaydın, 1995; Uzuner, 2013). Genellikle zeminle karıştırılan kireç oranının artırılmasıyla likit limit değerlerinde düşüşler, plastik limit değerlerinde ise artışlar gözlemlenir (Aytekin, 2004). Kireçle stabilizasyon killerin geçirimsizliğini artırırken, şişme parametrelerinde azalmalar meydana gelir (Evans ve Bell, 1981; Güney vd., 2007).

Eades ve Grim (1960) yaptıkları çalışmada zemine farklı oranlarda kireç karıştırmış ve serbest basınç deneyleri yapmışlardır. Deney sonuçlarına göre, serbest basınç dayanımı değerlerinde artan kireç miktarına bağlı olarak %200-%1000 arasında artışların meydana geldiği sonucuna varmışlardır. Zemine kireç eklenmesiyle yapılan stabilizasyon çalışmalarının zemin dayanımına olan katkısı 10 yılı aşan sürelerde dahi devam ettiği kanıtlanmıştır (TRB, 1987).

Kireç ile zemin stabilizasyonu; 200 nolu elek altı malzeme miktarı %25'ten büyük, plastisite indisi değeri minimum 10 olan ve kil içeriği %10'dan fazla olan zeminler için oldukça uygun bir yöntemdir (Dallas, 1995).

Zemin stabilizasyonu çalışmalarında, çimento ve kirecin katkı maddeleri olarak kullanılmasında sağlanması gereken durabilite kriterleri Tablo 1.5'te özetlenmiştir. Zemin cinslerine göre optimum kireç oranı değerleri ise Tablo 1.6'da yer almaktadır.

Tablo 1.5. Kireç ve çimento stabilizasyonunda durabilite kriterleri (Tunç, 2002)

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

Tablo 1.6. Zemin cinslerine göre optimum kireç oranı değerleri (Tunç, 2002)

Zemin türü	Kireç miktarı, kuru zeminin ağırlıkça yüzdesi
İyi derecelenmiş killi çakıl	3
Organik zeminler	Tavsiye edilmez.
Kumlu kil	5
Siltli kil	2-4
Plastik kil	3-8
Yüksek plastisiteli kil	3-10
Kumlar	Tavsiye edilmez.

Tablodaki verilere göre, kil ihtiva etmeyen ve organik zeminler için kireçle stabilizasyon uygun bir yöntem değildir. Killi zeminlerde ise kireç stabilizasyonu serbest basınç mukavemetleri açısından önemli iyileştirmelere yol açar. Bu tip zeminlerde çimento ile stabilizasyona nazaran daha büyük dayanım değerleri elde etmek mümkündür. Ayrıca hacimsel stabilitenin sağlanması açısından kireç stabilizasyonu killi zeminlerde uygulanabilir bir tekniktir (Tunç, 2002).

Zemin stabilizasyonu üzerine yapılan çalışmalarda kireç, çimento ve bitümlü katkıları ön plana çıkmaktadır. Kireç stabilizasyonu sonucunda zeminde kısa dönemde optimum su muhtevası artmakta, proktor yoğunlukları düşmekte, plastisite indisinde azalmalar olmakta, proktor eğrisi düzleşmekte, CBR (Kaliforniya taşıma oranı) değerlerinde ise artışlar olmaktadır (Kavak, 1996).

Eren ve Filiz (2009) tarafından yapılan çalışmada %8 oranında kirecin katkı maddesi olarak kullanılmasıyla birlikte, zeminin şişme davranışının sonlandığı tespit edilmiştir. Kireç ve polipropilen liflerin beraber kullanıldığı başka bir çalışmada, %5 kireç ve %0.25 lifin beraber katkı maddesi olarak kullanılması durumunda en yüksek serbest basınç dayanımı değerlerinin elde edildiği görülmüştür (Cai vd., 2006).

Al-Mukhtar vd. (2010), yüksek plastisiteli killi zeminin kireçle stabilizasyonunda kür sıcaklığının 50 °C'de tutulmasının 20 °C'de tutulmasına göre puzolanik özelliklerde ve zeminin mühendislik özelliklerinde iyileştirmeler meydana getirdiğini tespit etmişlerdir. Rajasekaran ve Rao (2002), yaptıkları kireçle stabilizasyon çalışmasında aşırı plastik bir zeminin permeabilite katsayısının kirecin etkisiyle zaman içinde 15-18 kat arttığını tespit etmişlerdir.

Kirecin katkı maddesi olarak kullanıldığı stabilizasyon çalışmalarında CaO (sönmemiş kireç) veya Ca(OH)₂ (sönmüş kireç) kullanılmaktadır. Kirecin ana maddesini oluşturan kireç taşının öğütülüp, 900 °C üstü sıcaklıkta döner fırınlarda pişirilmesiyle meydana gelen reaksiyon sonucu sönmemiş kireç açığa çıkar. Sönmemiş kirecin su ile karıştırılması neticesinde meydana gelen reaksiyon sonucunda ise sönmüş kireç oluşur.

Sönmemiş kirecin yakıcı özelliğe sahip olmasından dolayı, bu katkının stabilizasyon çalışmalarında tercih edilmesi çalışmayı yapan kişilerde özellikle deri ve göz tahrişlerinin olmasına sebebiyet verir. Ayrıca kalsiyum oksit in hava nemi ile kolayca reaksiyona girmesi sonucunda yapılan iyileştirmenin etkinliği azalabilir. Sönmemiş kireçle stabilizasyon daha çok granüler malzeme içeren zeminlerde kullanılırken, kil ve silt içeren zeminlerde sönmüş kireçle stabilizasyon tercih edilmektedir.

Kireçle zemin stabilizasyonu sonucunda katyon değişimi, yumaklaşma, agregasyon ve çimentolaşma meydana gelir (Fang, 1991). Kireçle stabilizasyon için gerekli reaksiyonların meydana gelebilmesi için ortamda suyun bulunması gerekir (Little, 1987).

Kireçle stabilizasyonun reaksiyon mekanizmasında, kirecin zemin taneleri arasındaki boşluk suyunda iyonlaşması sonucu meydana gelen Ca⁺ iyonu konsantrasyonu arttırırken, OH⁻ iyonları ise ortamın pH değerini yükseltir. Ortamın pH değerinin artmasıyla zeminin katyon değişim kapasitesi artar. Genellikle birkaç saat içinde tamamlanan ve zeminin plastisite, işlenebilirlik gibi özelliklerinde önemli ölçüde değişimlerin yaşandığı bu reaksiyonlara katyon değişimi reaksiyonları denir (Bell, 1996).

Katyon değişimi reaksiyonlarının ardından, yumaklaşma ve agregasyon meydana gelmeye başlar. Komşu kil taneleri arasındaki Van der Waals bağlarının güçlenmesiyle birlikte kil taneleri dispersif yapıdan, yumak yapıya dönüşür. Gerçekleşen bu olaya yumaklaşma denilmektedir. Yumaklaşmayı takiben, kil taneleri arasında hidrojen ve Van der Waals bağlarıyla birbirine kenetlenme ve temas meydana gelir. Bu olaya ise agregasyon adı verilir (Çalık, 2012).

Killerin bileşiminde genellikle var olan SiO₂, Al₂O₃ ve Fe₂O₃ bileşikleriyle kirecin suda iyonlaşmasıyla meydana gelen Ca⁺² katyonu arasında kimyasal reaksiyonlar meydana gelir. Kil içerisinde yeterli miktarda SiO₂, Al₂O₃ ve Fe₂O₃ bileşikleri bulunmuyorsa puzolan ilavesiyle kirecin etkinliği arttırılır (Atanur, 1973). Meydana gelen bu reaksiyonlar sonucu kalsiyum silika hidrate (CSH), kalsiyum alümina hidrate (CAH) ve kalsiyum alümina-silika hidrate (CASH) gibi mukavemetli ürünlerin oluşmasına çimentolaşma denir. Çimentolaşma ürünleri zemin dayanım ve durabilitesinin artmasını sağlarlar.

1.4.2.2. Çimento ile Zemin Stabilizasyonu

Çimento su ile reaksiyona girerek sertleşen ve kalker, kil ve alçıtaşından meydana gelen hidrolik bir bağlayıcıdır. Çimento ile stabilizasyonda genel olarak zemin kuru ağırlığının %5-15'i oranında çimento zeminle birlikte karıştırılarak kompaksiyon uygulanır. Yaygın olarak kullanılan çimento türü portland çimentosudur. Çimentonun taneler arasında bağlar oluşturmasıyla birlikte mukavemet artışı meydana gelir. Saf kohezyonlu ve organik zeminler haricindeki tüm zeminler için çimento ile stabilizasyon uygun bir yöntemdir. Serbest basınç dayanımı testleriyle birlikte stabilizasyon için gerekli optimum çimento miktarı tayin edilir. Zemin ince daneli ise optimum su muhtevasından daha yüksek değerlerde su katılarak deneylerin yapılması daha uygundur (Uzuner, 2013).

Çimentoda yer alan silika puzolanik aktiviteyi meydana getiren maddedir. Bu yüzden, kil mineralleri içermeyen zeminlerde çimento stabilizasyonu uygun bir yöntemdir. Zeminin mukavemetinde meydana gelen artışlar, zeminle karıştırılan çimento oranına bağlı olmakla birlikte betondaki mukavemet artışlarına benzer özellikler göstermektedir (Özaydın, 1995).

Türkiye’de sanayi ve teknolojinin gelişmesiyle birlikte çimento ile zemin stabilizasyonu sıkça kullanılan bir yöntemdir. Laboratuvar deneyleri sonucunda elde edilen çimento katkı miktarı arazide üniform şekilde karıştırmanın güç olması sebebiyle bir miktar arttırılarak uygulanmalıdır. Kompaksiyon işlemi hızlı bir şekilde tamamlanmalıdır. Optimum çimento katkı oranı iyi derecelenmiş kumlarda %2-6, yüksek platisiteli killerde ise %8-12 seviyelerindedir (Demiröz ve Karaduman, 2009).

Kireçle stabilizasyonda olduğu gibi çimento ile stabilizasyon geçmişten günümüze yıllardır uygulanan bir metottur. Amerika Birleşik Devletleri’nin eyalet karayollarında 1920’li yıllarda çimento ile stabilizasyon uygulamaları görülmektedir. İngiltere’de 1917 yıllarında başlanan çimento ile stabilizasyon çalışmaları endüstriyel gelişmelerle birlikte günümüz koşullarında Türkiye’de uygun bir stabilizasyon yöntemi olarak ön plana çıkmaktadır. Artan trafik yüklerinin etkisiyle birlikte ulaşım yollarında ve havalimanlarında özellikle yol temel ve alt temel tabakalarında kullanılan zeminlerin çimento ile stabilizasyon çalışmaları günümüzde oldukça fazla başvurulan bir yöntem haline gelmiştir (Mitchell, 1993; Demiröz ve Karaduman, 2009). Farklı zemin sınıflarında yer alan zemin tipleri için ağırlıkça çimento miktarları Tablo 1.7’de sunulmuştur.

Tablo 1.7. Farklı zemin sınıflarına göre çimento miktarı (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

1.4.2.3. Bitüm ile Zemin Stabilizasyonu

Bitüm ile stabilizasyon yaygın olarak karayollarında kullanılmaktadır. Kireç ve çimento ile zemin stabilizasyonunda genel olarak zemin dayanım parametrelerinde artışlar meydana gelirken, bitüm ile zemin stabilizasyonu zemin danelerinin birleşip suyun zararlı etkilerinden korunmasında etkin bir rol oynamaktadır. Bitümün zemin dane yüzeylerini kaplamasıyla birlikte ince daneli zeminlerde zeminin su etkisiyle beraber yumuşaması önlenirken, iri daneli zeminlerde zeminlerin kohezyon kazanması sağlanır. Danelerin bitümle beraber birbirine yapışmasıyla birlikte su ve rüzgar erozyonu sonucu meydana gelebilecek kayıpların önüne geçilir (Özaydın, 1995). Bitüm ile stabilizasyonda katkı maddesi olarak genelde asfalt veya katran gibi malzemeler kullanılır. Katkı maddesi oranı %5-10 seviyelerindedir. Bitümle stabilizasyon özellikle yollarda, yüzey kaplamasında tercih edilen bir yöntemdir (Uzuner, 2013).

Granüler ve plastik olmayan zeminlerde bitüm ile stabilizasyon çalışmaları genellikle daha başarılı sonuçlar vermektedir. Kohezyonsuz granüler zeminlerde bitüm, bir yandan zemini su geçirmez hale getirirken diğer yandan zemin danelerini birbirine bağlayarak zeminin yük taşıma kapasitesini artırır. İnce daneli zeminlerin bitümle stabilizasyonunda ise esas hedef geçirimsizliğin azaltılmasıdır (Çakıroğlu, 2007). Kohezyonlu zeminler yüksek su içeriğine maruz kaldığında şişme özelliği gösterebilen zeminlerdir. Bitüm ile kohezyonlu zeminler stabilize edildiğinde, asfalt filmi zemin danelerini sarar ve geçirimsiz bir tabaka elde edilmiş olur. Bitüm ile stabilizasyonun kohezyonlu zeminlere uygulanmasındaki zorluklardan dolayı, 200 nolu elek altı malzemenin %12'den az olması şartı getirilmiştir. 200 nolu elek altı malzeme miktarı %12'den fazla olduğu durumlarda,

karışım için gerekli bağlayıcı madde miktarı artar ve çok rijit karışımlar meydana gelir (Tunç, 2001).

1.4.2.4. Puzolanlar ile Zemin Stabilizasyonu

Puzolanlar, tek başlarına belirgin bir ölçüde bağlayıcılık özelliği bulunmayan normal sıcaklıklarda, sulu ortamda ve özellikle kireçle birleşerek bağlayıcılık özelliği kazanabilen malzemelerdir. Puzolan ismi, Napoli şehri yakınlarındaki küçük bir kasaba olan Pozzuoli kentinden gelmektedir. Kireçle birlikte kimyasal reaksiyon sonucu ortaya çıkan bileşikler suda çözünmeyen bir kararlılık göstermektedirler (Massazza, 1989). Ülkemizde özellikle İç Anadolu, Karadeniz, Ege, Marmara ve Akdeniz bölgelerinde bol miktarda doğal puzolan kaynakları bulunmaktadır (Okucu, 1998).

Erdoğan (1997) tarafından doğal puzolanlar; volkanik orjinli doğal puzolanlar ve ısısal oluşumlu killer, şeyller ve toprak malzemeleri olmak üzere ikiye ayrılmıştır. Doğal puzolanlara ait başka bir sınıflandırma Cook (1986) tarafından Tablo 1.8'deki gibi sunulmuştur.

Tablo 1.8. Doğal puzolanların sınıflandırılması (Cook, 1986).

Aktivite tipi	Aktivite özellikleri
1	Volkanik cam
2	Opal
3A	Kaolinit tipi kil
3B	Montmorillonit tipi kil
3C	İllit tipi kil
3D	Vermikülit karışık kil
3E	Attapuljit tip kil
4	Zeolit
5	Alüminyum hidrate oksitleri
6	Puzolan olmayanlar

Termik santrallerde yakılan pulverize edilmiş kömürden üç tip atık malzeme meydana gelir. Bunlar; taban külü, kazanın dibinde biriken cüruf malzeme ve atık malzemelerin %75-80 kadarını oluşturan uçucu küldür (Aksoy, 1992). Uçucu kül bir fabrika atığı olup, silika, alümina, değişik oksitler ve alkaliler ihtiva eden bir fazdır.

Hidrate kireç ile reaksiyona kolayca girebilirler ve yol alt temel ve temel tabakalarında kullanımları uygundur.

Al_2O_3 , Fe_2O_3 ve özellikle SiO_2 mineralleri, kireç ve yeterli su ile reaksiyona girdiklerinde yüksek puzolanik aktivite göstermekte olduğu bilindiğinden killi zeminlerin stabilizasyonunda kireçle birlikte puzolanik madde kullanımı popüler bir uygulamadır. Uçucu kül ve kireç karışımları için verilen karışım oranı değerleri sırasıyla %10-35 ve %2-10 şeklindedir (Yıldırım, 2002). Almanya, Hollanda ve Belçika'da üretilen toplam uçucu külün %95'inden fazlası diğer alanlarda kullanılabilen iken, bu oran dünyada ancak %25 civarlarındadır (Bhattacharjee ve Kandpal, 2002).

ASTM C 618'e göre uçucu küller C ve F sınıfı olmak üzere ikiye ayrılırlar. F tipi uçucu küllerin CaO miktarı düşüktür ve yalnız başına çimentolaşma özelliği oldukça azdır. Fakat kireç ile reaksiyona girdiklerinde puzolanik özellik göstermektedirler. Yüksek oranda kireç ihtiva eden C tipi uçucu küller ise linyit ve kömürün yanması sonucu elde edilir ve ek bir katkı maddesi ihtiyacı duyulmaksızın yalnız başlarına bağlayıcı olarak kullanılabilirler.

Miller ve Azad (2000), çimento fabrikalarındaki fırın bacalarından elde edilen fırın külünün stabilizasyon çalışmalarında kullanılabilirliğini araştırmışlardır. Üç farklı zemin türünde yapılan deneyler sonucunda, karışımların pH değerleri ile plastisite indisi ve serbest basınç dayanımı değerlerindeki değişimler arasında birbirine yakın ilişkiler olduğu tespit edilmiştir.

Şenol ve Edil (2004), taşıma gücü düşük ve içinde organik madde ihtiva eden bir zeminin uçucu kül ile stabilizasyonu üzerine bir araştırma yapmışlardır. Çalışmada kullanılan uçucu kül F tipi uçucu küldür. Çalışma kapsamında optimum su muhtevalarını belirleyebilmek amacıyla kompaksiyon deneyleri yapılmış olup, CBR deneyleri ile birlikte hazırlanan karışımlardaki iyileşmeler incelenmiştir. İki farklı zemin türü kullanarak yapılan ve kür süresi 7 gün olarak tespit edilen çalışmadan elde edilen veriler, uçucu kül ihtiva eden karışımların CBR değerlerinde 10 kata varan artışların olduğunu göstermiştir.

Farklı tip zeminlerin uçucu kül ile stabilizasyonu çalışmalarında, en etkin stabilizasyonun düşük plastisiteli killerde gerçekleştiği sonucuna varılmıştır (Prakabar vd., 2004). Uçucu kül puzolanik bir madde olup ithiva ettiği CaO puzolanik reaksiyonlara sebebiyet vermektedir (Dermates ve Meng, 2003).

Attom ve Al-Sharif (1998), zeytinyağı endüstrisi atık ürünü küllerini zemin stabilizasyonu çalışmalarında katkı maddesi olarak kullanmışlar ve zemin açısından

iyileştirmelerin meydana geldiğini gözlemlemişlerdir. Bu iyileşmelere neden olarak atık malzeme külünün içeriğindeki CaO gösterilmiştir.

Brooks (2009), şişen zeminin uçucu kül ve pirinç kabuğu külü ile stabilizasyonu üzerine bir çalışma yapmıştır. Çalışma neticesinde, en yüksek serbest basınç dayanımı değerleri %12 pirinç kabuğu külü ve %25 uçucu kül oranlarında elde edilmiştir.

Ansary vd. (2006), iki farklı zemin türünde uçucu kül ile stabilizasyon çalışması yapmışlardır. Çalışmadan elde edilen veriler sonucunda, deneylerde kullanılan sahil zeminlerinin %12-%18 uçucu kül ve %3 kireçle birlikte stabilize edilmesinin ardından yol temel ve alt temellerinde kullanılabilmesi için gereken mukavemet şartlarını sağladığı ortaya konmuştur.

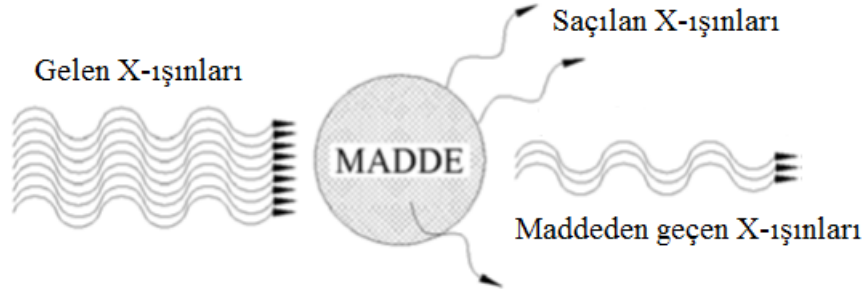
Yüksek fırın cüruflarının mühendislik özelliklerinin incelenmesiyle birlikte puzolanik özelliklere sahip olduğunun belirlenmesinin ardından 19. yüzyıldan itibaren bu malzemenin ticari olarak üretimine başlanmıştır. 1883 ve 1892 yıllarından bu yana yüksek fırın cürufu çimento hammaddesi ve mineral katkı maddesi olarak kullanılmaktadır. Günümüzde birçok ülkede yüksek fırın cürufu içeren çimento üretimi yaygın bir şekilde devam etmektedir (Tokyay, 2002).

1.5. Bilgisayarlı Tomografi ve Mühendislik Alanında Kullanımı

Bilgisayarlı tomografi, 1970'li yıllarda Godfrey Hounsfield ve Allan Cormack tarafından geliştirilmiş bir radyolojik görüntüleme tekniğidir (Demir, 2000). Bilgisayarlı tomografi ile görüntüleme tekniği medikal amaçlı icat edilmesine ve bu alanda çok yaygın bir biçimde kullanılmasına karşın, 1980'li yıllardan bu yana özellikle petrol mühendisliği uygulamalarında ve farklı mühendislik sektörlerinde kullanılmaya başlanmıştır (Wellington ve Vinegar, 1990). Morgan vd. (1980), betonla ilgili çalışmalar yapmak amacı ile bilgisayarlı tomografi tekniğinden yararlanmışlardır. Martz vd. (1991), bilgisayarlı tomografinin betonarmede kullanılabilirliği üzerine bir çalışma yapmışlardır.

1895'te Röntgen tarafından keşfedilen x-ışınının gelişmiş teknolojisi olan bilgisayarlı tomografi, x-ışını soğurulma matrisinin görüntüye dönüşmesi prensibine dayalı çalışır. Elde edilen görüntülerle, farklı yapı ve kesitteki maddelerin iç yapıları tahribatsız biçimde belirlenmiş olur (Blanco-Varela vd., 2006). X-ışını ultraviyole ve gama ışınları arasında olan ve güçlü frekansa sahip olup, düşük enerji düzeyinde yayılan ışınlardır (Tuncel, 2002). Bilgisayarlı tomografi çalışma prensiplerine göre x-ışınlarının enerjileri maddeden

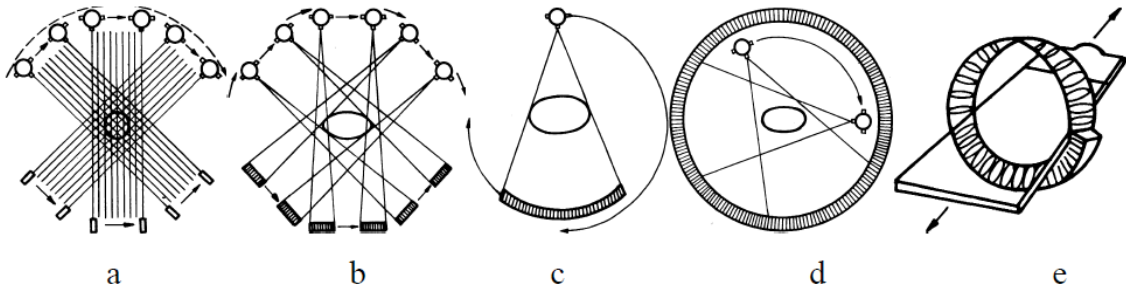
geçerken absorpsiyon ve saçılma nedeniyle azalır (Vinegar, 1986). Maddeye gelen x-ışınlarının maddeden geçtikten sonra azalışı Şekil 1.4 vasıtasıyla açıklanmıştır.



Şekil 1.4. X-ışınlarında meydana gelen azalma (Tekin, 2010).

X-ışınlarının enerjilerinin eşit seviyede olduğu durumlarda yoğunluk değeri yüksek olan malzemeler düşük olan malzemelere oranla daha fazla x-ışını soğururlar. Bunun neticesinde yoğunluğu yüksek olan malzemelere ait bilgisayarlı tomografi değeri daha yüksek olur (Demir, 2000; Akın vd., 1996; Wong vd., 2005; Aruntas vd., 2010).

Geçmişten günümüze kullanılan beş nesil bilgisayarlı tomografi tarayıcısı bulunmaktadır. Birinci nesil tarayıcılarda kesit görüntüleme 6-7 dk kadar sürerken, beşinci nesil tarayıcılarda bu zaman dilimi 50-100 milisaniye mertebelerine kadar inmiştir (Tekin, 2010; Hunt, 1988; Tekin vd., 2007). Tomografi cihazlarının gelişimi Şekil 1.5'te sunulmuştur.

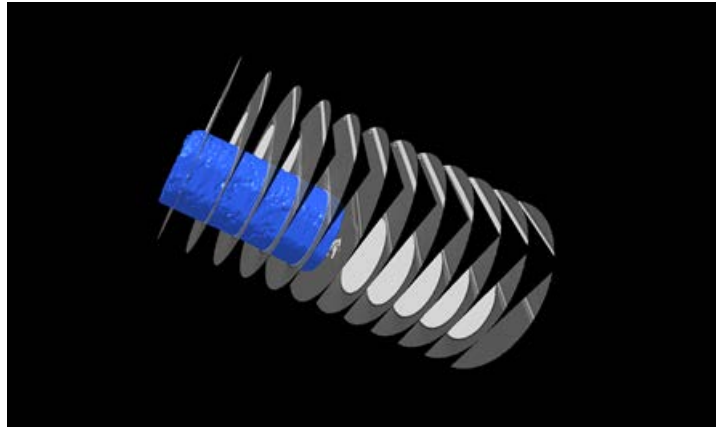


Şekil 1.5. Bilgisayarlı tomografi cihazlarının gelişimi (Tekin, 2010).

Bu şekilde birinci nesil tarayıcılardan beşinci nesile doğru gösterim, a şeklinden e şekline doğru gerçekleşmiştir. Birinci nesil tarayıcılar tek dedektörlü iken, ikinci nesil tarayıcılar çok dedektörlüdür. Üçüncü nesil tarayıcılarda tüp ve çok sayıda dedektör

birbirine bağı olarak 360° dönebilirler. Dördüncü nesil tarayıcılarda dedektörler sabit iken, tütün hareketli olduğu görölmektedir. En gelişmiş sistemler olarak görünen beşinci nesil tarayıcılarda ise tütün ve dedektörlerin her ikisi de sabitlenmiştir.

Bilgisayarlı tomografi tarayıcıları dedektör ve x-ışını tütün yardımıyla, görüntülenen nesneden ekmek dilimi gibi kesilmiş enine kesitler alan bir sistemdir. Bu cihazlarla nesneden enine kesitlerin alınması Şekil 1.6'da gösterilmiştir. Şekilde mavi renkte görüntülenen nesne 38 mm çapına ve 76 mm uzunluğuna sahip tek eksenli basınç deneyi numunesidir. Nesnenin taranması ve kesit alınması ise gri renkte sunulmuştur.



Şekil 1.6. Bilgisayarlı tomografi ile nesneden kesit alınması

Bilgisayarlı tomografinin çalışma prensibine göre, x-ışınları numuneye gönderilir ve ışın demetinin sayısallaştırılması ile bir görünüm algoritması oluşur. Sonuç olarak bilgisayarın yaptığı çözümlenmeler sonucunda bir resim görüntülenir (Hove vd., 1987). Bilgisayarlı tomografi tekniği ile görüntü almanın en önemli avantajlarından biri, soğurulma farklarının %0.1 mertebelerinde olmasından dolayı 2 mm²'den daha küçük alanları bile doğru olarak ölçebilmesi ve üç boyutlu görüntüsü elde edilen nesnenin herhangi bir görüntüsüne ulaşabilme imkanı sağlamasıdır (Demir, 2000).

Bilgisayarlı tomografi cihazının en önemli geliştiricisi olan Godfrey Hounsfield kendi adını taşıyan bir skala oluşturmuştur. Bu skalaya kısaca HU değerleri denilmektedir. Uluslararası bir ölçek olarak literatüre giren HU değerleri maddeye gelen x-ışınındaki zayıflamaları temsil eder. HU değerleri normal dağılım eğrilerinden aritmetik ortalamalar hesaplanarak oluşturulmuştur. Farklı maddelere ait HU değerleri Tablo 1.9'da sunulmuştur.

Tablo 1.9. Farklı maddelere ait HU değerleri (Tekin, 2010).

Madde	HU değeri
Hava	-1000
Yağ	-50
Su	0
Kuru kum	400
Sertleşmiş çimento hamuru	1731
Toz halindeki çimento	1038
Beton	900-1800

1.6. Literatür İncelemesi

Bell (1996), montmorillonit, kaolin ve kuvars içerikli killerin stabilizasyonu üzerine çalışmıştır. Tabakalı ve sert killerin stabilizasyonu üzerine yapılan çalışma kapsamında, montmorillonitin plastisitesinin kireç ilavesiyle azaldığı, kaolin ve quarz numunelerinin plastisitesinin ise arttığı ortaya konmuştur. Sert killerde plastisite değişiminin çok az miktarda gerçekleştiği, ince tabakalı killerde ise plastisite değişiminin önemli oranda azaldığı tespit edilmiştir. Tüm numunelerin optimum su içeriklerinde artışlar, CBR ve maksimum kuru birim hacim ağırlık değerlerinde azalmalar meydana gelmiştir. Çalışmadan elde edilen veriler ışığında, kireçle stabilize edilmiş numunelerde önemli derecede dayanım artışının meydana geldiği ve kür süresinin dayanım artışı hızlarında belirgin seviyede etkin olduğu sonucuna varılmıştır.

Chotard vd. (2003) tarafından çimento hamurlarıyla yapılan çalışmada, kalsiyum alüminat çimentosunun erken hidrasyonunu belirleyebilmek amacı ile bilgisayarlı tomografi tekniğinden yararlanılmıştır. Çalışma neticesinde, çimento hamurunun faz gelişiminin ve katılaşma sürecinin incelenmesinde bilgisayarlı tomografi tekniğinin kullanılabileceği sonucuna varılmıştır.

Landis vd. (2003), küçük silindir harçlarda farklı yükleme koşullarında meydana gelen iç çatlakların gelişimini X-ışını mikrotomografi tekniği kullanarak incelemiştir. Çalışma kapsamında, üç boyutlu görüntü analizi ile yük artışının etkisiyle meydana gelen iç çatlakların yüzey alanları ölçülmüş ve lineer elastik kırılma mekaniği yaklaşımıyla kırılma enerjileri hesaplanmıştır.

Nalbantoğlu (2004) tarafından yapılan stabilizasyon çalışmasında, uçucu külün yüksek plastisiteli killerin stabilizasyonunda kullanılmasının zeminin şişme potansiyelini azalttığı belirtilmiştir. Düşük dayanım, yüksek plastisite, kompaksiyon zorluğu ve yüksek şişme potansiyeli gibi birçok dezavantaja sahip Kıbrıs killeri üzerinde yapılan çalışmada, uçucu kül ile stabilize edilmiş zeminin minerolojik değişimi ile plastisite ve su emme kapasitesindeki azalmalar katyon değişim kapasitesi verilerinden yararlanılarak açıklanmıştır.

Hunter (2004), beton numunelerdeki boşluk yapısını incelemek üzere bilgisayarlı tomografiden yararlanmıştır. Araştırma kapsamında, beton içinde meydana gelen gecikmiş etrenjit oluşumu sırasındaki çatlak yayılımları ve boşluk yapısı incelenmiştir. Tüm numunelerin porozitesinin belirlenmesinin yanı sıra boşluk boyut dağılımları da tespit edilmiştir.

Tonoz vd. (2004), Ankara killерinin kireçle stabilizasyonu sonucu serbest basınç dayanımı değerlerinde meydana gelen değişimleri araştırmışlardır. Çalışma kapsamında 6 farklı zemin karışımı hazırlanmış olup bu karışımlardaki kireç oranı %0, %2, %4, %6, %8 ve %10 olarak belirlenmiştir. 3, 7, 14 ve 28 günlük kür süreleri ile birlikte serbest basınç dayanımlarının zamana bağlı değişimi çalışmada ayrıca değerlendirilen önemli bir parametredir. Deneylerden elde edilen veriler ışığında, optimum kireç oranı %4 olarak tayin edilmiştir. Serbest basınç dayanımlarında %85'e varan artışların meydana geldiği kür süresi 28 gün olduğu için, kireçle stabilizasyon yönteminde en az 28 gün kür süresi sonunda deneylere geçilmesinin gerekliliği belirtilmiştir.

Kalkan ve Akbulut (2004), killi zeminlerin silis dumanı ile stabilizasyonunun permeabilite, şişme basıncı ve basınç dayanımı üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Likit limitleri %60-65, plastik limitleri ise %35-42 arasında değişen dört farklı zemin numunesi, %0, %5, %10, %15, %20, %25, %30 ve %50 oranında silis dumanı ile stabilize edilmiştir. %0, %10, %20 ve %30 silis dumanı içeren örneklere ait SEM görüntüleri incelenmiştir. 5000 kat büyütülerek çekilen taramalı elektron mikroskobu görüntülerinde, %30 oranda silis dumanı içeren zemin örneklerinin daha yoğun bir yapıda olduğu ve daha ince katmanların meydana geldiği tespit edilmiştir. Laboratuvar testleri incelendiğinde, yükselen silis dumanı içeriği ile numunelerin serbest basınç dayanımı değerlerinde artışlar meydana geldiği belirtilmiştir. SEM sonuçları ise, laboratuvar deneyi verilerini destekler niteliktedir. Yapılan deneyler, silis dumanı katkısının permeabilite değerlerini ve şişme basınçlarını düşürdüğünü, serbest basınç dayanımını ise arttırdığını ortaya koymuştur.

Kumar ve Sharma (2004) çalışmalarında %0, %5, %10, %15 ve %20 oranlarında uçucu kül kullanarak şişen zeminlerin stabilizasyonunu konu edinmişlerdir. Çalışma kapsamında serbest basınç, geçirimsizlik ve şişme deneyleri yapılmıştır. Kompaksiyon deneyleri sonuçlarına göre, uçucu kül katkısının miktarı arttıkça maksimum kuru yoğunluk ve plastik limit değerlerinde artma, likit limit ve optimum su içeriği değerlerinde azalma meydana geldiği tespit edilmiştir. Deneylerden elde edilen veriler uçucu kül kullanımıyla birlikte serbest basınç dayanımı değerlerinde artışların olduğunu, bunun yanı sıra geçirimsizlik değerlerinde azalmaların meydana geldiğini göstermiştir. Birbiriyle paralellik gösteren şişme basıncı ve serbest şişme yüzdesi sonuçları ise artan miktarlarda uçucu külün şişen zemin stabilizasyonunda kullanımının, zeminin şişme davranışını olumlu yönde etkilediğini ortaya koymuştur.

Kassim ve Chern (2004), Malezya'daki kohezyonlu zeminlerin kireçle stabilizasyonu üzerine yaptıkları çalışmada, asidik orijinli killerde kireçle stabilizasyon sonucunda meydana gelen serbest basınç dayanımı artışının, fazla miktarda kaolinit içeren alkalın orijinli killerdeki serbest basınç dayanımına göre daha az miktarda meydana geldiğini tespit etmişlerdir. %3 ila %6 kireç katkısının kullanıldığı numunelerde en yüksek mukavemet değerleri elde edilmiştir. 14 günlük kür süresinin ardından kireçle stabilize edilmiş numunelerde, doğal zemin numunelerine göre 11 kat daha yüksek dayanım sonuçlarına ulaşılmıştır. Stabilizasyonun etkinliği kirecin kalitesine, kil fraksiyonuna, mineralojisine ve zeminin alkalilik durumuna göre değişmektedir.

Saleh (2004), beton iç yapısını bilgisayarlı tomografi tekniği ile analiz etmiştir. Analizlerde beton numunelerin boşluk yüzdeleri belirlenmiştir. Çalışma kapsamında elde edilen tomografi görüntülerinin analizleri için ImagePro Plus programından yararlanılmıştır. Çalışma sonucunda, deneysel veriler ve bilgisayarlı tomografi analizleri arasında bir ilişkinin olduğu tespit edilmiştir.

Abd El-Aziz vd. (2004), çalışmalarında kireç ve silis dumanının birlikte kullanımının ince daneli zeminlerin stabilizasyonundaki etkinliğini konu edinmişlerdir. Kireç katkı miktarları %1, %3, %5, %7, %9 ve %11 olarak belirlenen çalışmada silis dumanı %5, %10 ve %15 oranlarında kullanılmıştır. Katkı maddelerinin artışıyla hazırlanan karışımların optimum su içeriği değerlerinde artışlar meydana getirirken, maksimum kuru yoğunluk değerlerinde azalma eğilimi görülmüştür. Bunun yanı sıra katkı maddeleri ile birlikte serbest şişme yüzdesi ve plastisite indisi değerlerinde azalmalar, CBR değerlerinde ise artışlar meydana gelmiştir.

Al-Rawas vd. (2005), Oman bölgesinden elde ettikleri şişen zeminin stabilizasyonunda kireç, çimento ve Sarooj adlı yapay bir puzolanın kullanılabilirliği üzerine bir çalışma yapmışlardır. Bu çalışmada, çimento ve kireç oranları için %3, %6 ve %9 değerleri seçilmiş olup, Sarooj puzolanı için %3, %6, %9 ve %12 değerlerinde çalışılmıştır. Bu üç katkının stabilizasyon çalışmasında kullanılmasıyla birlikte LL değerlerinde artışlar gözlenmiş olup, PI değerlerinde ise azalmalar meydana gelmiştir. Kireç katkılı karışımlarda en düşük PI değerlerine ulaşılmıştır. Doğal zeminin serbest şişme yüzdesi %9.39 iken, %3 kireç katkılı numunelerde bu oran %2.7 seviyelerine düşmüştür. %6 ve %9 kireç oranında ise zeminin şişme özelliği tamamen ortadan kalkmıştır. Çimento ve Sarooj yapay puzolanının zemine katılmasıyla deneysel olarak elde edilen şişme değerleri sırasıyla %5.43, %4.57, %3.67 ve %5.96, %6.10, %6.04, %6.00 şeklindedir. Bu sonuçlara göre, en düşük şişme değerleri kireçli stabilizasyondan elde edilmiştir ve Oman bölgesinden temin edilen şişen zeminde kullanılan bu üç katkıdan en etkili katkı kireç olmuştur. Çalışma neticesinde optimum kireç oranı olarak %6 değeri belirlenmiştir.

Sivapullaiah ve Lakshmikantha (2005), kirecsiz ve %1 kireç katkılı %100 illitli, %80 illitli ve %20 bentonitli üç farklı zemin karışımı üzerinde kıvam, kompaksiyon, dayanım ve geçirimsizlik deneyleri yapmışlardır. Deney sonuçları optimum su içeriği, geçirimsizlik, büzülme limiti ve serbest basınç dayanımı değerlerinde kireç ilavesi ile artışların meydana geldiğini göstermiştir. İlk esnada meydana gelen bu değişimler kür süreleri sonucunda optimum su muhtevası değerlerinin daha fazla artması, geçirimsizlik ve serbest basınç dayanımı değerlerinin azalışlar göstermesi şeklinde değişmiştir.

Tekin (2005), çimento harçlarının porozitesinin bilgisayarlı tomografi ile belirlenmesi üzerine yaptığı deneysel çalışmada PÇ 42.5 çimentosu yerine %5, %10 ve %15 oranında volkanik tüf ikame ederek çimento harçlarını oluşturmuştur. Farklı kür günlerinde numunelerin tomografi görüntülerinin elde edildiği çalışma neticesinde, bilgisayarlı tomografi tekniğinin çimento harçlarının makro boşluk oranının incelenmesinde kullanılabilir olduğu tespit edilmiştir.

Faluyi ve Amu (2005), Nijerya'nın Ado-Ekiti kentinde bulunan kırmızı kil zemine kireçle stabilizasyon uygulanmasının, zemin pH değerleri açısından değişimini incelemiştir. Kireç oranı olarak %10'a kadar farklı değerlerin seçildiği bu çalışmada, kireç oranının arttırılmasıyla birlikte zemin pH değerlerinde asidik değerlerden alkali değerlere geçiş olduğu saptanmıştır. Üç farklı numune üzerinden elde edilen verilere göre,

A numunesi kireçsiz olarak 5.8 pH değerine sahipken, %10 kireçle stabilizasyon sonucunda pH değeri 11.30 olarak ölçülmüştür. B numunesi için bu değerler 6.1'den 11.4'e çıkarken, C numunesinin pH değeri için değişim 5.7'den 11.4'e şeklindedir. Bu değerlerdeki değişimler, numuneler içinde meydana gelen kimyasal özellik değişimlerinin ve kireç katkısının sebep olduğu kimyasal reaksiyonların sonucu olduğu çalışma kapsamında vurgulanmıştır.

Huat vd. (2005), tropik bataklık zeminin çimento ve kireçle stabilizasyonu üzerine bir çalışma yapmışlardır. Çalışma kapsamında kullanılan katkı oranları çimento için %5, %10, %15 olarak tayin edilirken, kireç için %10, %20 ve %25 değerleri tercih edilmiştir. Stabilizasyon çalışmasıyla birlikte tropik bataklık alanlarındaki zeminlerin geoteknik özelliklerinin değişimlerinin incelenmesini amaçlayan bu çalışma kapsamında yapılan deneyler kıvam, kompaksiyon ve serbest basınç dayanımı deneyleridir. Elde edilen verilere göre, katkı maddelerinin ilavesiyle likit limit ve optimum su içeriği değerlerinde azalmaların olduğu, maksimum kuru yoğunluk değerlerinde ise artışların meydana geldiği tespit edilmiştir. Serbest basınç dayanımlarında artışlar gözlenmiş fakat bu tip bataklık zeminlerinin organik madde ihtiva etmesinden dolayı dayanım değerlerinde zamana bağlı kayıplar meydana gelmiştir. Bu tip zeminler için çimento katkısı ile birlikte stabilizasyon sonucunda elde edilen serbest basınç dayanımı verileri kireçle stabilizasyona nazaran daha etkin sonuçlar vermiştir.

Helfen vd. (2005) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, hidrasyon sürecinde çimentonun mikro yapısında meydana gelen değişimler mikrotomografi yöntemi kullanılarak incelenmiştir. Çalışma kapsamında boşluk hacminin oranı, mikro porozitenin gelişimi ve mikro çatlaklardaki ilerlemeler bilgisayarlı tomografiyle incelenen ana parametrelerdir.

Nalbantoğlu (2006), killi zemine %3, %5 ve %7 oranlarında kireç karıştırarak stabilizasyon çalışması yapmış ve kıvam, kompaksiyon, dayanım, şişme ve sıkışma parametrelerindeki değişimleri incelemiştir. Şişme potansiyeli yüksek olan zemine kireç ilavesiyle birlikte plastik limit değerlerinde yükselmeler, likit limit değerlerinde ise düşüşler meydana gelmiştir. Kompaksiyon deneyi sonuçlarına göre artan kireç oranıyla birlikte optimum su içeriği değerleri artış eğilimi gösterirken, maksimum kuru yoğunluk değerleri azalmıştır. Sıkışma indisi (C_c) ve yeniden yükleme indisi (C_r) değerleri kireç ilavesiyle birlikte düşmüşlerdir. Serbest basınç dayanımları artan kireç oranlarında artarken, şişme basınçları düşmüştür.

Türköz (2006), Eskişehir Osmangazi Üniversitesi kampüsünde yer alan ve yüksek şişme potansiyeli olan Meşelik killerin kireç katkısı ile stabilizasyonu üzerine yaptığı araştırmada, sönmüş kireç katkısı-şişme yüzdesi ilişkisini, şişme yüzdesinde zamanla meydana gelen değişimi ve şişme yüzdesi-nihai su muhtevası ilişkisini incelemiştir. Üç farklı noktadan alınan malzemenin %0, %1, %3, %5 kireç yüzdelerinde 88 adet deney numunesi hazırlanmış ve standart ve modifiye proktor enerji seviyelerinde sıkıştırılan numuneler klasik ödometre cihazı ile yapılan serbest şişme yüzdesi deneyine tabi tutulmuşlardır. Numuneler 7 kPa değerinde ön yüklemeye maruz bırakılarak farklı zaman aralıklarında (0.5 ila 1440 dk arası) serbest şişme değerleri ölçülmüştür. Şişme yüzdesi deneyleri verilerine göre modifiye proktor enerjisi ile sıkıştırılan numunelerde daha büyük şişme değerleri meydana gelmiştir. Kireç katkısının %3 seviyesinden sonra numunelerin şişme potansiyeli kontrol altına alınabilmiştir. Numunelerin X-ışını kırınımı analizlerinden elde edilen sonuçlara göre, kil numuneleri içindeki ağırlıklı mineral tipleri Q, C, M ve I olarak tespit edilmiştir.

Boel vd. (2006), 10 mikron çözünürlüğe sahip mikrotomografi cihazı ile birlikte çimentolu sistemlerin mikro yapılarını incelemiştir. Çalışma kapsamında boşluk oranındaki değişimler mikrotomografi yöntemi ile tespit edilmiştir ve mikrotomografinin çimentolu sistemlerin boşluk yapısını incelemeye etkin bir yöntem olduğu sonucuna varılmıştır.

Tumluer (2006), çimento katkılı kumlu zeminlerin mukavemetini konu edinen stabilizasyon çalışmasında katkı maddesi olarak kompoze çimento ve demir atığı olan cüruf katkıları kullanmıştır. Optimum su muhtevası %5,81 olarak bulunan kum zemine çimento ve cüruf karışımı eklenerek yapılan çalışma kapsamında kompaksiyon ve serbest basınç deneylerine yer verilmiştir. Deney numuneleri için kür süreleri 7, 14, 28 ve 56 gün olarak belirlenmiştir. Çalışma neticesinde serbest basınç mukavemeti değerlerinde iyileşme meydana geldiği için, çimento ile zemin ıslahında çimentoya cüruf atıklarının eklenmesinin ekonomik yönden ve çevre kirliliğini önleme açısından yararlı olacağı kanaatine varılmıştır.

Jha ve Gill (2006), kireç ve pirinç kabuğu külünün stabilizasyon çalışmalarında beraber kullanılmasının zeminin dayanım ve durabilite özelliklerine etkisini incelemiştir. Çalışma kapsamında kompaksiyon, CBR ve serbest basınç deneyleri yapılmıştır. 12 ıslanma-kuruma çevrimi sonucu dayanım değerlerinde meydana gelen değişimler ayrıca araştırılmıştır. Kür süreleri 7, 28 ve 56 gün olarak belirlenmiştir.

Kompaksiyon deneyleri sonucunda eklenen pirinç kabuğu külü miktarının artmasıyla optimum su içeriği değerlerinde artışlar meydana gelirken, maksimum kuru yoğunluk değerleri azalış eğilimi göstermişlerdir. Serbest basınç deneyi verilerine göre optimum pirinç kabuğu külü oranı %12 olarak tespit edilmiştir. Islanma-kuruma çevrimi sonucundaki değerler yine %12 oranında pirinç kabuğu külünün kullanımının en etkin sonuçları verdiğini göstermiştir. CBR deneyleri sonucunda serbest basınç dayanımı sonuçlarına paralel eğilim meydana gelmiştir.

Landis vd. (2006), beton numunelerde meydana gelen iç çatlakları ve bu çatlakların gelişimini X-ışını mikrotomografi tekniği kullanarak incelemiştir. Bu çalışma ile birlikte, yük altındaki küçük beton numunelerin üç boyutlu görüntü analizleri gerçekleştirilmiş ve farklı düzeydeki mikro çatlaklar bilgisayarlı tomografi yardımıyla tespit edilmiştir.

Sezer vd. (2006), İzmir'den temin edilen yüksek plastisiteli killi bir zeminin %0, %5, %10, %15 ve %20 oranlarında kireç oranı yüksek olan uçucu kül ile stabilizasyonunu incelemiştir. Çalışma kapsamında, optimum su içeriğinde sıkıştırılan numunelerin dayanım parametreleri açısından 1, 7, 28 ve 90 günlük kür süreleri sonundaki değerleri elde edilmiştir. Kompaksiyon deneyi verileri, stabilize edilmiş numunelerin maksimum kuru birim hacim ağırlık değerlerinde azalmalar, optimum su içeriği değerlerinde ise artışlar meydana geldiğini ortaya koymuştur. Uçucu kül miktarı ve kür süresi arttıkça, stabilize edilmiş zemin numunelerinin serbest basınç dayanımları, görünür kohezyon ve içsel sürtünme açıları artış eğilimi göstermiştir. %20 uçucu kül içeren numunelerin serbest basınç dayanımları %15 uçucu kül içeren numunelere oranla önemli derecede artmadığı görülmüştür. Buna göre, optimum uçucu kül oranı %15 olarak tespit edilmiştir. Optimum kür süresi olarak 28 gün belirlenmiştir. Çünkü 28 gün kür süresinden sonra, artan kür sürelerindeki serbest basınç dayanımı artışı az miktarda meydana gelmiştir. Uçucu kül oranı ile serbest basınç dayanımı, görünür kohezyon ve içsel sürtünme açısı arasındaki ilişkiler çalışma kapsamında sayısal verilerle ortaya konmuştur.

Edil vd. (2006), ince daneli zeminlerin uçucu kül ile stabilizasyonu üzerine bir çalışma yapmışlardır. 7 farklı zemin üzerinde yapılan çalışmada uçucu kül katkısıyla zeminlerin CBR değerleri ve elastisite modüllerindeki değişim incelenmiştir. Çalışma kapsamındaki zeminlerden bir tanesi %10 oranında organik madde içermekte olup, diğer zeminler inorganiktir. %10 ve %18 oranında uçucu kül kullanılarak yapılan stabilizasyon çalışması neticesinde inorganik zeminlerin CBR ve elastisite değerlerinde artışlar meydana

gelirken, organik madde içeren zemin türü ile yapılan stabilizasyon çalışmaları neticesinde CBR ve elastisite modülü değerlerinde kayda değer bir değişimin meydana gelmediği tespit edilmiştir.

Wang vd. (2007), donma-çözülme çevriminin Tibet killilerinin mekanik özellikleri üzerindeki zararlı etkilerini araştırmışlardır. Zemin numunesi yüksekliği, su içeriği, gerilme-şekil değiştirme davranışı, kopma mukavemeti, elastisite modülü, kohezyon ve içsel sürtünme açısı değerleri ölçülmüştür. Sonuçlar, donma-çözülme çevrimi uygulanan zemin numunelerinin fiziksel ve mekanik özelliklerinin, bu çevrimler neticesinde önemli ölçüde değiştiğini ortaya koymuştur. Gerilme-şekil değiştirme davranışı eğrisinin şekli, donma-çözülme çevrimlerinden etkilenmemiştir. Elastisite modülü ve kopma dayanımı değerleri 7 donma-çözülme döngüsü sonucunda minimal değerlere ulaşmıştır. Kohezyon değerleri donma-çözülme sayısı arttıkça düşüş eğilimi gösterirken, içsel sürtünme açıları ise yükselen bir eğilim görülmüştür.

Buhler ve Cerato (2007), şişme potansiyeli yüksek zeminlere %5, %10, %20, %25 oranında kireç ve %5, %10, %20, %30, %40, %50 oranında uçucu kül karıştırarak stabilizasyon çalışması yapmışlardır. C sınıfı uçucu kül kullanılarak yapılan çalışma kapsamında lineer büzülme deneyi verileri incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, kireç ve uçucu külün ayrı ayrı stabilizasyon çalışmalarında kullanılmasının lineer büzülme değerlerini azalttığı tespit edilmiştir. Aynı oranda kireç veya uçucu kül kullanımında kirecin daha olumlu stabilizasyon verilerine sahip olduğu gözlemlenmiştir. Buna göre aynı şartlarda zemin ıslahı için karışımlara katılması gereken uçucu kül miktarının, kireç miktarına göre daha yüksek oranlarda olması gerektiği çalışmadan elde edilen en önemli sonuçtur.

Kumar vd. (2007) tarafından yapılan çalışmada Hindistan uçucu külü ile zemin karışımlarının kireç ve polyester fiber malzeme ile stabilizasyonu sonucu geoteknik özelliklerdeki değişimler incelenmiştir. Çalışma kapsamında kompaksiyon, kesme kutusu ve serbest basınç deneyleri yapılmıştır. Kür süreleri 7, 14 ve 28 gün olarak tayin edilmiştir. Deney sonuçlarına göre polyester fiber, kireç ve uçucu külün beraber katkı maddesi olarak kullanılmasının şişen zeminlerin stabilizasyonu için uygun olduğu kanaatine varılmıştır.

Yarbaşı vd. (2007), çalışmalarında atık malzemeler olan silis dumanı, kırmızı çamur ve uçucu külün granüler zeminlerde katkı maddesi olarak kullanılabilirliğini ve donma-çözülme çevrimi sonucu dayanımlarını incelemişlerdir. Silis dumanı ve uçucu kül kireçle birlikte, kırmızı çamur ise çimento ile birlikte stabilizasyon çalışmalarında kullanılmıştır.

Doğal ve farklı katkılardan meydana gelen zemin numuneleri, 28 günlük kürün ardından ASTM C 666 standartlarına göre donma-çözülme çevrimine tabi tutulmuşlardır. Stabilize edilmiş zeminlerin donma-çözülme çevrimleri sonrasındaki dayanımları, doğal zeminlere nazaran daha büyük değerler almıştır. ASTM C 215 standartlarında uygulanan dinamik test sonuçlarına göre, bu katkı malzemelerinin zeminin durabilite özelliklerinde meydana getirdikleri iyileştirmelerin yanı sıra, dinamik davranışlarında da olumlu etkileri olduğu tespit edilmiştir.

Lin vd. (2007), uçucu kül ile atık su arıtma tesislerinde biriken çamurun yanması sonucu oluşan atık çamur küllerinin zemin stabilizasyonunda kullanılabilirliğini araştırmışlardır. AASHTO zemin sınıflandırma sistemine göre A-4 sınıfında yer alan doğal zemine %0, %2, %4, %8 ve %16 oranlarında atık çamur külü ve uçucu kül katılmıştır. Deneysel sonuçlarına göre her iki kül tipinin oranlarının artmasıyla zeminin görünür kohezyon değerleri artış eğilimi göstermiş, içsel sürtünme açısı değerlerinde ise azalmalar meydana gelmiştir. Çalışma serbest basınç dayanımı değerleri yönünden incelendiğinde, atık çamur külü ihtiva eden karışımların uçucu küle göre dayanım değerlerini daha fazla arttırdığı tespit edilmiştir. Fakat bu değişimlerdeki fark çok yüksek oranlarda değildir. CBR deneyi verileri uçucu kül karışımlarında daha yüksek değerler almıştır. Optimum atık çamur oranı %8 olarak belirlenen çalışmadan çıkarılan en önemli sonuç, zemin stabilizasyonu çalışmalarında atık çamur küllerinin uçucu külü ikame edebilecek nitelikte olduğudur.

Landis ve Corr (2007), beton numuneler üzerinde gerçekleştirdikleri deneysel çalışmada bilgisayarlı tomografi tekniğinden yararlanmışlardır. Betonda kullanılan hava katkısının meydana getireceği etkileri görmek amacıyla X-ışını mikrotomografi ile numunelerdeki gözenekli yapılar detaylı bir biçimde incelenmiştir.

Değirmenci vd. (2007), fosfojipslerin çimento ve uçucu külle birlikte zemin stabilizasyonunda kullanılabilirliği üzerine yaptıkları çalışmada, iyileştirmenin genel olarak plastisite indisi ve optimum su muhtevası değerlerini düşürdüğünü, maksimum kuru birim hacim ağırlığının fosfojips ve çimento miktarı artışı ile arttığını, uçucu kül oranındaki artış ile azaldığını ortaya koymuşlardır. Serbest basınç dayanımlarında, doğal zemine göre her bir katkının kullanılmasında artışlar meydana gelmiştir. Çimento katkısı oranının uçucu kül katkısı oranına göre serbest basınç dayanımlarında daha etkin bir rol oynadığı bu çalışma, iki atık yan ürün olan fosfojips ve uçucu külün zemin stabilizasyonunda kullanılabilecek ekonomik katkılar olduğunu ortaya koymuştur.

Arabani ve Karami (2007), yaptıkları stabilizasyon çalışmalarında CBR, çekme ve basınç dayanımı deneylerindeki verilerin değişimlerini incelemiştir. Çalışmada kullanılan zemin killi kum olup, katkı maddesi olarak kireç tercih edilmiştir. Katkı maddesi oranları %3, %6 ve %9 olan bu çalışmada kil içerikleri farklı 5 tip zemin üzerinde deneyler yapılmıştır. Deney sonuçlarına göre, %30 kil oranına kadar hazırlanan zemin-kireç karışımlarında tüm deneyler iyileştirici sonuçlar meydana getirmiştir. Kil oranı %30'dan fazla olan killi kumlarda ise dayanım değerlerinde düşüşler ortaya çıkmıştır. Çalışma kapsamında hazırlanan değişik oranlarda kil ve kireç içeren killi kum-kireç karışım kombinasyonları için, optimum kireç oranı %7-8 olarak belirlenmiştir. En yüksek dayanım %25-%30 oranında kil içeren numunelerden elde edilmiştir.

Güney vd. (2007), kireçle stabilize edilmiş ince daneli zeminlerde ıslanma-kuruma periyodunun zemin şişme parametrelerine etkilerini incelemiştir. Kaolin ve bentonit içeriği yüksek miktarda olan yüksek plastisiteli zeminlere, şişme yüzdesi ve şişme basıncı deneyleri uygulanmıştır. Bu deneyler %3 ve %6 oranlarında kireçle stabilize edilmiş zemin numuneleri ile tekrar edilmiştir. Çalışma verilerinden elde edilen sonuçlara göre, kireçle stabilizasyonun olumlu etkileri ilk ıslanma-kuruma çevriminden sonra ortadan kalkmış, bundan sonraki çevrimlerde şişme basıncı ve şişme yüzdesi değerlerinde artışlar meydana gelmiştir. Ayrıca, herhangi bir stabilizasyona tabi tutulmayan doğal zemin numunelerinde ilk ıslanma-kuruma çevriminden sonra şişme potansiyellerinde ve şişme basınçlarında azalmalar meydana gelmiş olup, 4. çevrimden sonra bu değerler dengede kalmışlardır. Çalışma analizlerinden elde edilen sonuçlara göre, kireçle stabilize edilmiş zeminlerin ıslanma-kuruma periyodundan olumsuz etkilendiği ve ıslanma-kurumanın gerçekleştiği bölgelerde kireçle stabilizasyonun uygun bir yaklaşım olmayacağı bu çalışma kapsamında ifade edilmiştir.

Ghosh ve Subbarao (2007), stabilizasyon çalışmalarında kireç ve F tipi uçucu külü katkı maddesi olarak kullanmışlardır. Dayanımın hızlı bir şekilde elde edilebilmesi için ayrıca bir miktar alçı katkı maddesi olarak kullanılmıştır. %4, %6 ve %10 oranlarında kireç ile %0.5 ve %1 alçının kullanıldığı çalışma sonuçlarına göre, yalnız başına kirecin katkı maddesi olarak kullanılmasına nazaran kireç ve uçucu küllü karışımlar daha etkin sonuçlar ortaya koymuştur. Buna göre, F tipi uçucu külün kireçle beraber zemin ıslahı çalışmalarında kullanılmasının uygun olduğu kanaatine varılmıştır.

Elaqra vd. (2007), çimento harcında basınç artışıyla birlikte meydana gelen hasarları, çimento harcında bulunan kum/çimento oranının hasar üzerindeki etkilerini bilgisayarlı

tomografi yöntemine başvurarak analiz etmişlerdir. Boşluk dağılımı ve gelişimi hakkında detaylı bilgilerin elde edildiği çalışma sonucunda, bilgisayarlı tomografinin harçlarda meydana gelen çatlak ve kırılmaların gelişimini izlemede kullanılabilir bir yöntem olduğu tespit edilmiştir.

Wong vd. (2008), silika kumu, Portland çimentosu ve yüksek fırın cürufu ile birlikte bataklik bir zeminin stabilizasyonu üzerine bir çalışma yapmışlardır. Çalışma kapsamında katkı maddelerinin üç farklı kombinasyonda zemine katılması uygun görülmüştür. Serbest basınç ve geçirimsizlik deneylerinin yapıldığı çalışmadan elde edilen sonuçlara göre çimento, yüksek fırın cürufu ve silika kumu karışımlarının doğal zeminin geçirimsizlik katsayısını düşürdüğü, serbest basınç ve kayma direnci parametrelerini ise arttırdığı tespit edilmiştir.

Zha vd. (2008), şişen zeminlerin uçucu kül ve uçucu kül-kireç katkılarıyla stabilizasyonu sonucu geoteknik özelliklerinde meydana gelen değişimleri araştırmışlardır. Katkı maddesi oranları olarak uçucu kül için %0-15, kireç için %0-2 arasında değişen değerler seçilmiştir. Bu değer aralıklarında farklı karışım kombinasyonları hazırlanarak deneyler gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonuçlarına göre artan katkı maddesi oranlarında plastisite indisi, aktivite, serbest şişme ve şişme basıncı değerlerinde düşüşlerin meydana geldiği tespit edilmiştir. Kür sürelerinin artması şişme basıncı ve serbest şişme değerlerini azaltmıştır. Uçucu kül ile stabilizasyonda ilk anda önemli kimyasal reaksiyonlar meydana gelmemiş ve bunun sonucu olarak serbest basınç mukavemeti değerlerinde anlamlı değişimler gözlenmemiştir. Fakat 7 günlük kür süresi sonucunda bu değerlerde ciddi artışların olduğu tespit edilmiştir. Deneyler sonucunda optimum uçucu kül değeri %9-12 bulunmuştur.

Manasseh ve Olufemi (2008), mühendislik özellikleri zayıf olan bir zeminin kireçle stabilizasyonu sonucu CBR ve serbest basınç dayanımı değerlerindeki değişimleri incelemişlerdir. Katkı maddesi oranı %0, %2, %4, %6, %8, %10, %12 ve %14 olarak belirlenmiştir. Kireç miktarının artışı likit limit ve maksimum kuru yoğunluk değerlerinde düşüşe neden olurken, plastik limit ve optimum su içeriği değerlerinde artışlar meydana gelmiştir. Serbest basınç ve CBR deneyi verilerine göre optimum kireç oranı %8 olarak belirlenmiştir.

Zhang vd. (2008), yüksek likit limit değerine sahip killerin kireçle stabilizasyonu üzerine çalışma yapmışlardır. Çalışma kapsamında kompaksiyon, kıvam limitleri, serbest şişme ve CBR deneyleri yapılmıştır. Kür süreleri 3, 7 ve 14 gün olarak tespit edilen

çalışmada kireç oranı %2, %4, %6 ve %8 olarak belirlenmiştir. Çalışmadan elde edilen veriler ışığında, kireç miktarının artışıyla optimum su içeriği, plastik limit ve CBR değerlerinde artışların meydana geldiğini söylemek mümkündür. Buna karşın, maksimum kuru yoğunluk, likit limit, plastisite indisi ve serbest şişme değerleri artan kireç miktarıyla birlikte azalma eğilimi göstermişlerdir. İçeriğindeki kireç oranı %2 olan ve 14 gün kür koşullarında bekletilen numunelerde şişme davranışının tamamen ortadan kalktığı çalışmadan elde edilen diğer bir sonuçtur.

Khatab vd. (2008), sönmüş kireç ile şeker fabrikası atıklarının ayrı ayrı zemin stabilizasyonu çalışmalarında kullanılmasının nasıl değişimler meydana getirebileceğini araştırmışlardır. Kullanılan şeker fabrikası atıkları kireç içermektedir. Katı atık yönetimi kapsamında bu atıkların zemin iyileştirmesinde kirece göre nasıl davranış gösterdiklerini inceleyen bu çalışmada sönmüş kireç oranı %2, %4 ve %6, kireçli atık malzeme oranları %2, %4 %6 ve %8 olarak belirlenmiştir. Çalışmadan elde edilen veriler bu tip atıkların zemin stabilizasyonunda kirecin yerine kullanılabilceğini göstermiştir. Serbest basınç dayanımı sonuçlarına göre optimum sönmüş kireç oranı %4, atık malzeme oranı ise %6 olarak tespit edilmiştir. Permeabilite katsayıları açısından optimum sönmüş kireç ve şeker fabrikası atığı oranları sırasıyla %2 ve %4 olarak bulunmuştur.

Okafor ve Okonkwo (2009), çalışmalarında kırmızı renkli killi zemine %5, %7.5, %10 ve %12.5 oranlarında pirinç kabuğu külü katarak stabilizasyon çalışması yapmışlardır. Kompaksiyon, kıvam ve dayanım özelliklerinin pirinç kabuğu külü katkısıyla değişimlerini inceleyen çalışmada, maksimum kuru yoğunlukların katkı maddesi miktarının artışıyla beraber azaldığı, optimum su içeriği değerlerinin ise yükseldiği tespit edilmiştir. Pirinç kabuğu külü miktarının artmasıyla birlikte karışımların plastisite değerleri düşüş eğilimi gösterirken, hacimsel stabilite ve dayanımları artmıştır. Çalışma kapsamında ayrıca optimum pirinç kabuğu külü oranı %10 olarak belirtilmiştir.

Harichane ve Ghrici (2009), düşük ve yüksek plastisiteli killerin kireç ve doğal puzolanla stabilizasyonu üzerine bir çalışma yapmışlardır. Kullanılan kireç oranları %2, %4, %6, %8 ve %10 olarak belirlenirken, doğal puzolan oranları %5, %10, %15 ve %20 olarak seçilmiştir. Doğal zemin kıvam limitlerinin kireç ve puzolan ilavesi ile değişimlerini esas alan bu çalışmada, puzolan ve kirecin birlikte kullanılması yüksek plastisiteli killerin LL değerleri azalmış, PL değerleri ise artmıştır. Düşük plastisiteli zeminlerin likit limit değerleri büyük oranlarda değişmezken, plastik limit değerlerinde artışlar meydana gelmiştir. Katkılarının ayrı ayrı ve beraber kullanılması neticesinde plastisite değerlerinde

düşüşler meydana gelmiştir. En büyük plastisite değeri düşüşü yüksek plastisiteli zeminde kireç katkısı ile sağlanırken düşük plastisiteli zeminde doğal puzolanla sağlanmıştır.

Yılmaz ve Civelekoğlu (2009), şişen zeminlerin stabilizasyonunda %2.5, %5, %7.5 ve %10 oranlarında alçı kullanımının, şişme potansiyeli ve dayanım değerleri üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Belirlenen oranlarda hazırlanmış zemin numunelerine 7 günlük kür süresi sonunda serbest şişme ve serbest basınç dayanımı deneyleri uygulanmıştır. LL ve PI değerlerinde alçı kullanımı ile birlikte azalmalar meydana gelmiştir. Azalma miktarları LL değerleri için 237.3'den 152.8 değerine kadar olurken, PI değerlerinde 186.9'dan 120.8'e düşüş olmuştur. Stabilizasyon sonucunda, serbest şişme yüzdeleri karışıma katılan alçı miktarının artmasıyla %64.9'dan %19.8'e gelmiştir. Serbest basınç dayanımı değerlerinde %35'e varan artışlar meydana gelmiştir. Yüksek sülfat oranı sebebiyle alçı ile stabilizasyonun betonarme yapılara zarar verebileceğinin olumsuz bir etki olarak belirtildiği bu çalışma kapsamında, optimum alçı katkı oranı %5 bulunmuştur.

Katebi (2009), Tebriz'in Vali-Asr bölgesinden alınan kalkerli zemine %2, %3, %4, %5 ve %6 oranlarında kireç katarak CBR ve serbest basınç dayanımı değerlerindeki değişimleri incelemiştir. Yapılan deneyler sonucunda yol alt temel ve temellerinde bu zeminin kullanılabilmesi için gerekli olan sınır şartları olan %32 CBR ve 430 kPa serbest basınç değerlerinin, %6 kireç katkısının kullanıldığı zemin karışımlarından elde edildiği tespit edilmiştir.

Ene ve Okagbue (2009), piroklastik kayaç atıklarının zemine farklı oranlarda karıştırılması sonucu plastisite, lineer rötre, kompaksiyon, CBR ve kesme dayanımı gibi geoteknik karakteristiklerde meydana gelen değişimleri incelemişlerdir. Piroklastik kayaç atıkları zemine %4, %8 ve %12 oranlarında katılmıştır. Deney sonuçları, artan kayaç atığı oranlarında plastisite ve lineer rötre değerlerinde önemli derecede azalmaların olduğunu, optimum su içeriği, maksimum kuru birim hacim ağırlık, kesme dayanımı ve CBR değerlerinde ise artışların meydana geldiğini ortaya koymuştur. Optimum CBR değeri için %8 piroklastik kayaç atığı oranının önerildiği bu çalışmada, bu atıkların zemin modifikasyonu açısından iyi sonuçlar verdiği kanaatine varılmıştır.

Sakr vd. (2009), yüksek miktarda organik madde içeren yumuşak kil bir zeminin kireçle stabilizasyonu üzerine bir çalışma yapmışlardır. Çalışma kapsamında kıvam, dayanım ve sıkışma parametrelerindeki değişimler araştırılmıştır. Mısır'ın Idku kentinden temin edilen zemin içindeki organik madde miktarı %14 olarak tespit edilmiştir. Kireç katkısı oranı %1, %3, %5 ve %7 olarak tercih edilmiştir. Kıvam deneylerinden elde edilen

sonuçlara göre, likit limit ve plastik limit değerleri artan kireç oranı ile birlikte azalmışlardır. Serbest basınç dayanımı ve elastisite modülü değerlerinin kireç katkısından pozitif yönde etkilendiği çalışmada, serbest basınç dayanımı açısından optimum kireç oranı %7 olarak tespit edilmiştir.

Kalkan (2009), ince daneli zeminlerde silis dumanı katkısı kullanılmasının zeminin geoteknik özelliklerinde meydana getirdiği değişimleri incelemiştir. Soğuk bölgelerde sıkça görülen donma-çözülme periyodlarının zeminin dayanım ve permeabilitesini etkilediği bilinen bir gerçektir. Buna istinaden, silis dumanı katkısının donma-çözülme çevrimi sonrası ne derecede bu değerler üzerinde etkili olduğu çalışmanın ana temasını oluşturmaktadır. Çalışma kapsamında optimum su içeriğinde sıkıştırılan doğal ve silis dumanı katkılı zemin örnekleri temel zemin mekaniği deneylerine tabi tutulmuş ve test sonuçları silis dumanı katkılı zeminlerin doğal zemin numunelerine göre donma-çözülme çevriminin zararlı etkilerine karşı daha fazla direnç gösterdiğini ortaya koymuştur. %0, %10, %20, %25 ve %30 oranlarında zeminle karıştırılan silis dumanı katkılı örneklerde, katkı oranı arttıkça permeabilite değerlerinde azalma serbest basınç değerlerinde ise artmalar meydana gelmiştir. Zeminin hidrolik iletkenliği ve dayanımı açısından donma-çözülme etkilerine karşı en iyi durabilite silis dumanı katkısının %30 olduğu numunelerde görülmüştür.

Silitonga vd. (2009), Fransa'nın Cherbourg limanından temin edilen çökelti malzemesinin çimento, kireç ve uçucu kül ile stabilizasyonu üzerine bir çalışma yapmışlardır. İki farklı tip uçucu külün kullanıldığı çalışmada uçucu kül oranları %0, %5, %10, %15, %20 ve %30 olarak belirlenirken, kireç ve çimento için %6 oranı tercih edilmiştir. Kireç ve çimento oranı %6 olan karışımlar ayrı ayrı hazırlanmış, uçucu küllü karışımlara ise %1 çimento ve %2 kireç eklenmiştir. Deney numuneleri için kür süresi 28 gün olarak belirlenmiştir. Çalışmadan elde edilen sonuçlar, uçucu kül-kireç-çimento kombinasyonlu karışımların serbest basınç dayanımı verilerinin doğal zemine ve kireçli veya çimentolu karışımlara göre daha yüksek değerler aldığı şeklindedir. Islanma-kuruma çevrimi sonucu en yüksek dayanım verileri %20 ve %30 uçucu kül içeren kombinasyonlarda sağlanırken, donma-çözülme çevrimi sonucunda en iyi sonuçlar %30 oranında uçucu kül içeren karışımlardan elde edilmiştir.

Zaimoğlu (2010), polipropilen lifi ile güçlendirilen ince daneli zeminlerin donma-çözülme etkisi altındaki dayanım ve durabilite davranışlarını incelemiştir. Durabilite davranışlarını belirlemek üzere kriter olarak donma-çözülme çevrimi sonrası kütle

kayıpları hesaplanmıştır. Çalışma neticesinde elde edilen veriler, donatılandırılmamış zemin numuneleri ile karşılaştırılmış ve lifli numunelerde kütle kaybının %50 civarında azaldığı tespit edilmiştir. Polipropilen lifi miktarı %0, %0.25, %0.5, %0.75, %1, %1.25, %1.5 ve %2 olarak belirlenen bu çalışmada, donma-çözülme çevrimi sonrası doğal zemin numunelerindeki kütle kaybı miktarı %39 iken, lifli numunelerde bu oran %20 seviyelerindedir ve polipropilen lifi katkı oranının artmasıyla bu değerlerde kayda değer bir değişim gözlenmemiştir. En düşük kütle kaybı değeri %0.75 polipropilen lifi katkılı zemin numunelerinde meydana gelmiştir. Serbest basınç dayanımı açısından bakıldığında genel olarak katkı miktarının artmasıyla artan bir dayanım davranışı gözlemlenmiştir. Bu sonuçlara ek olarak, serbest basınç testinden elde edilen başlangıç gerilme-şekil değiştirme eğrisinin polipropilen lifi katkısından önemli derecede etkilenmediği çalışma kapsamında ortaya konmuştur.

Hazırba ve Güllü (2010), ince taneli zeminlerin stabilizasyonunda geofiber malzeme ve sentetik akışkan kullanımının, CBR değerlerindeki iyileştirmelerini ve donma-çözülme etkisi altındaki sonuçlarını incelemiştir. Çalışma kapsamında ıslanmış ve ıslanmamış numunelere bu katkılar ayrı ayrı ve bir arada katılarak sonuçlar değerlendirilmiştir. Çalışma sonuçlarına göre, ıslanmaya maruz bırakılmamış zemin numunelerinde geofiber ve sentetik akışkanın birlikte kullanılmasının CBR değerlerinde daha fazla iyileştirme meydana getirdiği, ıslanmış numunelerde ise en iyi CBR performanslarının sadece geofiber katkı kullanılan numunelerde ortaya çıktığı tespit edilmiştir. Donma-çözülme çevrimi sonrasında zemin numunelerinin CBR performansları incelendiğinde ise, ıslanmış-ıslanmamış zemin numunelerinde sadece sentetik akışkan kullanılmasının donma-çözülmenin meydana getirdiği zararlı etkilere karşı pek fazla dayanım gösteremediği sonucuna varılmıştır. Islanmış numuneler üzerinde sadece geofiber katkı kullanımı donma-çözülme çevrimine karşı daha iyi sonuçlar vermiştir.

Güllü ve Hazırba (2010) tarafından yapılan diğer bir çalışmada, geofiber ve sentetik akışkanın düşük plastisiteli ince daneli zemin stabilizasyonunda kullanımının serbest basınç deneyi değerleri ve donma-çözülme çevrimi sonrasında bu değerlerde meydana gelen değişimler araştırılmıştır. Çalışmada kullanılan katkı maddeleri, doğal zemine ayrı ayrı ve birlikte belirli oranlarda katılarak, stabilize edilmiş numuneler serbest basınç deneyine tabi tutulmuşlardır. Bu deneyden elde edilen verilere göre, ıslanmamış zemin numunelerinde her iki katkının bir arada kullanılması diğer farklı iyileştirme konfigürasyonlarına nazaran daha yüksek performanslar ortaya koymuştur. Bu

numunelerin serbest basınç dayanımlarında, doğal zemine göre %170 oranında artış sağlanmıştır. Sentetik akışkanların yalnız başına katkı maddesi olarak kullanımı, serbest basınç dayanımlarında %21 oranında düşüşe neden olmuştur. Sadece sentetik akışkan ile yapılan stabilizasyonun donma-çözülme çevrimi altında yetersiz sonuçlar verdiği bu çalışmada, donma-çözülme sonrasında en verimli sonuçlar her iki katkı maddesinin bir arada kullanılmasıyla elde edilmiştir.

Bin-Shafique vd. (2010), düşük ve yüksek plastisiteli iki farklı zeminin uçucu kül ile stabilize edilmesi sonucunda, zeminlerin geoteknik özelliklerinde meydana gelen değişimleri ve numunelerin uzun süreli performanslarını araştırmışlardır. %0, %5, %10 ve %20 oranlarında C sınıfı uçucu kül kullanılarak oluşturulan numunelerin tümü için kür süresi 7 gün olarak belirlenmiştir. Her bir katkı oranından 10'ar adet hazırlanan çalışmada, ilk numune grubunda kıvam limitleri testi, şişme testi ve serbest basınç testi yapılmıştır. 6 grup numune 12 adet ıslanma-kuruma çevrimine, diğer 3 grup numune grubu ise donma-çözülme çevrimine maruz bırakıldıktan sonra aynı deneyler bu dokuz numune seti için tekrarlanmıştır. Çalışma sonuçlarına göre, ıslanma-kuruma periyodlarının uçucu kül ile stabilize edilmiş zemin numunelerinde önemli derecede zararlı etkiler meydana getirmediği fakat donma-çözülme çevrimi sonucunda serbest basınç dayanımında %40'a varan azalmalar olduğu, şişme değerlerinde artışlar meydana geldiği tespit edilmiştir. Donma-çözülme çevrimi sonrasında stabilize edilmiş zemin numunelerinde bu kadar yüksek dayanım kaybı oluşmasına rağmen, doğal zemin numunelerine göre 3 kat fazla dayanım artışı elde edilmiştir.

Liu vd. (2010), kireç ve çimento ile stabilize edilmiş ve donma-çözülme çevrimine tabi tutulmuş killi zeminlerin dinamik özellikleri üzerinde meydana gelen değişimleri deneysel olarak incelemişlerdir. Çin'de hızlı tren projesi güzergahında yer alan bir alandan alınan zemin örnekleri üzerinde yapılan bu çalışmada, kireç ve çimento %3, %6, %9 ve %12 oranlarında zeminle karıştırılmış ve deney numunelerine dinamik üç eksenli testi yapılmıştır. Deney sonuçları, tekrarlanan donma-çözülme çevrimleri neticesinde modifiye edilmiş zemin numunelerin mekanik özelliklerinin, doğal zemine göre daha güçlü performans gösterdiğini ortaya koymuştur ve çimento ile yapılan stabilizasyonun kirece oranla daha verimli sonuçlar meydana getirdiği tespit edilmiştir.

Harichane vd. (2010), düşük ve yüksek plastisiteli killerin kireç ve doğal puzolan ile stabilizasyonu üzerine yaptıkları çalışmada durabilite kriterlerini incelemişlerdir. Kullanılan kireç oranları %2, %4, %6 ve %8 olarak belirlenirken, doğal puzolan oranları

%5, %10, %15 ve %20 olarak seçilmiştir. Her iki zemin sınıfında da artan katkı oranı ve kür süresi ile serbest basınç dayanımlarının yükseldiği tespit edilmiştir. 12 ıslanma-kuruma çevrimi sonrasında ise zemin, kireç ve doğal puzolan kombinasyonu şeklinde hazırlanan karışımlar, sadece kireç ve sadece puzolan içeren karışımlara göre daha yüksek dayanım değerleri vermişlerdir.

Jauberthie vd. (2010), Fransa'nın Saint Malo şehrinde ve Rance Nehri üzerindeki gel-gitten etkilenen barajın altında biriken ve nehir ağzında bulunan siltlerin, stabilizasyon sonucunda hafif trafiğe maruz lokal yollarda alt temel malzemesi olarak kullanılabilirliği üzerine bir çalışma yapmışlardır. Nehir ağzında bulunan bu tip siltlerin fizikokimyasal özellikleri XRD ve SEM analizleri neticesinde belirlenmiştir. Sönmemiş kireç ve çimentonun farklı oranlarda ayrı ayrı ve birlikte kullanılmasıyla yapılan stabilizasyonun ardından, zemin numunelerinin geoteknik karakteristikleri tespit edilmiştir. Çalışma sonuçları, çimento ve sönmemiş kirecin bu tip siltlerin stabilizasyonunda beraber kullanılmasının daha uygun olduğunu ve bu numunelerin serbest basınç dayanımı ve CBR değerlerinin sadece kireçle veya sadece çimento ile stabilize edilmiş numunelere göre daha yüksek olduğunu ortaya koymuştur. Elde edilen bu veriler ışığında, nehir ağzında bulunan bu karakterdeki siltlerin stabilize edildikten sonra yol alt temel malzemesi olarak kullanılabilmesi fakat uygulamaya geçilmeden önce daha ileri aşamadaki testlerin uygulanması gerektiği kanaatine varılmıştır.

Okyay ve Dias (2010), derin temellerde kullanılacak siltli bir zeminin kireç ve çimento ile stabilizasyonunu araştırma konusu edinmişlerdir. Stabilize edilecek olan zeminin, yapının temeli ile düşey kazıkların arasında kullanılması düşünülmektedir. Bu bölgenin, yük transferlerinin gerçekleşeceği bölge olduğu göz önüne alındığında, zeminin mekanik karakteristiklerinin önemi artmakta ve buradaki zemine iyileştirme uygulanabileceği sonucu ortaya çıkmaktadır. Çalışma kapsamında öncelikle siltli zeminin fiziksel özellikleri belirlenmiş, ardından optimum su muhtevalarında karışımlar hazırlanmıştır. Hazırlanan numunelerdeki katkı maddesi miktarları sırasıyla %2 kireç ve %5 çimento, %3 kireç, %6 çimento, %2 kireç ve %3 çimento şeklindedir. Mekanik dayanımların zamanla değişiminin belirlenmesi açısından, stabilize edilmiş numunelerin 7, 28, 90 ve 350 günlük kür süreleri sonunki optimum su muhtevaları, serbest basınç dayanımları, kohezyon değerleri, içsel sürtünme açısı, çekme dayanımları ve Young modülleri belirlenmiştir. Çalışma sonuçlarına göre, kireçle stabilizasyonun uzun dönemli dayanımlar ortaya koyduğu, çimento ile stabilizasyonda mukavemet artışlarının hızlı bir

şekilde meydana geldiği, 90 günlük kür neticesinde dayanım artışlarının %85'inin tamamlandığı tespit edilmiştir.

Tekin (2010), sülfat etkisine maruz farklı çimento harçlarındaki makro boşluk yapısı gelişiminin bilgisayarlı tomografi yöntemi ile incelenmesi üzerine bir çalışma yapmıştır. Hazırlanan numunelerden elde edilen bilgisayarlı tomografi görüntüleri üzerinde yapılan analizler sonucunda, bilgisayarlı tomografinin sülfata maruz çimentolu harçlarda boşluk yapısı gelişiminin analizinde tahribatsız bir yöntem olarak uygulanabilir olduğu kanaatine varılmıştır.

Bozbey ve Garaisayev (2010), zeminin öğütülme seviyesinin kireçle zemin stabilizasyonundaki etkisini incelemiştir. Kireç katkı oranları %3, %6 ve %9 olarak seçilmiştir. Deney verilerine göre, 3 farklı öğütülme seviyesi neticesinde serbest basınç dayanımı değerlerinde yüksek öğütülme seviyesinden zayıf öğütülme seviyesine doğru bir azalma eğilimi tespit edilmiştir. Çalışmadan elde edilen en önemli sonuç, her bir kireç oranında zayıf öğütülen zeminde daha düşük serbest basınç dayanımı verileri elde edilirken, öğütme kalitesi arttıkça daha yüksek değerlerin ortaya çıkmasıdır.

Runigo vd. (2011), kireçle stabilize edilmiş ve uzun dönem hidrolik çevrimlerin (zemine uzun dönemli su teması ve su sirkülasyonu) etkisine maruz bırakılan siltli zeminlerin kesme dayanımı ve durabilite değerlerini incelemiştir. Deney sonuçlarına göre, zemindeki su temasının ve zemin içindeki su akışının zemin kesme dayanımı parametrelerini oldukça olumsuz bir şekilde etkilediği ve önemli oranda düşürdüğü tespit edilmiştir. Permeabilitenin düşük olmasının, yüksek durabilite sağladığı ve uygulamada bu permeabilite değerlerini elde edebilmek için yüksek enerjide bir kompaksiyonun veya nem oranının gerekliliği vurgulanmıştır.

Rahmat ve Kinuthia (2011), sülfat içerikli killi zeminlerin stabilizasyonunda dinlendirme etkisinin stabilizasyona etkisini incelemiştir. Çalışmada dinlendirme etkisi, stabilizasyon için hazırlanan kil-katkı maddesi karışımlarının hemen kompaksiyona tabi tutulmaması, karıştırma işlemi yapıldıktan sonra 3 gün bekletilmesi ve ardından kompaksiyon deneylerine geçilmesi olarak ifade edilmiştir. Karışım hazırlandıktan sonra hemen kompaksiyon işlemine geçilen ve karıştırma işleminden 3 gün sonra sıkıştırma işlemi yapılarak hazırlanan farklı numuneler için iki farklı katkı maddesi ile çalışılmıştır. Bunlardan ilki sönmemiş kireç, diğeri ise kağıt endüstrisinin yan ürünü olan atık kağıt külüdür. Atık kağıt küllerinin yalnız başına, kireçle ve yüksek fırın cürufu ile birlikte ayrı ayrı kullanıldığı çalışmada, kontrol noktası oluşturmak amacı ile sönmemiş kireç yalnız

başına stabilizasyonda kullanılmıştır. Dinlendirilmeden hazırlanan numunelerin şişme davranışında önemli oranda azalmalara sebebiyet verirken, aynı etkiye dinlendirilen numuneler üzerinde yapılan şişme deneylerinde rastlanmamıştır. Sonuç olarak, karışımların kompaksiyondan önce dinlendirilmesinin stabilizasyon sonrası şişme davranışlarında artışlara sebep olduğu anlaşılmıştır. Çalışma verilerinden elde edilen diğer bir sonuç ise, kağıt atığı küllerinin geleneksel stabilizasyon malzemeleri olan kireç ve/veya çimentonun alternatifi bir katkı maddesi olabileceğidir.

Akpınar (2011), bilgisayarlı tomografi görüntülerinden üç boyutlu kemik modelinin elde edilmesi üzerine bir yüksek lisans çalışması yapmıştır. Çalışma kapsamında, işlevlerini yerine getiremeyen el, ayak, çene gibi uzuvların yapay olarak modellenmesi amaçlanmıştır. Bu yapay modellemeyi oluşturabilmek için de bilgisayarlı tomografi görüntülerinden yararlanılmış ve veriler medikal görüntü işleme programı ile üç boyutlu olarak modellenmiştir.

Cuisinier vd. (2011), kireçle stabilize edilmiş siltli bir zeminin hidrolik geçirimsizlikleri ve mikro yapısı üzerine gerçekleştirdikleri çalışmada, 3×10^3 Å çapından küçük gözeneklerin kireçle stabilizasyondan etkilendiğini ortaya koymuşlardır. Çalışma verilerine göre, stabilizasyon öncesi tamamen boş olan gözeneklerin, iyileştirme sonrası dolduğu ortaya konmuştur. Optimum su içeriğinde hazırlanan numunelerde gözenek büyüklüğü dağılımı üç modlu iken, optimum su içeriğinden daha fazla su katılarak hazırlanan numunelerde gözenek büyüklüğü dağılımı iki modludur. Ayrıca, yüksek su muhtevasında hazırlanan numunelerde büyük gözeneklerin dahi boş kaldığı sonucuna varılmıştır. Çalışmada ayrıca, hidrolik geçirimsizlik ile gözenek hacmi arasında fonksiyonel bir bağıntının olduğu belirtilmiştir.

Seco vd. (2011), %43.5 LL ve %24.9 PL değerlerine sahip şişen bir zeminin endüstriyel yan ürünler ve atık maddelerle stabilizasyonu üzerine çalışmışlardır. 0.399 MPa serbest basınç dayanımına sahip olan zeminin serbest şişme yüzdesi %5 olarak bulunmuştur. Deneylerde doğal magnezitin toz haline getirilmesi sırasında oluşan ve PC-7 olarak adlandırılan yan ürün, doğal alçıtaşı, pirinç kabuğu külü, uçucu kül, taban külü, çelik ocaklarının atığı olan çelik uçucu külü ve alüminyumun geri kazandırılması sürecinde ortaya çıkan alüminat filler malzeme katkı maddeleri olarak kullanılmıştır. Bunların yanı sıra, karşılaştırmalı değerlendirme yapabilmek amacı ile şişen zemin kireçle stabilizasyona tabi tutulmuştur. Kür süreleri 7, 14 ve 28 gün olarak belirlenmiştir. 11 farklı karışım kombinasyonunun denendiği çalışmada, şişme potansiyeli açısından %2 kireç ve %1 PC-7

katkı oranında hazırlanan zemin numuneleri en iyi sonucu vermiştir. Başlangıçta %5 civarında olan serbest şişme değerleri, bu karışım oranlarında %0.8'in altına düşmüştür. Pirinç kabuğu külü katkılı karışımlarda da bu değerler aynı seviyelerde bulunmuştur. Sadece %4 oranında kireç ile stabilizasyon sonucunda bu değer %1.2 seviyelerindedir. Zemine %5 oranında alüminat fillerin eklenmesi, şişme potansiyelerinde ciddi düşüşler meydana getirmemiştir. Serbest basınç dayanımları incelendiğinde, kür süreleri arttıkça genel mukavemet değerlerinde genel bir artış izlenmiştir fakat stabilize edilmemiş şişen zeminde özellikle 14 günlük kür süresinin ardından bunun tersi bir davranış saptanmıştır. Stabilize edilmiş numunelerin serbest basınç dayanımlarında doğal numunelere göre 2-4 kat arası bir artış meydana gelirken, bu davranışın sergilendiği kombinasyonların genellikle pirinç kabuğu külü içerdiği tespit edilmiştir. Birden çok yan ürün ve atık maddelerin zemin stabilizasyonunda kullanıldığı bu çalışmada, pirinç kabuğu külü serbest şişme değerleri ve serbest basınç dayanımı değerleri açısından en dikkat çekici katkı olarak ön plana çıkmıştır.

Yıldız ve Soğancı (2012), kireçle stabilize edilmiş düşük ve yüksek plastisiteli killerin, donma-çözülme çevrimi öncesi ve sonrası dayanım ve permeabilite değerleri üzerine yaptıkları çalışmada, kireç katkı oranını %6 olarak belirlemişlerdir. 1, 3, 7, 21 ve 28 günlük kür süreleri sonunda meydana gelen dayanım ve permeabilite değişimlerini donma-çözülme çevrimi koşullarında ve normal koşullarda ayrı ayrı incelemişlerdir. %6 kireç ilavesi ile birlikte, düşük ve yüksek plastisiteli numunelerin hidrolik iletkenliklerinde 1000 kat artış gözlenirken, 3 donma-çözülme çevrimi sonrasında bu artış 10-20 kat seviyelerinde sınırlı kalmıştır. Dayanım açısından 28 günlük kür sonunda yüksek plastisiteli kil numunelerinde 15 kat artış gözlenirken, düşük plastisiteli kil numunelerinde ise 3 kat dayanım artışı tespit edilmiştir. Gerek yüksek plastisiteli ve gerekse düşük plastisiteli kil numunelerinde, donma-çözülme çevriminin zararlı etkileri sonucu meydana gelen dayanım kaybı %10-15 olarak belirlenmiştir.

Jafari ve Esna-ashari (2012), araç tekerlerinin bir arada durmasını sağlayıp tekerleği meydana getiren tekerlek şeritinin atıklarını kullanarak kireçle birlikte stabilizasyon çalışması yapmışlardır. Çalışmanın ana amacı, tekerlek şeriti atıklarının killi zeminin serbest basınç dayanımı üzerindeki etkilerini incelemek ve donma-çözülme etkisi altındaki davranışını ortaya koymaktır. Çalışmada kullanılan naylon fiber oranı %0, %0.5, %1 ve %1.5 olarak belirlenirken, kireç oranı olarak %0, %4 ve %8 oranları tercih edilmiştir. Çalışma sonuçları, basınç dayanımı ve gerilme-şekil değiştirme davranışlarında katkı

oranlarının önemli ölçüde etkili olduğunu ortaya koymuştur. %8 kireç içeren ve kireçsiz numunelere göre, %4 oranında kireç içeren numunelerde fiber malzemenin serbest basınç dayanımı üzerinde daha belirgin etkileri olduğu tespit edilmiştir. Fiber malzeme oranı arttıkça serbest basınç dayanımı yükselmiştir. Buna göre, serbest basınç dayanımı açısından en mukavemetli örnek %4 kireç ve %1.5 fiber malzeme içeren zemin örneğidir. Donma-çözülme çevriminden önce ve 1 çevrimden sonra fiber malzeme katkısının malzeme rijitliğine pek fazla etki etmediği gözlenmesine rağmen, 2 ve daha fazla donma-çözülme çevrimi neticesinde zemin numunesi rijitliğinin fiber takviyesi ile arttığı sonucuna varılmıştır.

Sabat (2012), optimum değerde taş ocağı atığı içeren şişen bir zeminin kireçle stabilizasyonu üzerinde yaptığı çalışmada, Atterberg limiti deneyleri, kompaksiyon deneyleri, konsolidasyonlu drenajsız üç eksenli basınç deneyi ve durabilite deneyleri yapmıştır. Şişen zeminde kil içeriği %56 ve LL değeri %60 olarak belirlenmiştir. Taş ocağı atıklarının çakıl içeriği %3, kum miktarı %81 ve silt oranı % 16 olarak tespit edilmiştir. Optimum taş ocağı atığını belirlemek amacıyla yapılan ilk çalışmada bu atıklar %10, %20, %30, %40, %50 ve %60 oranlarında şişen zeminle karıştırılmış ve bu numunelere kompaksiyon, CBR ve şişme basıncı deneyleri uygulanmıştır. Deney sonuçlarına göre optimum atık miktarı %40 olarak tayin edilmiştir (Sabat ve Das, 2009). %40 oranında taş ocağı atığı içeren şişen zemine kireç katkı oranı olarak %2 ve %7 değerleri arasında %1 artan oranlar kullanmış ve stabilizasyon işlemi gerçekleştirilmiştir. 7 ve 28 günlük kür süreleri ardından stabilize edilmiş numunelerin kesme dayanımı değerleri ayrıca incelenmiştir. Deney sonuçları kireç katkısının plastik limit, rötre limiti, kohezyon, içsel sürtünme açısı ve optimum su muhtevası değerlerinde artışlar meydana getirdiğini, likit limit, plastisite indisi ve maksimum kuru birim hacim ağırlık değerlerinde ise azalmalara neden olduğunu ortaya koymuştur. Kür süresi artışının kesme deneyi parametrelerinde pozitif etkiler meydana getirdiği yine bu çalışma kapsamında ifade edilmiştir. Çalışma kapsamında yapılan deney sonuçlarına göre, en verimli deney verileri %5 kireç katkılı numunelerden elde edilmiştir.

Li vd. (2012), kıyıya yakın bölgelerde bulunan tuzlu zeminlerin stabilizasyonu üzerine yaptıkları çalışmada, buğday hasatından sonra elde edilen ve ham selüloz bakımından zengin olan buğday samanı ve kireci katkı maddeleri olarak kullanmışlardır. Optimum su içeriği %17.7 ve kuru birim hacim ağırlığı 1.81 Mg/m^3 olarak belirlenen tuzlu zemine ait LL ve PL değerleri sırasıyla %32.6 ve %16.8'dir. Buğday hasatı, tuzlu

zeminlerdeki yüksek korozyonu önleyebilmek amacıyla polivilin alkol ile güçlendirilerek katkı maddesi olarak kullanılmıştır. Bu fiber malzeme zemin ağırlığının %0.2, %0.25 ve %0.3 oranlarında karışıma eklenmiştir. Fiber malzemenin uzunlukları kompaksiyon ve serbest basınç dayanımı testleri için 30, 40, 50, 60 ve 70 mm, konsolidasyonsuz ve drenajsız üç eksenli basınç testi için 15, 20 ve 25 mm olarak seçilmiş ve belirtilen oran ve uzunluklarda zeminle karıştırılmıştır. Deney numunelerine ait kür süreleri 7, 14 ve 28 gün olarak belirlenmiştir. Çalışma sonuçlarına göre, polivilin alkol takviyeli buğday samanının korozyona karşı direncinin güçlü olduğu ve yüksek su muhtevası koşullarındaki zeminlerde dahi güçlendirici olarak kullanılabilceği tespit edilmiştir. Optimum değerler serbest basınç dayanımı testleri için %0.25 karışım oranı ve 50 mm uzunluk, üç eksenli basınç testi için %0.25 karışım oranı ve 20 mm uzunluk olarak tayin edilmiştir. Yalnızca kireçle birlikte stabilizasyonda sıklıkla görülen problem olan gevrek kırılmanın aksine, buğday samanı ve kireçli örneklerde sünek kırılma davranışı meydana gelmiştir.

Al-Mukhtar vd. (2012), doğal bir bentonit türü olan FoCa killerin kireç ile stabilizasyonu üzerine çalışmışlardır. Çalışmanın ana teması, kireç-kil reaksiyonları ile birlikte artan geoteknik özelliklerin ve puzolanik reaksiyonların mikroskopik analizlerle nasıl desteklendiğinin sunulmasıdır. SEM analizi, TEM analizi, termogravimetrik analiz ve X-ışını kırınımı analizleri ile çalışma verileri desteklenmiştir. TEM tekniği puzolanik aşamanın gösterilmesinde, SEM sonuçları ise kil taneciklerinin morfolojik değişimlerinin gösterilmesinde etkin olarak kullanılmıştır.

Goodary vd. (2012), volkanik orijinli zeminlerin çimento ile stabilizasyonu sonucu dayanım parametrelerinde meydana gelen değişimler üzerine bir çalışma yapmışlardır. LM1 olarak isimlendirilen sarımtırak killer ve LM2 olarak adlandırılan siltli killer ile yapılan çalışmada 20 farklı karışım numunesi oluşturulmuştur. SEM ve X-ışını kırınımı analizleri ile birlikte karışımların minerolojik kompozisyonları irdelenmiştir. LM1 zemininde montmorillonitik yapı, LM2 zemininde ise kaolinitik yapı hakimdir. Çalışmanın ana gayesi, 7 günlük maksimum basınç dayanımı verisini elde etmek için, optimum kompaksiyon basıncının tayin edilebilmesidir. Sonuçlara göre, her iki zemin türünde de 9.0 ± 0.1 MPa olarak bulunan maksimum kuru sıkıştırma dayanımını elde etmek için yeterli kompaksiyon basıncı değeri 8 MPa olarak bulunmuştur. Çalışma kapsamında ayrıca, LM1 ve LM2 zeminlerine, kuru ağırlıklarının %20'si oranında iri daneli kum ilave edilmiş ve çimento ile stabilizasyon gerçekleştirilmiştir. Kum ilavesi ile granülometri

eğrisi değişen LM1 ve LM2 zeminlerinin stabilizasyon sonrası mukavemet değerlerinde %50 oranında artışlar meydana gelmiştir.

Lemaire vd. (2013), plastik siltlerin kireç ve çimento ile stabilizasyonu sonucu meydana gelen fizikokimyasal ve mekanik değişimleri incelemiştir. Zeminin mikroyapısındaki değişimlerin SEM analizleriyle, fizikokimyasal değişimlerin X-ışını kırınımı analizleriyle belirlendiği bu çalışma kapsamında, mekanik değişimler karışımların serbest basınç dayanımlarının detaylı olarak irdelenmesiyle belirlenmiştir. Kür süreleri 20 °C'de 3, 28 ve 300 gün, 50 °C'de 300 gün olarak tespit edilmiştir. Katkı maddelerinin %1 kireç ve %5 çimento olarak belirlendiği çalışma sonuçlarına göre, 20 °C'de 300 günlük kür süresi sonucu meydana gelen mukavemet artışının, 50 °C'de 28 günlük kür süresi sonucu oluşan mukavemet artışına eşit olduğu tespit edilmiştir.

Zukri (2013), yumuşak Pekan killerin kireçle stabilizasyonuna yer verdiği çalışmasının ana amacı optimum kireç oranının tayinidir. Bunun yanı sıra, kıvam limitleri testi, standart Proctor ve serbest basınç dayanımı testleri çalışma kapsamında ele alınmıştır. Eades-Grim (1966) pH test metoduna göre yapılan çalışma sonuçlarına göre, optimum kireç oranı %4 olarak tayin edilmiştir. Bu değer pH testindeki 12 pH değerine karşılık gelen kireç oranıdır.

Manso vd. (2013), çelik üretimi esnasında meydana gelen yan ürün olan pota ocağı cürufunun zemin stabilizasyonunda kullanılabilirliği üzerine bir araştırma yapmışlardır. S1, S2 ve S3 olarak adlandırılan ve LL değerleri sırasıyla %68, %85 ve %52 olan farklı killer üzerinde yapılan çalışmada, tüm zeminler kontrol amaçlı olarak %2 kireç ile karıştırılmıştır. Ardından S1 zemini %2 kireç ve %5 pota ocağı cürufu, S2 zemini %2 kireç ve %4 pota ocağı cürufu, S3 zemini ise %2 kireç ve %5 pota ocağı cürufu ile birlikte karıştırılarak deney numuneleri hazırlanmıştır. Kür süreleri 71 gün sadece desikatörde ve 54 gün desikatörde ve 17 gün suda bekletme şeklinde olmak üzere iki farklı şekilde belirlenmiştir. Çalışmada önemle vurgulanan noktalar, pota ocağı cürufunun doğal kil zeminlerinin geoteknik özelliklerinin iyileştirilmesinde kullanılacak bir yan ürün olduğu, bu cüruflarla stabilize edilen zeminin hacimsel stabilitesinin iyi olduğu ve taşıma kapasitesinin arttığı, verimli değerler elde edebilmek için gerekli kür süresinin kireçle stabilizasyondaki kür süresine göre daha uzun olduğu ve durabilite değerlerinin kireçli stabilizasyona nazaran daha iyi olduğudur.

Oza ve Gundaliya (2013), LL değeri %59.79 ve PL değeri %36.8 olan ve yüksek miktarda montmorillonit ihtiva eden bir zeminde stabilizasyon çalışması yapmışlardır.

Çalışmada katkı maddesi olarak çimento fabrikasından temin edilen çimento katı atıkları ve kireç kullanılmıştır. Bu katıklar %1 ila %9 oranları arasında ayrı ayrı ve birlikte zeminle karıştırılmışlardır. Kür süreleri 3, 5, 7, 14, 21 ve 28 gün olarak belirlenmiştir. Serbest basınç dayanımı verilerini esas alan çalışmada sadece çimento atıklarıyla yapılan stabilizasyon için optimum değer %7, sadece kireçle birlikte yapılan stabilizasyonda optimum değer %9, her iki katkının beraber kullanılmasıyla yapılan çalışma neticesinde optimum değer %8 olarak bulunmuştur. Çalışmadan elde edilen veriler ışığında, bu tip bir zeminin stabilizasyonu için en uygun katkı maddesinin çimento fabrikasından temin edilen çimento atıkları olduğuna karar verilmiştir.

Olgun (2013), donma-çözülme etkisi altındaki şişen zeminlere farklı oranlarda kireç, pirinç kabuğu külü ve fiber malzeme karıştırarak stabilizasyon çalışması uygulamıştır. Çalışmanın ana amacı, bu katkıların stabilizasyon sonucu meydana getirdiği etkiyi göstermek ve optimum katkı oranlarını belirleyebilmektir. Çalışmada genellikle gıda mühendisliği alanında kullanılan bir optimizasyon yöntemi olan tepki yüzey yönteminden (RSM) yararlanılarak optimum katkı miktarları belirlenmiştir. Başlangıç katkı miktarı oranları kireç için %2 ila %8, pirinç kabuğu külü için %0 ila %15 ve fiber malzeme için %0 ila %0.8 arasında değişen değerler olarak belirlenmiştir. Tüm numuneler için kür süresi 28 gün olarak tayin edilmiştir. RSM tasarımına göre dizayn edilen karışımlar için donma-çözülme öncesi ve sonrası optimum değerler; kireç için sırasıyla %7.19 ve % 6.46, pirinç kabuğu külü için %5.78-5.91 ve % 14.94-15.00 ve fiber malzeme için %0.8 ve %0.78-0.79 olarak bulunmuştur. Çalışma kapsamında ayrıca SEM analizlerine de yer verilmiştir. Çalışma sonuçlarına göre, donma-çözülme çevrimi sonrası pirinç kabuğu külü katkısının uygun bir stabilizasyon için gereken optimum değerleri artmış, kireçte azalma meydana gelmiş, fiber malzeme için anlamlı bir değişim oluşmamıştır.

Işık ve Özden (2013), ince dane oranının zeminlerin kompaksiyon davranışına etkisini incelerken bilgisayarlı tomografi tekniği kullanmışlardır. Birleştirilmiş Zemin sınıflandırma Yöntemi'ne göre GP, SW ve CH sınıfı malzemeler farklı oranlarda karıştırılarak zemin karışımları hazırlanmıştır. BT tekniği, DICOM tabanlı bir bilgisayar programı kullanılarak 1 mm kalınlıkta dilimlemelerle kullanılmıştır. Genel olarak, ince dane oranının artışıyla kuru birim hacim ağırlık değerinin azaldığı, optimum su muhtevasının ise arttığı bilinmektedir. BT görüntülerinin, Matlab bilgisayar programı kullanılarak sayısallaştırıldığı çalışma sonuçlarına göre, ince dane oranı için sınır değer olarak %12 değeri bulunmuştur. Şöyle ki; %12 ince dane oranına kadar maksimum kuru

birim hacim ağırlık değerinin arttığı, optimum su muhtevasının ise azaldığı bu orandan daha yüksek oranlarda ise tam tersi davranışın ortaya çıktığı sonucuna varılmıştır.

Çelik ve Nalbantoğlu (2013), farklı sülfat konsantrasyonlarındaki (2000, 5000, 10000 ppm) zeminin kireç ve yüksek fırın cürufu ile stabilizasyonu sonucu şişme özelliklerinde meydana gelen değişimleri incelemiştir. Birleştirilmiş zemin sınıflandırma sistemine göre yüksek plastisiteli kil grubuna giren doğal zeminin sülfat konsantrasyonu (640 ppm) kontrol değeri olarak belirlenmiştir. Sülfat içeriğini arttırmak amacıyla doğal zemine sodyum sülfat tozu eklenmiştir. Farklı konsantrasyonlardaki zemine ise %5 kireç ve %6 yüksek fırın cürufu katılarak deney numuneleri hazırlanmıştır. Çalışma sonuçlarına göre, doğal zemine sadece %5 kireç ilavesinin plastisite indisi ve şişme yüzdesi değerlerini önemli ölçüde azalttığı, zemindeki sülfat içeriğinin artışının ise şişme değerlerini anormal derecede yükselttiği tespit edilmiştir. Bunun yanı sıra, sülfat içeriğindeki artışla beraber kireçli numunelerde meydana gelen olumsuz şişme davranışının, %6 oranında yüksek fırın cürufu ilavesiyle ciddi oranlarda azaldığı belirlenmiştir. Sülfat konsantrasyonu 640 ppm olan kontrol numunesinde şişme yüzdesi %3 iken, sülfat içeriğinin artışıyla bu değer %8 mertebelerine ulaşmıştır. Yüksek fırın cürufunun varlığında ise, 10000 ppm sülfat içeriği için bu oran %1 seviyelerine inerken, 5000 ppm sülfat konsantrasyonunda şişme özelliği tamamen ortadan kalkmıştır.

Mishra vd. (2014), granit atıkları ve kireçle yapılan stabilizasyon çalışması sonucu zeminin indeks özelliklerinin nasıl değiştiğini araştırmışlardır. Hazırlanan karışımlardaki kireç miktarı %5, granit atığı miktarları ise %0, 10, 20 ve 30 olarak belirlenmiştir. Çalışma kapsamında stabilizasyon sonucu likit ve plastik limit değerlerindeki değişimler incelenirken bu değişimlerin sırasıyla %37-%28 ve %17.45-%4.80 olduğu ifade edilmiştir. Rötire limiti değerlerindeki değişim ise artan granit atığı oranlarında %8.15-%18 olarak belirlenmiştir.

Aldaood vd. (2014), alçı taşı ve kireçle ince daneli bir zeminin stabilizasyonu sonucu serbest basınç dayanımı ve şişme parametrelerindeki değişim üzerine bir çalışma yapmışlardır. İki aşamalı olarak tasarlanan çalışmanın birinci aşamasında doğal zemine %0, 5, 15 ve 25 oranlarında alçı taşı katılmıştır. İkinci aşamada ise doğal ve alçı taşı ilave edilmiş zemin örneklerine %3 oranında kireç katılarak çalışma kapsamındaki zemin mekaniği deneyleri yapılmıştır. Zemin numuneleri için kür süreleri 2, 7 ve 28 gün olarak belirlenmiştir. Kür sıcaklıkları 20 °C ve 40 °C olarak tespit edilerek kür sıcaklığının zeminin geoteknik özellikleri üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Çalışma kapsamında ayrıca

X-ışını kırınım analizleri ve SEM analizi gerçekleştirilmiş olup, stabilizasyon sonucunda karışımların mikro yapısında meydana gelen değişimler incelenmiştir. Çalışma sonuçlarına göre, tüm kür koşullarında kireçli zemine %5 oranında alçı taşı ilavesi serbest basınç dayanımlarını arttırırken, bu orandan daha fazla alçı taşı ilavesi negatif bir etki oluşturmuştur. Bunun yanı sıra, kür sıcaklığı artışının serbest basınç değerlerinde iki kat artışa neden olduğu çalışmada vurgulanan diğer bir sonuçtur.

Ciancio vd. (2014), kireçle stabilize edilmiş sıkıştırılmış toprakların optimum kireç oranı tayini üzerine bir çalışma yapmışlardır. Çalışma kapsamında serbest basınç dayanımının maksimum olduğu değer, optimum kireç oranı olarak belirlenmiştir. Hazırlanan karışımlardaki kireç oranı %0, 2, 3, 4, 5 ve 6 iken, kür süreleri 28 gün olarak tayin edilmiştir. Deney numuneleri iki grup olarak oluşturulmuştur. 1. grup numuneler belirtilen karışımlarda hazırlandıktan sonra 28 gün 21 ± 1 °C'de kür edilmiş ve serbest basınç dayanımı testine tabi tutulmuşlardır. 2. grup numuneler ise, aynı oranlarda hazırlandıktan ve kür edildikten sonra, 105 °C'de 24 saat etüvde bekletilip serbest basınç dayanımı testlerine geçilmiştir. Çalışma sonuçlarına göre, optimum kireç oranı 1. grup numuneler için %4 olarak tayin edilmiştir. Etüvde kurutma işleminden sonra elde edilen serbest basınç dayanımı değerleri normal kür koşullarındaki numunelere göre değerinden fazla ve anlamsız sonuçlar verdiği için, kür sürelerinin ardından etüvde kurutma işlemi yapılarak mekanik özelliklerin incelenmesinin uygun bir yöntem olmadığına karar verilmiştir. Ayrıca serbest basınç dayanımı verilerine bakılarak tayin edilen optimum kireç oranı tayinin yanı sıra, plastik limit ve pH testleri sonuçlarından hareketle optimum kireç oranının belirlenmesinin daha kısa süreli ve uygun bir yöntem olduğu çalışma kapsamında önemle vurgulanmıştır.

Akcanca ve Aytekin (2014), katı atık depoları için geçirimsiz şilte oluşturulmasında kullanılabilen kireçle stabilize edilmiş kum-bentonit karışımlarının hidrolik geçirimsizlik değerlerinin ıslanma-kuruma çevriminden nasıl etkilendiklerini araştırmışlardır. Bu amaçla, kum-bentonit karışımları ve kireçle stabilize edilmiş kum-bentonit karışımları ayrı ayrı ıslanma-kuruma çevrimine tabi tutulmuş ve bu numunelere hidrolik geçirimsizlik testleri yapılmıştır. Çalışmanın ana gayesi, karışımlara ait hidrolik geçirimsizlik değerlerinin ıslanma-kuruma çevriminden etkilenip etkilenmediğini belirlemektir. 2 gruba ayrılan karışım örneklerinde ilk grup, %20, 30, 40 ve 50 bentonit oranlarındaki kum-bentonit karışımları olurken, bu karışımlara %0, 1, 2 ve 3 oranlarında kireç ilave edilerek hazırlanan örnekler ikinci grubu oluşturmuşlardır. Çalışma sonucunda, karışıma kireç katılmasıyla

birlikte maksimum kuru yoğunluk değerlerinde azalmalar, optimum su muhtevası değerlerinde artışlar görülmüştür. Hidrolik geçirimsizlik deney sonuçları, %20, 30, 40 bentonit ve %1 kireç içeren karışımlarda geçirimsizliğin azaldığını, aynı oranlarda bentonit içeren %2 ve %3 kireçli karışımlarda ise arttığını ortaya koymuştur. Bunun yanı sıra, %50 bentonit ve %1-2 kireçli karışımlarda hidrolik geçirimsizlikte azalma, %50 bentonit ve %3 kireçli karışımlarda artma meydana gelmiştir. Ayrıca ıslanma-kuruma çevrimlerinin geçirimsizlik katsayısında düşüş eğilimine neden olduğu çalışmadan elde edilen diğer bir sonuçtur.

Saussaye vd. (2014), hidrolik bağlayıcılar içinde yer alan sülfat, klorür, nitrat ve fosfat iyonlarının zeminin geoteknik özellikleri üzerinde meydana getirdikleri değişimleri incelemiştir. Stabilizasyon konusunu kimyasal içerik açısından irdeleyen bu çalışmada, sülfat iyonu içeren hidrolik bağlayıcılar tek başına ve diğer bağlayıcılarla birlikte zemine katılmış ve anyon etkisinin şişme ve dolaylı çekme dayanımı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Çalışma sonuçlarına göre, sülfat iyonunun tek başına kullanımının şişme değerlerini düşürdüğü, diğer iyonlarla birlikte kullanılmasının şişme ve dolaylı çekme dayanımı değerlerinde daha güçlü bir etki meydana getirdiği ve bu iyonlar içerisinde sadece fosfat iyonunun toksik etki oluşturduğu tespit edilmiştir.

Sante vd. (2014), zemin ve kirecin karıştırılmasıyla birbiri ardına meydana gelen fiziksel ve kimyasal reaksiyonları inceleyip, bu reaksiyonlar neticesinde karışımların mekanik ve hidrolik performanslarının zamanla değişimi üzerine bir çalışma yapmışlardır. Çalışma kapsamında farklı kür sürelerindeki zemin-kireç reaksiyonları, karışımların pH değerleri ölçülerek irdelenmiştir. Suya doymun ve doymun olmayan koşullarda kür edilen karışımların SEM analizlerinin yapılması, hidrolik geçirimsizliklerinin belirlenmesi, kimyasal analizleri ve odömetre testi performansları çalışma kapsamında incelenen diğer parametrelerdir. Çalışmada kullanılan killi zemine kuru ağırlığının %5'i oranında kireç katılarak kompaksiyon işlemleri gerçekleştirilmiştir. Kür süreleri 2, 7 ve 28 gün olarak belirlenip bu kür süreleri sonunda karışımlara ait SEM analizleri yapılmış ve kimyasal reaksiyonlar sonucu meydana gelen morfolojik değişimler incelenmiştir. X-ışını kırınım analizleri sonuçlarının yer aldığı çalışmada, hidrolik geçirimsizlik değerlerinin kür süresi arttıkça azalma eğilimi gösterdiği ve pH değerleri ölçümünün permeabilite sonuçlarını yorumlamada etkin bir metot olduğu vurgulanmıştır.

Lucena vd. (2014), arıtma çamurunun zemin stabilizasyonunda kullanılabilirliği üzerine yaptıkları çalışmada, zemin-arıtma çamuru karışımlarının kompaksiyon

parametrelerini, serbest basınç dayanımlarını, CBR testi sonuçlarını ve dolaylı çekme dayanımlarını incelemiştir. Lucena (2012), tarafından yapılan doktora tezi çalışmasında arıtma çamuru zemine %5, %10, %15 ve %20 oranlarında katılmış olup, arıtma çamurunun optimum değeri %10 olarak belirlenmiştir. Buna istinaden bu çalışmada, %10 oranındaki arıtma çamuru-zemin karışımına %2, %4, %6 ve %8 oranlarında kireç, çimento ve emülsiyon katılarak, her bir karışım oranları için mekanik etkiler değerlendirilmiştir. Çimento, kireç ve emülsiyon katkıları ile birlikte maksimum kuru birim hacim ağırlık değerlerinde azalma, buna karşın optimum su muhtevalarında artışlar gözlemlenmiştir. CBR değerlerinin kireç ve çimento katkısı ile arttığı, emülsiyon katkısı ile azaldığı tespit edilmiştir. %8 oranında çimento katılan numunelerin dayanım açısından en yüksek sonuçları verdiği bu çalışma, arıtma çamurunun farklı katkı maddeleriyle yol temel tabakalarında veya taşıma gücü kapasitesi güçlendirilecek herhangi bir zeminde kullanılabilir olduğunu ortaya koymuştur.

Dong vd. (2014), otomotiv sanayisinden elde edilen atık ağır kil ile metalurji endüstrisinden elde edilen döküm kumu karışımının değişik oranlardaki çimento katkısı ile zemin stabilizasyonunda kullanımını incelemiştir. Çalışma kapsamında, Atterberg limitleri belirlenerek, standart Proktor, basit kesme ve serbest basınç dayanımı testleri yapılmıştır. Elde edilen veriler ışığında, döküm kumu karışımının atık ağır kilin plastisitesini düşürdüğü, döküm kumu miktarının artışı ile kohezyonun azaldığı, içsel sürtünme açısının ise arttığı gözlemlenmiştir. Çalışma kapsamında ayrıca maksimum kuru birim hacim ağırlık ve serbest basınç dayanımı değerlerinde artışların meydana geldiği ve bu artışların döküm kumu karışımı miktarının artmasıyla kayda değer biçimde artmadığı tespit edilmiştir.

Çalık ve Şadoğlu (2014), kireç ve perlitle stabilize edilen şişen bir zeminin, stabilizasyon sonucu mühendislik özelliklerinde meydana gelen değişimleri incelemiştir. Optimum kireç oranı %8 olarak belirlenen bu çalışmada karışıma uygulanacak olan perlit oranları %0, %10, %20, %30, %40 ve %50 olarak tayin edilmiştir. Değişen perlit oranlarındaki kireçli ve kireçsiz numunelerin kompaksiyon parametreleri, Atterberg limitleri, şişme basınçları ve serbest basınç dayanımlarındaki zamana bağlı değişim bu çalışma kapsamında ele alınmıştır. Çalışmadan elde edilen veriler ışığında, likit limit ve plastisite indeksinin perlit oranındaki artışla birlikte azaldığı ve bu azalma miktarının zamanla değişiminin çok farklı seviyelerde olmadığı tespit edilmiştir. Perlit ve kirecin birlikte kullanıldığı numunelerde likit limit değerlerinde artışlar meydana gelmiştir.

Maksimum kuru birim hacim ağırlık değeri kireçli ve kireçsiz olarak hazırlanan tüm perlit katkılı numunelerde artış göstermiştir. Şişme basıncı ve şişme yüzdesi değerlerinde azalmalar meydana gelmiştir. Başlangıçta 282 kPa olan şişme basıncı değeri, zemine optimum oranda kireç ve %40 perlit katılmasıyla 42.4 kPa değerine kadar inmiştir. Doğal zeminin serbest şişme yüzdesi değeri %7.94 iken, %50 perlit ve %8 kireç içeren karışımlarda %0.95 olarak tespit edilmiştir. Sadece perlit katkılı numunelerin serbest basınç dayanımı değerlerinde genel olarak düşüş gözlenmesine karşın, perlitin kireçle beraber kullanımı ile birlikte zemin numunelerinin serbest basınç dayanımı değerlerinde artışlar meydana gelmiştir. Deneyler sonucunda, %30 perlit ve %8 kireç içeren karışımların optimum çözüm olduğu tespit edilmiştir.

Çalık ve Şadoğlu (2014) tarafından yapılan diğer bir çalışmada, kireç ve perlit katkısının zeminin durabilitesi üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Çalışma kapsamında karışıma katılacak perlit oranları %0, %10, %20, %30, %40 ve %50 olarak belirlenmiş, kireçli numuneler için optimum kireç oranı %8 olarak bulunmuştur. Durabilite tetkikleri, hacimsel stabilizeyi esas alan durabilite tetkiki ve serbest basınç dayanımını göz önüne alan durabilite tetkiki olarak iki farklı grupta incelenmiştir. 28 günlük kür süresi sonunda numuneler 12 adet ıslanma-kuruma periyoduna tabi tutulmuşlardır. Islanma-kuruma periyodu neticesinde sadece perlit içeren karışımların hacimsel bütünlüğünü koruyamadığı, kireç ve perlit içeren karışımların ise ıslanma-kuruma periyodu karşısında direnç gösterdikleri tespit edilmiştir. Hacimsel stabilizeyi ve serbest basınç dayanımını esas alan iki ayrı kritere göre yapılan deneyler neticesinde, sadece perlit içeren zemin numuneleri ile %0, %10 ve %20 perlit içeren kireçli karışımların mühendislik özelliklerini korumada değişen çevre koşullarına karşı dayanıklı olmadığı saptanmıştır. Çalışmadan elde edilen diğer bir sonuç, %30 ve daha fazla perlit içeren kireçli zemin numunelerinin durabilite açısından sınır değerleri sağlamış olduğudur.

Liu ve Shang (2014), Kore sahillerinden alınan deniz sedimentine elektrokinetik ve kimyasal iyileştirmeler yapmışlardır. Zemin numunelerine sülfata dayanıklı çimento, sönmemiş kireç (CaO) ve uçucu kül katılmasıyla deneyler yapılmıştır. Çalışma kapsamında, boşluk suyu kimyasına, Atterberg limitlerine, su muhtevalarına ve karbonat içeriklerine bakılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda, elektrokinetik ve kimyasal iyileştirmenin 7 günlük kür süresinin ardından beraber uygulanmasının drenajsız kesme dayanımlarında sadece kimyasal iyileştirmeye nazaran iki kat daha iyi sonuçlar verdiği tespit edilmiştir.

Önal (2015), İzmir Çiğli'de bulunan Çamaltı Tuz İşletmesi'nin tuz buharlaşma havuzları altındaki zeminin mühendislik özelliklerinin yetersiz olmasından dolayı bu zemine kireçle stabilizasyon çalışması yapmıştır. Tuz buharlaşma havuzlarından alınan zemin numunelerinin serbest basınç dayanımı karakteristikleri belirlenmiştir. pH testi sonuçlarından yola çıkarak optimum kireç oranı miktarı %8 olarak tespit edilmiştir. 6 aya kadar varan farkı kür sürelerinde, kireç katkılı numunelerin serbest basınç dayanımı değerleri elde edilmiş, mikroyapısal analiz için ise XRD ve SEM analizlerine başvurulmuştur. Uzun dönemli testler neticesinde kireç katkılı numunelerde %500 oranında artışların meydana geldiği tespit edilmiştir.

Ahmed (2015), yapmış olduğu çalışmada alçıtaşı katı atıklarından elde edilen bazanitin zemin stabilizasyonunda kullanılabilirliğini incelemiştir. Araştırma kapsamında zeminin mikro yapısındaki ve serbest basınç dayanımı değerlerindeki değişimler ele alınmıştır. Zemine yapılan kimyasal analizler neticesinde SiO_2 , Al_2O_3 ve Fe_2O_3 oranlarının sırasıyla %48, %20 ve %8 olduğu tespit edilmiştir. Toplam CaO miktarı ise %3 seviyelerindedir. Yapılan stabilizasyon çalışmasında bazanit, çimento ve kireç ile birlikte farklı miktarlarda zemine katılmıştır. Deneylemlerden elde edilen verilere göre, zeminin serbest basınç dayanımında bazanit katkısıyla birlikte artışlar meydana gelmiştir. Serbest basınç dayanımı değerlerinde meydana gelen artışlar, XRD ve SEM analizleriyle örtüşmektedir.

Aldaood vd. (2015), jips içeren ve içermeyen ince taneli zeminlerde, suda bekletme süresinin zemin numuneleri üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. 28 günlük kür uygulanan numunelerdeki kireç oranı %3'tür. Suda bekletme süresi 7, 14, 28, 90 ve 180 gün olarak belirlenmiş olup, bu süreler sonucunda zemin numunelerinin hacim değişimleri ve serbest basınç dayanımında meydana gelen etkiler incelenmiştir. %3 kireç içeren numunelere katılan jips oranı %0, %5, %15 ve %25 olarak belirlenmiştir. Tüm zemin numuneleri aynı hacimdeki suda bekletilmiştir. Stabilitayı değerlendirmek açısından, zemindeki hacim değişimleri numunelerin yüksekliğini ve çapını ölçerek tayin edilmiştir. Çalışma sonuçlarına göre, suda bekletme periyodu uzadıkça, numunelerin pH değerlerinde, serbest basınç mukavemetinde ve elektriksel iletkenliklerinde azalmalar meydana gelmiştir. Serbest basınç dayanımı açısından optimum jips oranı %5 olarak bulunmuştur. Bu oranlarla hazırlanan zemin numunelerindeki 90 günlük suda bekletme süresi ardından serbest basınç değerinde meydana gelen azalma diğer numunelere oranla daha düşük seviyededir. 180 günlük suda bekletme süresi sonunda ise, hazırlanan tüm numunelerin

kararsız hale geldiği görölmüştür. Zemin numunelerinin 7 günlük suda bekletilme süresinin ardından, dalga hızlarında önemli derecede düşüşler meydana gelmiştir. Bu çalışma ile, suya doygun zeminlerin mühendislik yapıları tasarımında kullanılmasında, suyun varlığının önemi ve etkileri bir kez daha vurgulanmıştır.

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

Çalışmanın amacı, tüfit taşlar grubunda yer alan ve inşaat mühendisliğinde çeşitli alanlarda kullanılan Bayburt Taşı'nın farklı tiplerinin zemin stabilizasyonu için uygunluğunun araştırılmasıdır. Bu taşların ocaklardan çıkarılması ve mühendislik alanlarında kullanılmak üzere fabrikalarda kesimi sonucu, modern teknolojinin kullanılmamasının etkisiyle, %70'lere varan atık malzemeler meydana gelmekte ve çevre kirliliğine sebebiyet vermektedir. Çalışma kapsamında, farklı fizikokimyasal özelliklere sahip yeşil, beyaz ve sarı renkteki BT atıklarının kireçli ve kireçsiz olarak zeminle karıştırılarak zemin mekaniği deneylerine tabi tutulması ve bu atıkların stabilizasyonda kullanılabilirliğinin değerlendirilmesi planlanmıştır.

Çalışmada kullanılan malzemelerin fizikokimyasal özellikleri, bu malzemelerle yapılan zemin mekaniği deneyleri, deneylere ait standartlar, üretilen numunelerin notasyonları ile ilgili detaylı bilgiler bu kısımda ele alınmıştır.

2.1. Malzemeler

Doktora kapsamında yapılan deneylerde kullanılan malzemeler; doğal malzeme, beyaz, sarı ve yeşil renkteki BT atıkları ve kireçtir. Doğal malzeme, Bayburt ili Demirözü ilçesinden temin edilmiştir. Zemin yüzeyinin yaklaşık 2 m derinliğinden alınan malzeme Bayburt Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Geoteknik Laboratuvarı'na getirilmiştir. Tüm deneyler boyunca, doğal malzeme 24 saat boyunca etüvde kurutulduktan sonra deney numunesi hazırlama işlemlerine geçilmiştir. Doğada atık halde bulunan ve çevre kirliliğine sebebiyet veren Bayburt taşları, şehir merkezi civarından toplanmıştır. Kireç ise, Karsan Kireç Sanayi Ticaret A.Ş. tarafından üretilen sönmüş kireçtir.

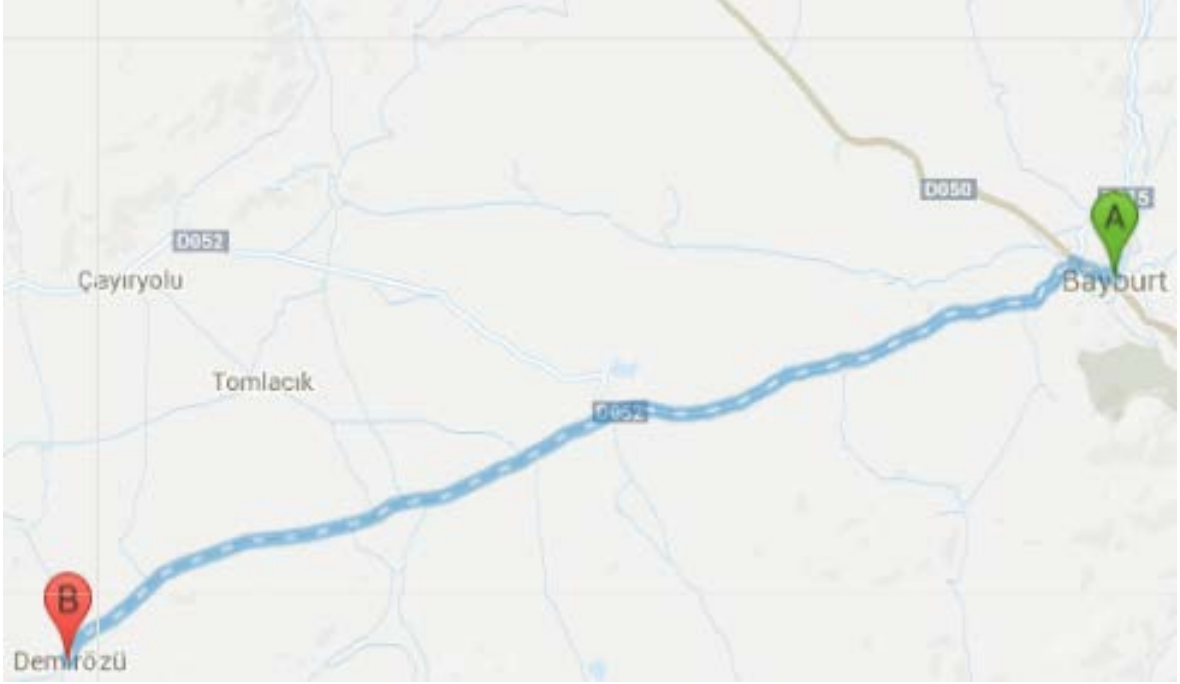
Deney numuneleri kireçli ve kireçsiz olmak üzere iki ana gruba ayrılarak hazırlanmıştır. Kirecin karışıma katılmadığı numunelerde, BT atıkları doğal malzemenin etüvde kurutulmuş kuru ağırlığının %5, %10, %15 ve %20 oranlarında karışıma katılmıştır. Kireçli numunelerde, doğal malzeme ve optimum kireç oranı (%6) ağırlığı toplamına, yukarıda bahsi geçen oranlarda farklı nitelikteki Bayburt taşları katılmıştır. Deney numunelerine ait isimlendirmeler Tablo 2.1'de sunulmuştur.

Tablo 2.1. Deneysel numunelerine ait notasyonlar

Deneysel numunelerinin karışım oranları	Notasyon
Kireçsiz numuneler	
Doğal zemin	Z
Zemin ve %5 BBT	ZB5
Zemin ve %10 BBT	ZB10
Zemin ve %15 BBT	ZB15
Zemin ve %20 BBT	ZB20
Zemin ve %5 BYT	ZY5
Zemin ve %10 BYT	ZY10
Zemin ve %15 BYT	ZY15
Zemin ve %20 BYT	ZY20
Zemin ve %5 BST	ZS5
Zemin ve %10 BST	ZS10
Zemin ve %15 BST	ZS15
Zemin ve %20 BST	ZS20
Kireçli numuneler	
Doğal zemin ve kireç	ZK
Zemin, kireç ve %5 BBT	ZKB5
Zemin, kireç ve %10 BBT	ZKB10
Zemin, kireç ve %15 BBT	ZKB15
Zemin, kireç ve %20 BBT	ZKB20
Zemin, kireç ve %5 BYT	ZKY5
Zemin, kireç ve %10 BYT	ZKY10
Zemin, kireç ve %15 BYT	ZKY15
Zemin, kireç ve %20 BYT	ZKY20
Zemin, kireç ve %5 BST	ZKS5
Zemin, kireç ve %10 BST	ZKS10
Zemin, kireç ve %15 BST	ZKS15
Zemin, kireç ve %20 BST	ZKS20

2.1.1. Doğal Malzeme

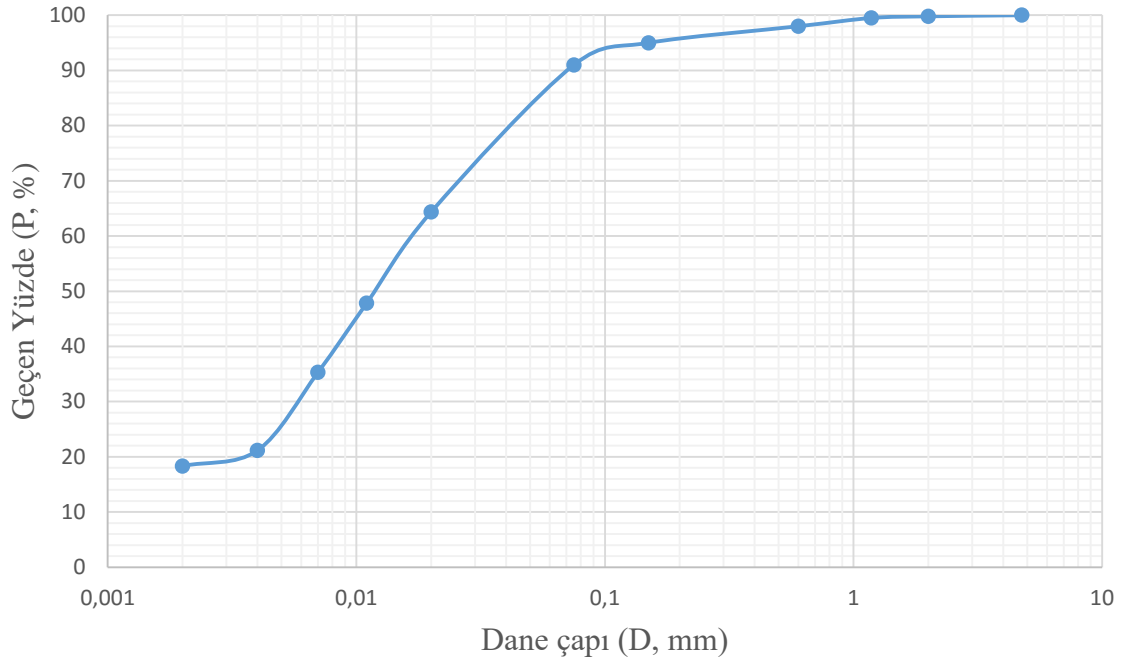
Deneysel numunelerde kullanılan zemin örneği Bayburt ili Demirözü ilçesindeki bir araştırma çukurundan temin edilmiştir. $40^{\circ} 9' 50''$ kuzey enlemi ve $39^{\circ} 53' 33''$ doğu boylamı koordinatlarında yer alan 1975 m rakımlı bu bölgeden alınan doğal malzeme Bayburt Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Geoteknik Laboratuvarı'na getirilmiştir. Laboratuvara getirilen doğal zeminin tümü 4 No'lu elekten elenerek stabilizasyon çalışmasında kullanılmıştır. Doğal malzemenin alındığı Demirözü ilçesinin konumu Şekil 2.1'de sunulmuştur.



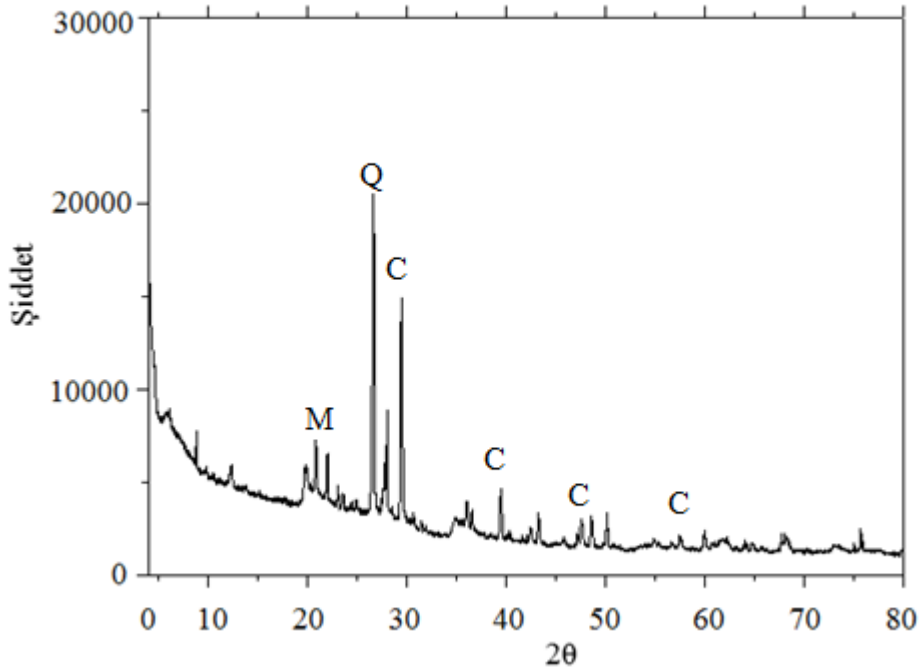
Şekil 2.1. Doğal malzemenin temin edildiği Demirözü ilçesinin konumu

Çalışma kapsamında ilk olarak elde edilmesi gereken veri, temin edilen zeminin hangi sınıf zemin türü olduğudur. ASTM D 422 standardına göre yapılan elek analizi ve hidrometre deneyi sonucunda, birleşik zemin sınıflandırma sistemi ASTM D 2487 standardına göre çalışmada kullanılan zeminin sınıfı yüksek plastisiteli kil (CH) olarak belirlenmiştir.

Birleşik zemin sınıflandırma sistemine göre zemin sınıfı yüksek plastisiteli kil olarak tayin edilen doğal malzemenin minerolojik özellikleri belirlenmek üzere X-ışını difraksiyon analizi yapılmıştır. Doğal malzemenin X-ışını difraksiyon analizi Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi Merkez Laboratuvarı'nda, Rigaku/SmartLab marka ve modelli XRD cihazı ile gerçekleştirilmiştir. X-ışını kırınım analizi sonuçlarına göre doğal malzeme içerisinde kalsit (C), kuvars (Q) ve montmorillonit (M) minerallerinin yaygın olduğu tespit edilmiştir. Doğal malzemeye ait granülometri eğrisi ile elde edilen XRD sonuçları sırasıyla Şekil 2.2. ve Şekil 2.3'de gösterilmiştir.



Şekil 2.2. Doğal malzemenin granülometri eğrisi



Şekil 2.3. Doğal malzemenin XRD analizi sonuçları

Doğal malzemenin zemin mekaniği deneyleri sonucunda belirlenen mühendislik özellikleri Tablo 2.2’de verilmiştir.

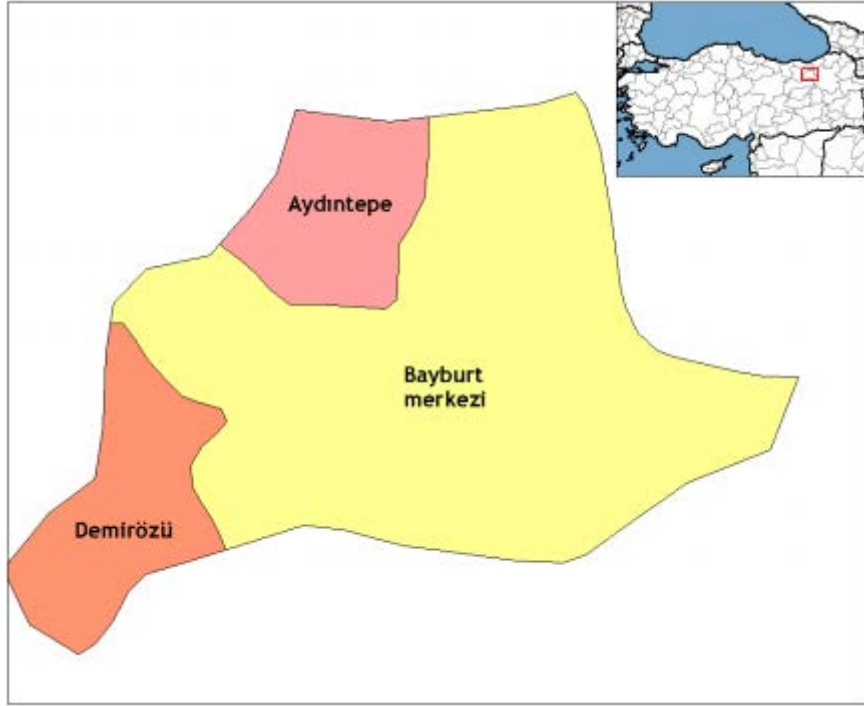
Tablo 2.2. Doğal malzemenin özellikleri

USCS sınıflandırma	CH
Likit limit, LL (%)	113.6
Plastik limit, PL (%)	28.7
Plastisite indisi, PI (%)	84.9
Özgül ağırlık, G_s	2.60
Optimum su içeriği, w_{opt} (%)	24.2
Maksimum kuru yoğunluk, $\rho_{d,max}$ (Mg/m ³)	1.446
Renk	Sarımtırak

Tablo 2.2’de mühendislik özellikleri sunulan doğal malzemeye ASTM D 2974 standardına göre organik madde tayini analizi Karadeniz Teknik Üniversitesi Eczacılık Fakültesi Analitik Kimya Laboratuvarı’nda yapılmıştır. Elde edilen veriler ışığında, doğal malzemenin içindeki organik madde oranı %5 seviyelerinde bulunmuştur. Bu değer, kireçle stabilizasyon için uygun ve sınır bir değerdir. Literatür çalışmaları organik madde içeriği %5’ten daha fazla olan zeminlere kireçle stabilizasyon uygulanması halinde, zemin içindeki organik maddelerin kimyasal reaksiyonları azaltıcı etkisinin olduğunu ve ıslanma kuruma periyotlarında zemini ufalayıp dağıttığını ortaya koymuştur (Arman ve Moonfish, 1972; Nelson ve Debora, 1992).

2.1.2. Bayburt Taşı

Doktora çalışması kapsamında zemin stabilizasyonunda katkı maddesi olarak kullanılması planlanan Bayburt Taşı (BT), Bayburt şehri civarında bulunur ve bölge ekonomisi için önemli bir yere sahiptir. Mevcut kaynaklara göre tarihi M.Ö. 3000’li yıllara dayanmakta olan bu şehir, 40° 37' kuzey enlemi ile 40° 45' doğu boylamı, 39° 52' güney enlemi ile 39° 37' batı boylamları arasında yer almaktadır (ÇŞB, 2011). Doktora çalışmasının yapıldığı, doğal malzeme ve atık Bayburt taşlarının temin edildiği Bayburt şehrinin konumu, T.C. Kalkınma Bakanlığı Doğu Karadeniz Projesi Bölge Kalkınma İdaresi Başkanlığı tarafından hazırlanan Bayburt il raporundaki sunulan biçimiyle Şekil 2.4.’de gösterilmiştir.



Şekil 2.4. Bayburt şehrinin konumu (KB, 2013)

Maden aramaları üç farklı tipi olan Bayburt taşının bu bölgede 180 milyon m³ rezervinin bulunduğunu göstermiştir (Yılmaz vd., 2005). Bu taşlar farklı endüstriyel sektörlerde kullanılmakta olup, taşların kesilmesi esnasında katı atıklar meydana gelmektedir. Stabilizasyonda kullanılacak olan malzemenin katı atık olması gerek çevre duyarlılığı gerekse maliyetler bakımından oldukça önemlidir.

Maden yatağının özelliklerine uygun biçimde ve yeterli sıklıkta açılan galeri, kuyu, yarma ve sondaja dayanarak tespit edilen ve jeolojik ve mühendislik özellikleri çok iyi bilinen rezervlere görünür rezerv denilmektedir. 2005 yılında Bayburt Valiliği'nin talebi üzerine MTA tarafından yapılan araştırmalar neticesinde Toptepe, Sırataşlar, Gevenli, Konakdağ ve Gümüşdamla sahalarında toplam 2.535.700 ton görünür Bayburt taşı rezervi tespit edilmiştir (Kudaka, 2014).

Yaşamın doğal ve kaçınılmaz sonucu olan atıklar ve atıkların yönetimi, toplumların yıllardır gözden uzak olsun anlayışıyla davrandıkları konuların başında gelmiş; insanlık, uzun süre, yaptıklarıyla doğal dengeyi bozabileceğini düşünmemiştir. Nüfus artışı, teknolojik gelişme, sanayileşme, kentleşme, hızla artan ve farklılaşan tüketim ile ortaya çıkan katı atıklar, çevre ve insan sağlığına olumsuz etkileriyle günümüzde önemli çevre sorunlarından biri olmaktadır (Palabıyık ve Altunbaş, 2004). Bu tip çevre sorunları

özellikle endüstri ve sanayi bölgelerinde gittikçe büyüyen bir problem haline gelmiştir. Evsel, endüstriyel ve ticari olmak üzere üç ana başlıkta toplanabilen katı atıkların yeniden kullanımına ilişkin birçok çalışma ve araştırma yapılmıştır.

BT'nin ocak işletmeciliğinde modern yöntemlere geçilmemesi sebebiyle %70'e varan kayıplar oluşmaktadır. Bu kayıp tarım arazilerini ve havayı kirletmekte çevre ve sağlık problemlerine sebep olmaktadır. BT'nin fazla miktarda oluşan atığı depolama sorunlarını da beraberinde getirmektedir.

Bayburt Taşı orijin olarak tuf/tüfit taşlar grubundadır. Kimyasal olarak yüksek oranda silis içermekte ve bu silissi yapı zeolit minerallerinden oluşmaktadır. BT genel olarak dış duvar kaplaması, denizlik ve yüzey kaplamaları yanında çeşitli restorasyon işlerinde, köprü, cami ve çeşme gibi imalatlarda kullanılabilir. Camilerde, sütunlarda ve dış cephe kaplamalarındaki BT kullanım alanlarından bazı örnekler Şekil 2.5'de sunulmuştur.



Şekil 2.5. Bayburt Taşı kullanım alanları (URL-1, 2014)

Doktora çalışması kapsamında zemin stabilizasyonunda kullanılabilirliği incelenecek olan yeşil, sarı ve beyaz renkteki Bayburt taşları Bayburt Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Geoteknik Laboratuvarı'na getirilmiş ve 200 nolu elek altı malzeme olacak şekilde öğütülme işlemine tabi tutulmuştur. Şekil 2.6 ve 2.7'de sırasıyla geoteknik laboratuvarına getirilen atık haldeki Bayburt taşları ve taşların öğütülme işlemi sonundaki toz halleri gösterilmiştir. Taşların toz haline getirilme işlemi taş kırma ve öğütme makineleri ile yapılmış olup, makinelere ait resimler Şekil 2.8'de gösterilmiştir.



Şekil 2.6. Laboratuvara getirilen atık haldeki Bayburt taşları



Şekil 2.7. Atık taşların toz hali



Şekil 2.8. Taşların toz haline getirilmesinde kullanılan öğütme ve taş kırma makineleri

2.1.2.1. Bayburt Yeşil Taşı

BYT riyolitik bir tüf olup, kayaç içinde volkanik malzemelerden oluşan bir matriks ve bu matriks içerisinde kuvars, plajiolaz ve kloritleşmiş biyotit mineralleri bulunmaktadır (Kudaka, 2014). Matriks ise, kuvars ve feldispat miktolitleri ile karbonat, serisit, klorit ve volkanik malzemelerden meydana gelmektedir. Yoğunluğunun düşük, ağırlıkça su emme oranının yüksek olmasına karşın basınç, eğilme ve aşınma dirençleri iyidir. Ses ve ısı izolasyonu yüksek olan ve TS 2513 standartlarına uygunluk gösteren bu taşın soğuk bölgelerde dahi dış kaplama malzemesi olarak kullanılabilceğini söylemek mümkündür (URL-1, 2014).

Ülkemizde, Bayburt şehrinde ve diğer illerimizde inşaat malzemesi olarak BYT kullanımı gün geçtikçe artış göstermektedir. İnşaatı devam eden Trabzon Üniversite Mahallesi Zafanoz Camii'nde dış kaplama malzemesi olarak BYT kullanımını gösteren resim Şekil 2.9'da sunulmuştur. MTA tarafından hazırlanan Bayburt Doğal Taş Potansiyeli Maden Jeoloji Raporu'nda yer alan BYT teknik analizi sonuçları, taşın fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikleri Tablo 2.3'de verilmiştir.



Şekil 2.9. Trabzon Zafanoz Camii ve dış kaplamasındaki BYT kullanımını detayı

Tablo 2.3. MTA raporuna göre BYT teknik analizi sonuçları (URL-1, 2014)

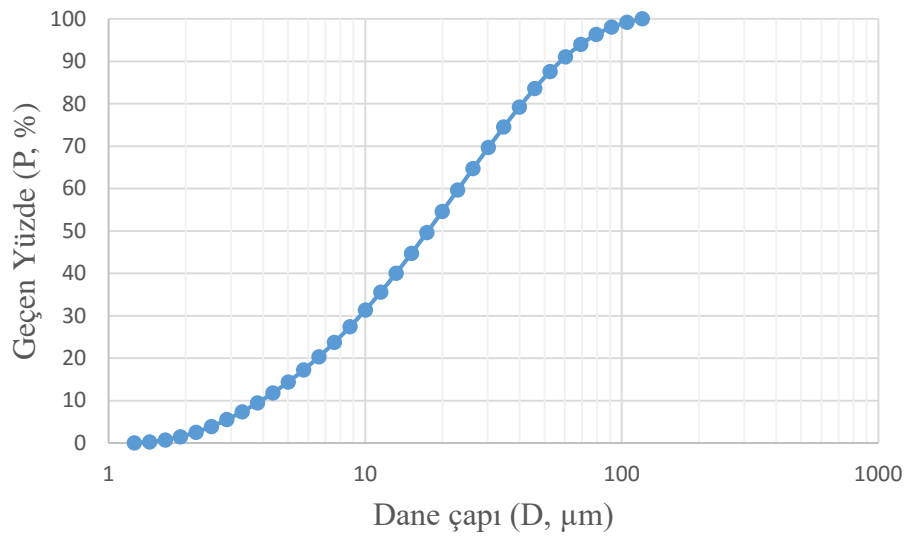
Özgül Ağırlık	2.74
Sertlik (Mohs)	3-4
Birim Hacim Ağırlık (kN/m ³)	22.6
Porozite (%)	13.3
Basınç Direnci (MPa)	60.8
Darbe Direnci (MPa)	3.7
Eğilme Direnci (MPa)	22.9
Ortalama Aşınma Direnci (cm ³ /50cm ²)	26.4
SiO ₂ Miktarı (%)	72.2
MgO Miktarı (%)	0.4
Fe ₂ O ₃ Miktarı (%)	2.1
CaO Miktarı (%)	0.7

Stabilizasyonda katkı maddesi olarak kullanılacak BYT atıklarının kimyasal özelliklerini belirlemek üzere yapılan XRF analizleri ile fiziksel analizler Aşkale Çimento Sanayi Ticaret Anonim Şirketi Aşkale Çimento Fabrikası'nda yapılmış olup, elde edilen veriler Tablo 2.4'de verilmiştir.

Tablo 2.4. BYT kimyasal ve fiziksel özellikleri

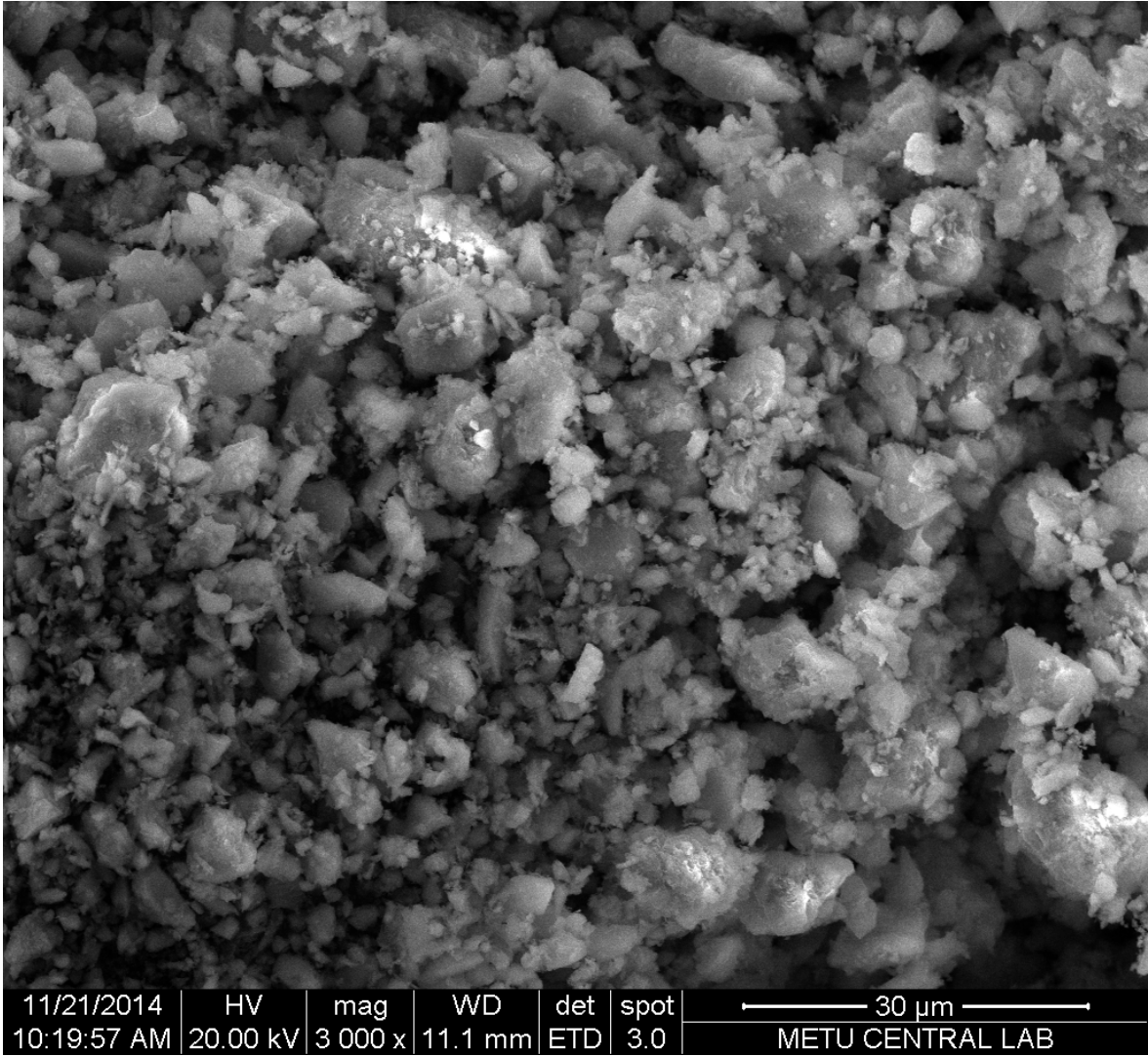
KİMYASAL ANALİZLER	
Toplam SiO ₂ (%)	68.22
Al ₂ O ₃ (%)	12.06
Fe ₂ O ₃ (%)	1.84
CaO (%)	2.17
MgO (%)	1.04
SO ₃ (%)	0.09
K ₂ O (%)	1.54
Na ₂ O (%)	6.08
Kızdırma Kaybı (%)	6.79
Cl (%)	0.0281
FİZİKSEL ANALİZLER	
45 µ elek üzeri (%)	5.0
Özgül Ağırlık	2.30
Blaine (cm ² /g)	6250
Puzolanik Aktivite	10.5

Öğütülmüş BYT atıklarının dane boyutu dağılımı testi Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Çevre Mühendisliği Laboratuvarı'nda lazer kırınım yöntemiyle yapılmış olup, bu atık tozlarına ait dane boyutu dağılım eğrisi Şekil 2.10'da gösterilmiştir. Literatürde dane boyutu belirlemede lazer kırınım yönteminin kullanılmasına ilişkin çalışmalar mevcuttur (McCave vd., 1986; Özer ve Orhan, 2007; Özer vd., 2009).



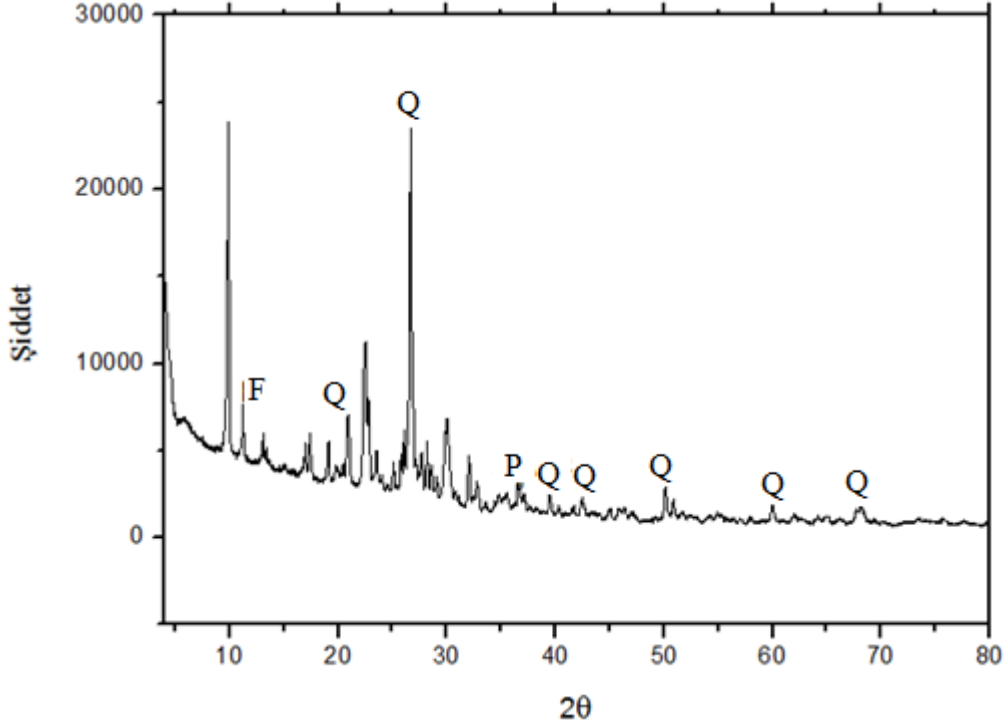
Şekil 2.10. Öğütülmüş BYT atıklarının dane boyutu dağılımı

BYT atıklarının SEM analizleri Orta Doğu Teknik Üniversitesi Merkez Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiştir. Görüntüler 3000, 6000, 12000 ve 24000 kat büyütme yapılarak elde edilmiştir. 3000 kat büyütülmüş SEM görüntüsü Şekil 2.11'de sunulurken, tüm SEM analizi görüntüleri Ek-1'de verilmiştir.



Şekil 2.11. BYT atıklarının 3000 kat büyütülmüş SEM görüntüsü

BYT atıklarına yapılan XRD analizi sonucunda yapısında kuvars (Q), feldispat (F) ve periklas (P) minerallerine rastlanmıştır. XRD analizi sonuçları Şekil 2.12'de yer almaktadır.



Şekil 2.12. BYT atıklarının XRD analizi

2.1.2.2. Bayburt Beyaz Taşı

BBT riyo-dasitik bileşimli vitrik tüf olup, kayaç içerisinde volkanik malzemelerden oluşan bir matriks ve matriks içerisinde kuvars, plajiolaz, biyotit ve kaya parçaları bulunmaktadır (Kudaka, 2014). Matrikste, pekişmiş volkanik malzemelerin yanı sıra kuvars ve feldispat mikrolitleriyle demiroksit ve alterasyon ürünü mineral oluşumları da gözlemlenmektedir (URL-1, 2014). BBT kullanımı, BYT kullanımına oranla daha yaygındır. BBT birçok bina, köprü, cami ve çeşme gibi yapılarda tercih edilen bir yapı malzemesidir. Şekil 2.13'de Bayburt ili Aydın-tepe ilçesi Arpalı Mevkii meydanında bulunan ve BBT ile inşa edilen meydan kulesi yer almaktadır. MTA tarafından hazırlanan Bayburt Doğal Taş Potansiyeli Maden Jeoloji Raporu'nda yer alan BBT teknik analizi sonuçları ise Tablo 2.5 vasıtasıyla sunulmuştur.



Şekil 2.13. Yapılarda BBT kullanımı örneği

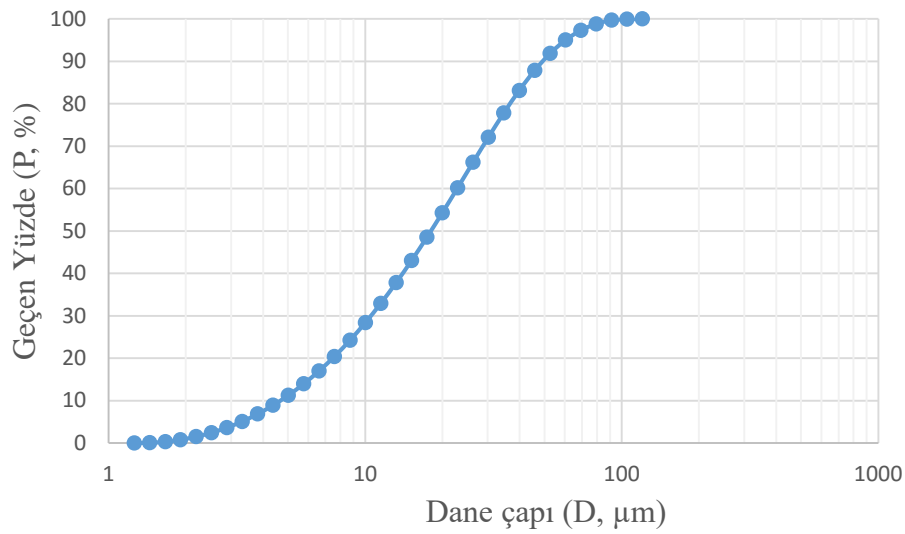
Tablo 2.5. MTA raporuna göre BBT teknik analizi sonuçları (URL-1, 2014)

Özgül Ağırlık	2.37
Sertlik (Mohs)	4-5
Birim Hacim Ağırlık (kN/m ³)	17
Görünür Porozite (%)	20.6
Basınç Direnci (MPa)	44.1
Darbe Direnci (MPa)	0.8
Eğilme Direnci (MPa)	12.3
Ortalama Aşınma Direnci (cm ³ /50cm ²)	25
SiO ₂ Miktarı (%)	69.20
MgO Miktarı (%)	0.85
Fe ₂ O ₃ Miktarı (%)	1.10
CaO Miktarı (%)	2.95

CH kili zeminin iyileştirilmesinde katkı maddesi olarak kullanılacak atık BBT'nin kimyasal özelliklerini belirlemek üzere yapılan XRF analizleri ile fiziksel analizler Aşkale Çimento Sanayi Ticaret Anonim Şirketi Aşkale Çimento Fabrikası'nda yapılmıştır. Elde edilen veriler Tablo 2.6'da sunulmuştur. BBT atıklarının dane boyutu dağılımı ise Şekil 2.14'de gösterilmiştir.

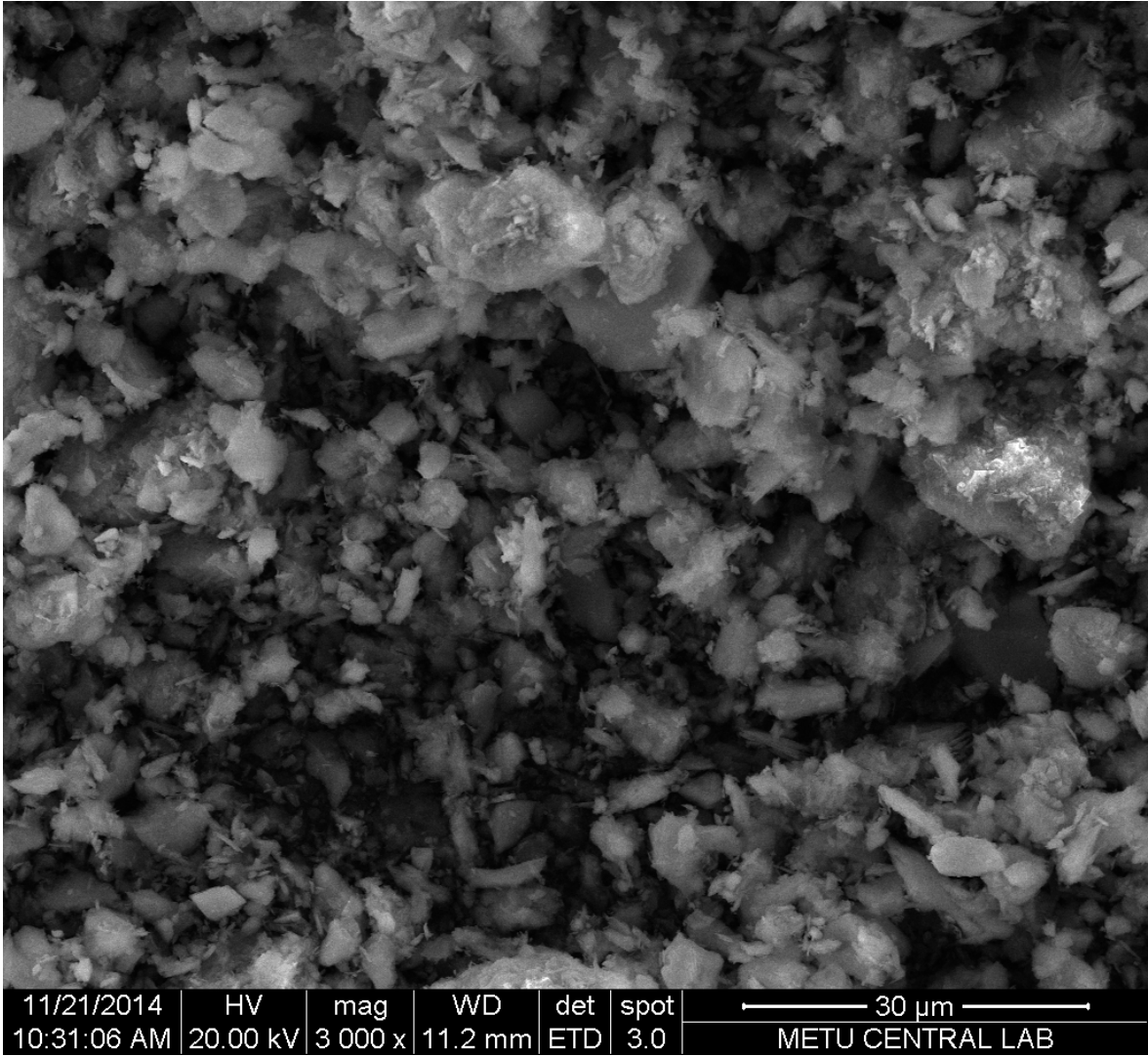
Tablo 2.6. BBT kimyasal ve fiziksel özellikleri

KİMYASAL ANALİZLER	
Toplam SiO ₂ (%)	69,96
Al ₂ O ₃ (%)	12,25
Fe ₂ O ₃ (%)	0,33
CaO (%)	2,52
MgO (%)	1,20
SO ₃ (%)	0,05
K ₂ O (%)	2,43
Na ₂ O (%)	0,57
Kızdırma Kaybı (%)	10,08
Cl (%)	0,0280
FİZİKSEL ANALİZLER	
45 µ elek üzeri (%)	7,0
Özgül Ağırlık	2,32
Blaine (cm ² /g)	7194
Puzolanik Aktivite	8,8



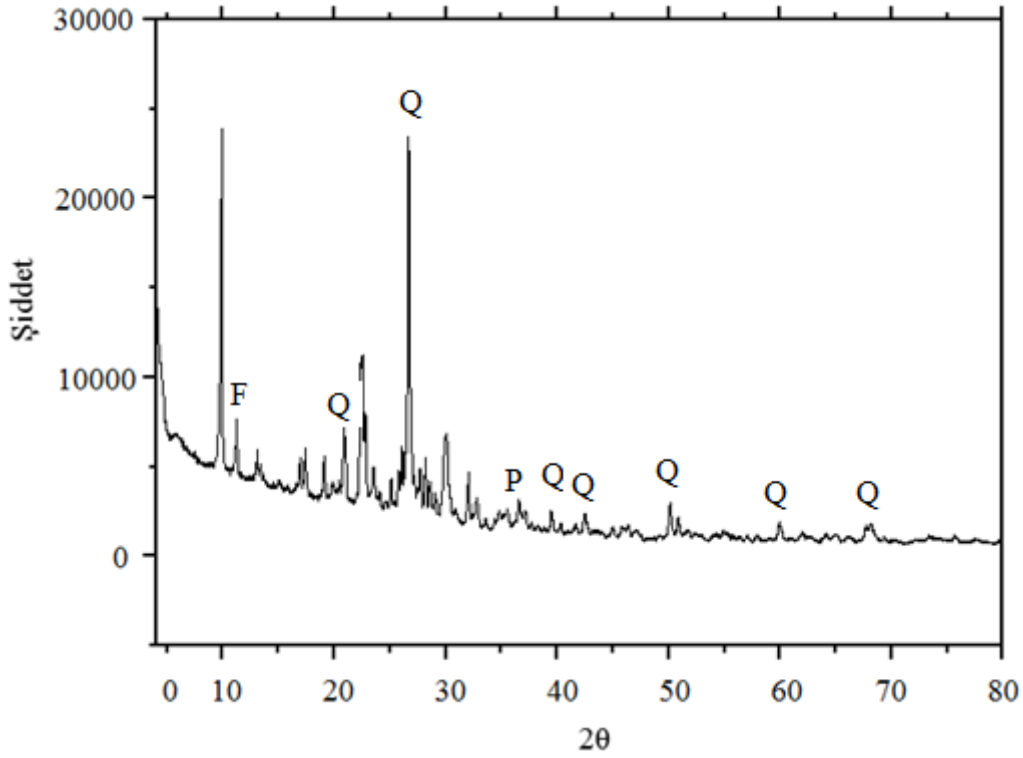
Şekil 2.14. Öğütülmüş BBT atıklarının dane boyutu dağılımı

BBT atıklarının SEM analizleri Orta Doğu Teknik Üniversitesi Merkez Laboratuvarı'nda 3000, 6000, 12000 ve 24000 kat büyütme yapılarak elde edilmiştir. 3000 kat büyütülmüş SEM görüntüsü Şekil 2.15'te, tüm SEM analizi görüntüleri ise Ek-1'de sunulmuştur.



Şekil 2.15. BBT atıklarının 3000 kat büyütülmüş SEM görüntüsü

XRD analizi sonucunda yapısında kuvars (Q), feldispat (F) ve periklas (P) minerallerine rastlanılan toz halindeki BBT atıklarına ait XRD analizi sonuçları Şekil 2.16'da yer almaktadır.



Şekil 2.16. BBT atıklarının XRD analizi

2.1.2.3. Bayburt Sarı Taşı

BST içinde altere olmuş volkanik malzemelerden oluşan bir matriks ve matriks içerisinde kuvars, plajiolaz ve kaya parçaları bulunmaktadır (Kudaka, 2014). Matriks ise tamamen bozunmuş olup içerisinde karbonat, serisit ve demiroksit oluşumları gözlemlenmektedir (URL-1, 2014). Piroklastik kayalarda feldspat, kuvars, biotit, magnetit, hornblend ve ojit en çok miktarda bulunan fenokristallerdir (Leckeubush, 1984; Çimen, 2005).

Diğer Bayburt taşlarında olduğu gibi sarı renkteki bu taşın da rezervi fazla olmakla birlikte tarihi yapılarda, dekoratif işlerde ve buna benzer mimari tasarımlarda kullanım alanı oldukça geniştir. Kullanım alanlarına örnek teşkil etmesi amacıyla Bayburt ili merkezinde bulunan Yakutiye Camii'nin girişinde yer alan kemere ait resim Şekil 2.17'de gösterilmiştir. Tüm BT kullanımlarında öne çıkan en büyük özellik, taşların işlenebilirliğinin kolay olması dolayısıyla daha çok dekoratif işlerde ve kaplama malzemesi olarak kullanılmasıdır.



Şekil 2.17. Bayburt Yakutiye Camii kemerleri ve BST kullanımı detayı

MTA tarafından hazırlanan Bayburt Doğal Taş Potansiyeli Maden Jeoloji Raporu'nda BST teknik analizine de yer verilmiş olup bu analize ait fiziksel, kimyasal ve mekanik sonuçlara Tablo 2.7'de yer verilmiştir.

Tablo 2.7. MTA raporuna göre BST teknik analizi sonuçları (URL-1, 2014)

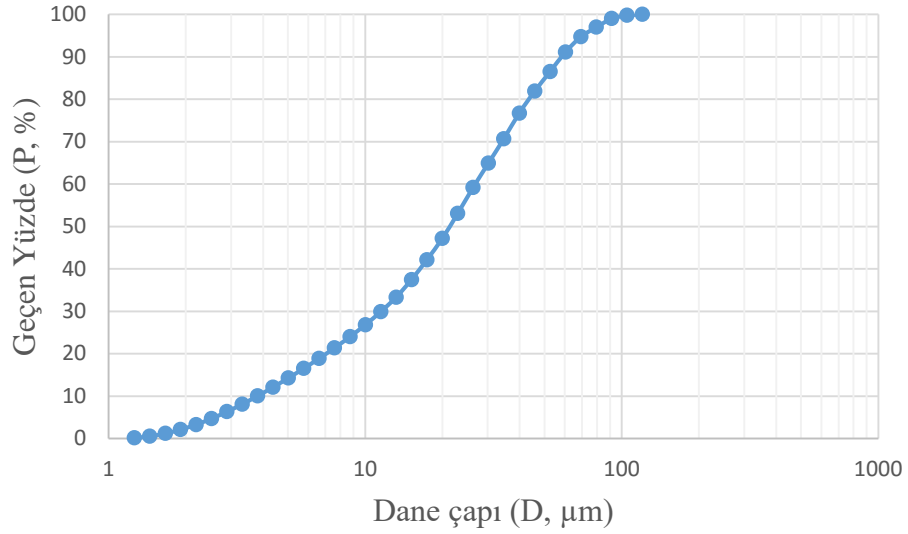
Özgül Ağırlık	2.71
Sertlik (Mohs)	2-3
Birim Hacim Ağırlık (kN/m ³)	1.84
Görünür Porozite (%)	24
Basınç Direnci (MPa)	27.7
Darbe Direnci (MPa)	0.4
Eğilme Direnci (MPa)	5.9
Ortalama Aşınma Direnci (cm ³ /50cm ²)	63.6
SiO ₂ Miktarı (%)	64.8
MgO Miktarı (%)	0.5
Fe ₂ O ₃ Miktarı (%)	2.45
CaO Miktarı (%)	7.30

Çalışmada kullanılan BST atıklarının toz haldeki parçalarına ait XRF analizleri ile fiziksel analizler Aşkale Çimento Sanayi Ticaret Anonim Şirketi Aşkale Çimento Fabrikası'nda yapılmıştır. Elde edilen veriler Tablo 2.8'de sunulmuştur.

Doktora çalışması kapsamında kullanılan öğütülmüş BST atıklarına ait kimyasal ve fiziksel özellikler elde edildikten sonra dane boyutu dağılımı analizine geçilmiştir. BST atıklarının dane boyutu dağılımı grafiği Şekil 2.18'de yer almaktadır.

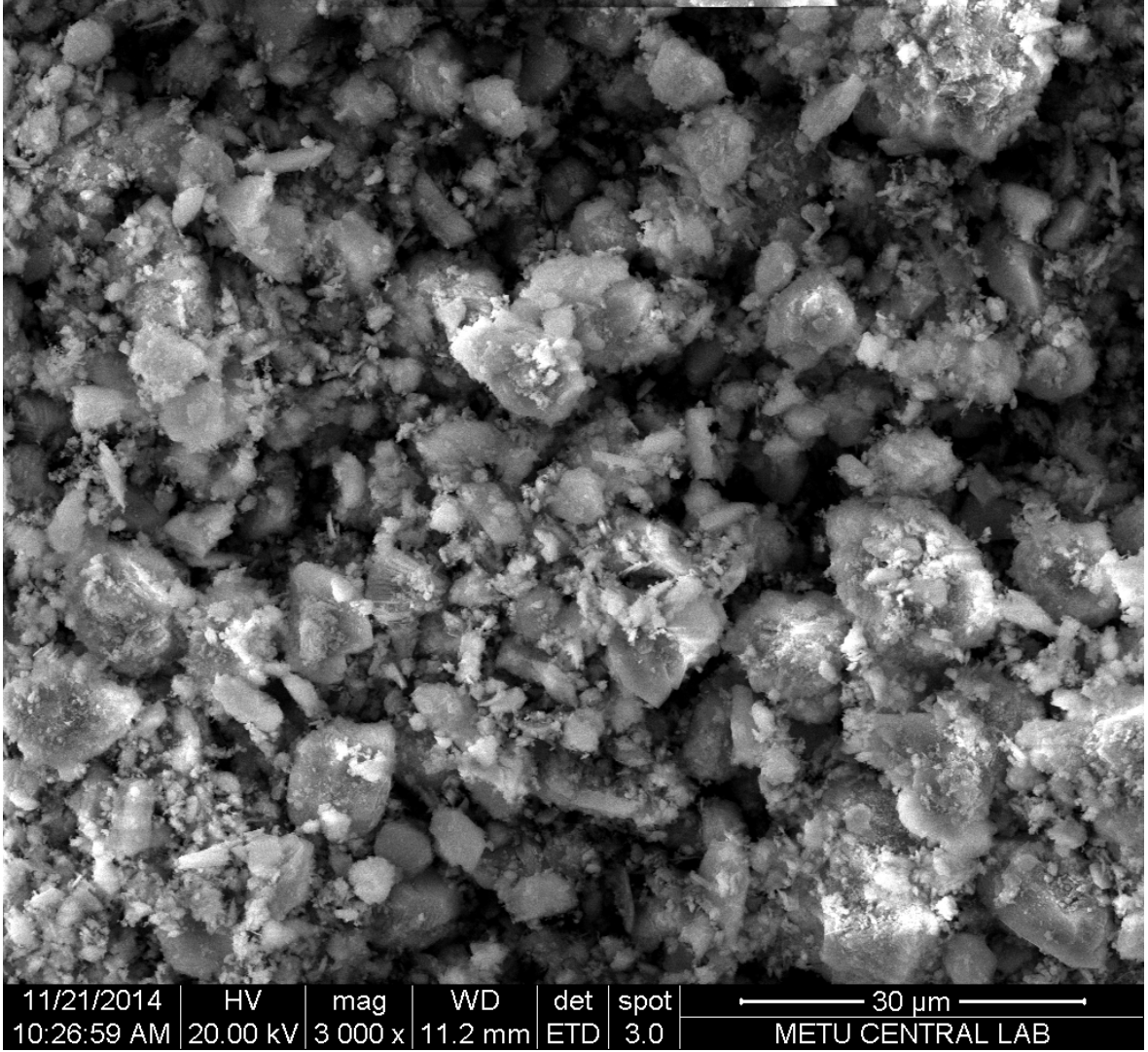
Tablo 2.8. BST kimyasal ve fiziksel özellikleri

KİMYASAL ANALİZLER	
Toplam SiO ₂ (%)	70,26
Al ₂ O ₃ (%)	16,91
Fe ₂ O ₃ (%)	2,97
CaO (%)	0,37
MgO (%)	0,81
SO ₃ (%)	0,05
K ₂ O (%)	3,29
Na ₂ O (%)	0,30
Kızdırma Kaybı (%)	4,25
Cl (%)	0,0280
FİZİKSEL ANALİZLER	
45 µ elek üzeri (%)	5,0
Özgül Ağırlık	2,50
Blaine (cm ² /g)	7364
Puzolanik Aktivite	1,4



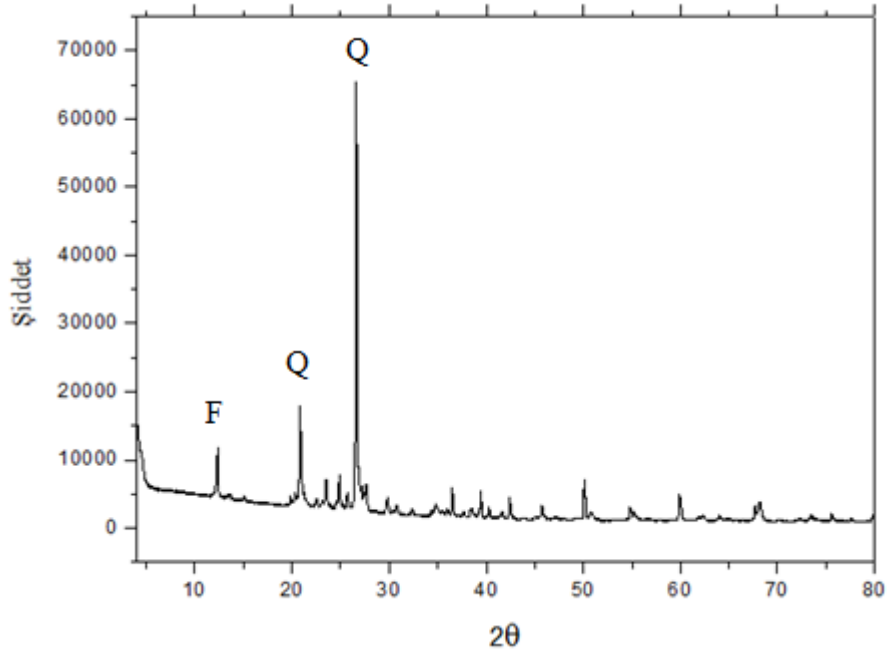
Şekil 2.18. Öğütülmüş BST atıklarının dane boyutu dağılımı

BYT ve BBT atıklarında olduğu gibi, BST atıklarının da SEM analizleri Orta Doğu Teknik Üniversitesi Merkez Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın üniformluk arz etmesi açısından aynı oranlarda büyütme yapılarak SEM analizi görüntüleri elde edilmiştir. BST atıklarına ait 3000 kat büyütülmüş SEM görüntüsü Şekil 2.19'da, tüm SEM analizi görüntüleri ise Ek-1'de sunulmuştur.



Şekil 2.19. BST atıklarının 3000 kat büyütülmüş SEM görüntüsü

Doktora çalışması kapsamında kullanılan BST atıklarına ait kimyasal ve fiziksel özellikler belirlenip, dane boyutu dağılım analizi ile SEM analizleri yapıldıktan sonra son olarak XRD analizleri Rize Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi Merkez Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiştir. XRD analizi sonucunda yapısında bol miktarda kuvars (Q) ve feldispat (F) minerallerine rastlanılmıştır. 200 nolu elekten öğütülmüş halde bulunan BST atıklarına ait XRD analizi sonuçları Şekil 2.20'de sunulmuştur.



Şekil 2.20. BST atıklarının XRD analizi

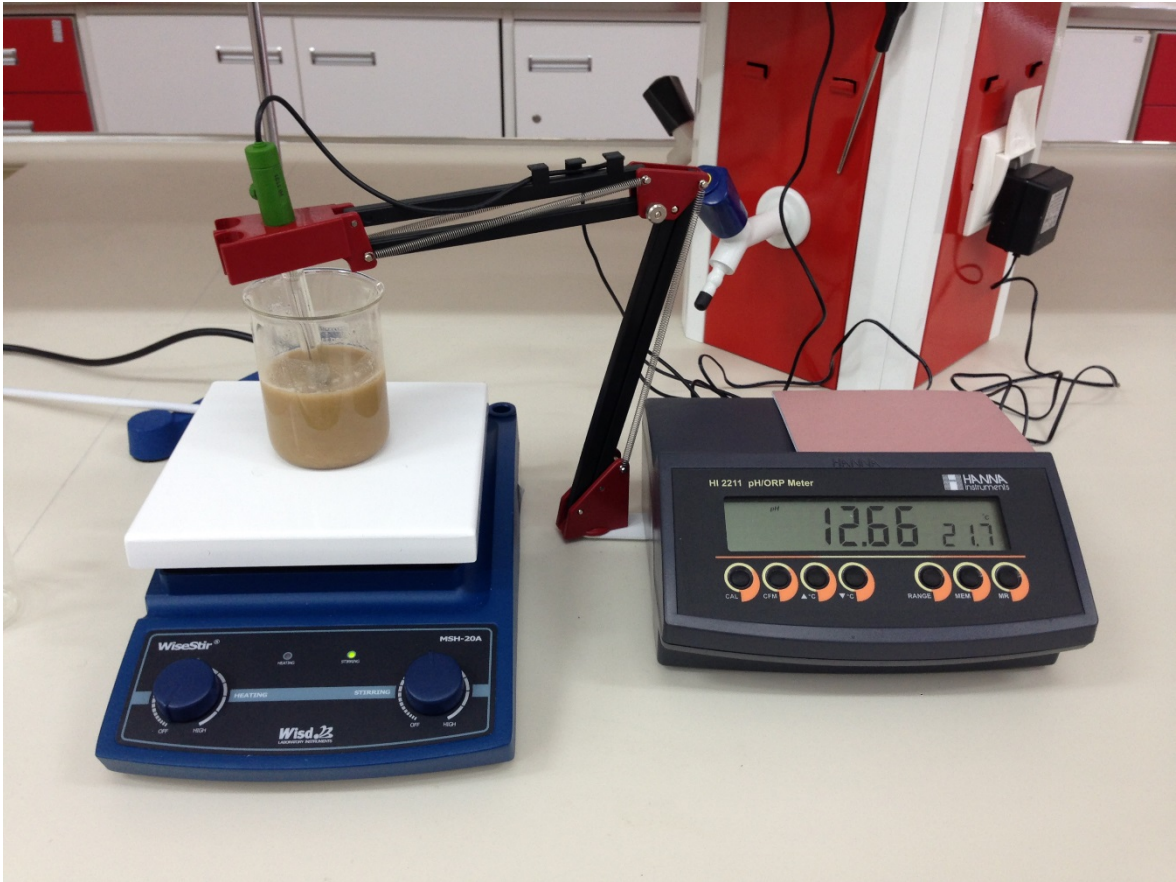
2.1.3. Kireç

Çalışma kapsamında kireçli numuneler için katkı maddesi olarak Karsan Kireç Sanayi Ticaret A.Ş. tarafından üretilen SKK80-Söndürülmüş Kalker Kireci kullanılmıştır. Kirece ait kimyasal ve fiziksel özellikler Tablo 2.9’da özetlenmiştir.

Tablo 2.9. Söndürülmüş kalker kireci kimyasal ve fiziksel özellikleri

KİMYASAL ANALİZLER	
SiO ₂ (%)	0.23
Al ₂ O ₃ (%)	0.11
Fe ₂ O ₃ (%)	0.40
Aktif CaO (%)	65.00
MgO (%)	1.40
Ca(OH) ₂ (%)	85.80
FİZİKSEL ANALİZLER	
75 µ elek üzeri (%)	3.8
Özgül Ağırlık	2.37
pH Değeri	12.4
Yoğunluk (Mg/m ³)	0.48

ZK, ZKB, ZKS ve ZKY numunelerinde kullanılacak olan kireç miktarının tespiti için, CH kiline ASTM D 6276 (2006) standardına uygun biçimde pH deneyi yapılmıştır. Karadeniz Teknik Üniversitesi Eczacılık Fakültesi Analitik Kimya Araştırma Laboratuvarı'nda 21,7 °C pH ölçüm sıcaklığında yapılan bu deneyde, doğal malzemeye %0 ila %10 arasında %1 oranda artan değerlerde kireç ilave edilerek karışımlara ait süspansiyonlar hazırlanmıştır. Deney HANNA 2211 pH/ORP Meter cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir ve deneye ait fotoğraf Şekil 2.21'de görülmektedir.



Şekil 2.21. Optimum kireç oranı tayininde kullanılan pH metre cihazı

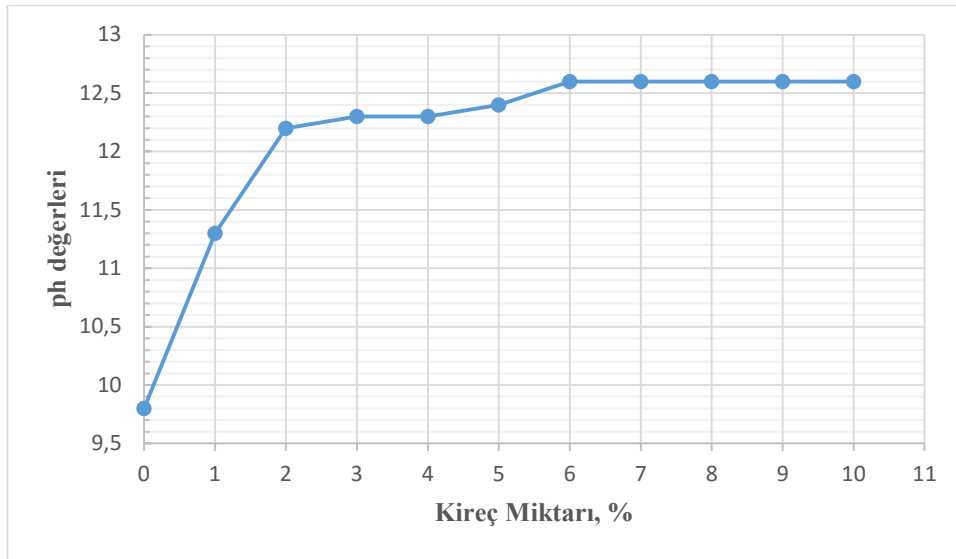
Optimum kireç oranı kriteri olarak, kireç ve su solüsyonunun pH değeri olan 12.4 alınmıştır. Doğal numune ve kireç karışımı solüsyonlarında bu değere karşılık gelen minimum kireç oranı değeri, zeminin optimum kireç oranı olarak tayin edilebilir. Fakat zeminin kirece doygunluğu üzerine yapılan çalışmalarda, zeminin doygunluk derecesine kadar eklenen kirecin topaklaşma ve kation değişimi için gerekli kireç muhtevasına karşılık geldiği saptanmıştır (Al-Rawas vd., 2002; Mathew ve Rao, 1997). Bunun yanı sıra,

özellikle zemin stabilizasyonu için gerekli olan taneler arası çimentolaşma reaksiyonları isteniyorsa, bu eşik değerin üzerinde bir kireç oranının tespitinin daha uygun olacağı belirtilmiştir.

Tablo 2.10. Kireç analizi sonuçları

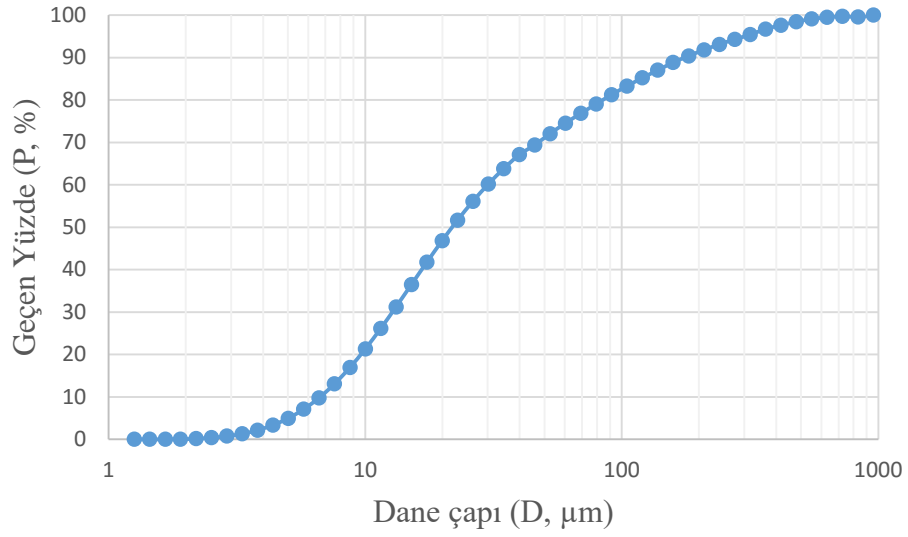
Kireç Oranı	%0	%1	%2	%3	%4	%5	%6	%7	%8	%9	%10
pH Değeri	9,8	11,3	12,2	12,3	12,3	12,4	12,6	12,6	12,6	12,6	12,6

Optimum kireç oranı tayininde, hazırlanan solüsyonlara ait pH verileri Tablo 2.10'da sunulmuştur. Bu veriler incelendiğinde %5 oranında kireçli solüsyonda, optimum kireç oranı kriterinin sağlandığı belirtilebilir. Fakat daha önce belirtilen literatür çalışmaları (Al-Rawas vd., 2002; Mathew ve Rao, 1997) dikkate alınarak, optimum kireç oranı değeri %6 olarak belirlenmiştir. Şekil 2.22'de optimum kireç oranı tespiti için yapılan analiz sonuçlarının grafiği sunulmaktadır.



Şekil 2.22. ASTM D 6276'ya göre optimum kireç oranının tayini

Doktora çalışması kapsamında kullanılan sönmüş kalker kirecinin ait kimyasal ve fiziksel özellikler ve pH deneyi sonrasında optimum kireç oranı tayin edildikten sonra dane boyutu dağılım analizine geçilmiştir. Kirece ait dane boyutu dağılım eğrisi Şekil 2.23'de sunulmuştur.



Şekil 2.23. Kirecin dane boyutu dağılımı

2.2. Deneylerde Referans Alınan ASTM Standartları

Doktora tez çalışması kapsamında yapılan tüm deneyler ilgili ASTM standartlarına uygun bir biçimde gerçekleştirilmiş olup, çalışma kapsamında yapılan deneylere ait standartlar Tablo 2.11’de sunulmuştur.

Tablo 2.11. Deneylerde referans alınan ASTM standartları

X-ışını difraksiyon spektroskopisi	ASTM D 934 (2003)
Özgül ağırlık deneyi	ASTM D 854 (2010)
Elek analizi - Hidrometre deneyi	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)
Serbest şişme yüzdesi deneyi	ASTM D 4546 (2008)
Şişme basıncı deneyi	ASTM D 4546 (2008)
Optimum kireç miktarının tespiti	ASTM D 6276 (2006)
Organik madde tayini	ASTM D 2974 (2007)
Donma çözülme deneyi	ASTM D 560 (1996)
X-ışını floresans spektroskopisi	ASTM D 5381 (2014)
Taramalı elektron mikroskobu	ASTM C 1723 (2010)

Özgül ağırlık, elek analizi, Atterberg limitleri, kompaksiyon ve serbest basınç deneyleri Bayburt Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Geoteknik Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiştir. Serbest şişme yüzdesi ve şişme basıncı deneyleri Karadeniz Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Geoteknik ve Ulaştırma Laboratuvarı'nda, optimum kireç oranı tespiti Karadeniz Teknik Üniversitesi Eczacılık Fakültesi Analitik Kimya Araştırma Laboratuvarı'nda, X-ışını difraksiyon analizleri ise Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiştir.

BT atıklarının SEM analizleri Orta Doğu Teknik Üniversitesi Merkez Laboratuvarı'nda, hazırlanan karışımların SEM analizleri Karadeniz Teknik Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Fakültesi Mikro Analiz Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiştir. BT atıklarının XRF analizleri Aşkale Çimento Sanayi Ticaret Anonim Şirketi Aşkale Çimento Fabrikası'nda yapılmıştır.

Bilgisayarlı tomografi görüntüleri Bayburt Devlet Hastanesi Radyoloji Bölümü Bilgisayarlı Tomografi Görüntüleme Merkezi'nde Toshiba marka Alexion model bilgisayarlı tomografi cihazından elde edilmiştir. Elde edilen görüntülerin analizinde, 3D Doctor programı kullanılmıştır.

Bu bölümde doktora çalışması kapsamında yapılan çalışmalar ile kullanılan malzemeler hakkında bilgiler sunulduktan sonra ilgili standartlara göre yapılan deneylerden elde edilen bulguların incelenmesi ve irdelenmesi aşamasına geçilmiştir.

3. ARAŞTIRMA BULGULARI VE İRDELEME

Bayburt ili Demirözü ilçesinden temin edilen doğal malzemenin BT atıkları ve kireçle stabilizasyonunu konu edinen çalışma kapsamında yapılan deneyleri beş ana aşamadan oluşacak şekilde değerlendirmek mümkündür. Bu aşamaların ayrıntılı açıklamaları aşağıda özetlendiği gibidir.

Çalışmanın ilk aşamasında doğal malzeme ve BT atıkları temin edilmiş ve doğal malzemenin indeks özellikleri belirlenmiştir. Zeminin elek analizinin yanı sıra zeminin likit ve plastik limit değerleri ile optimum kireç oranı tayin edilmiş ve tüm BT atıklarına ait SEM, XRD ve XRF analizleri yapılmıştır.

İkinci aşamada atık BBT'nin zemin stabilizasyonundaki davranışları belirlenmiştir. Bu bağlamda, atık BBT'nin 75 mikron altı öğütülme işlemi tamamlandıktan sonra standart proktor deneylerine geçilmiş ve atık BBT ilk aşamada elde edilen optimum kireç oranında doğal zeminle karıştırılıp, optimum su muhtevası ve maksimum kuru yoğunlukta standart proktor numuneleri hazırlanmıştır. Aynı işlem atık BBT'nin doğal zeminle doğrudan karıştırılması ile tekrarlanmıştır. Karışıma esas olan atık BBT yüzdeleri %0, %5, %10, %15 ve %20 olacak şekilde kireçli ve kireçsiz numunelerden 6'şar adet hazırlanmıştır. Numunelere 28 gün desikatörde bekletilerek kür uygulanmıştır. Kür süresi sonucunda farklı yüzdelerdeki kireçli ve kireçsiz numunelerden üçer adeti ile tek eksenli serbest basınç deneyi yapılmıştır. Geriye kalan üçerli gruplar halindeki numuneler ise, donma çözülme etkisine maruz bırakılmış ve çevrim tamamlandıktan sonra tekrar serbest basınç dayanımları belirlenmiştir. Böylece doğal ve katkılı numunelerin serbest basınç dayanımları ve donma çözülmenin bu dayanımlara etkisi belirlenmiştir. Bu aşamada ayrıca şişme yüzdelerinin belirlenmesi amacıyla her bir farklı oranda üçer adet numune hazırlanıp, 14 gün kür süresinin ardından şişme yüzdesi ve şişme basıncı deneyi yapıp sonuçlar irdelenmiştir.

Çalışmanın üçüncü aşamasında atık BYT'nin zemin stabilizasyonundaki davranışları belirlenmiştir. Atık BBT için ikinci aşamada yapılan tüm deneysel çalışmalar bu aşamada atık BYT için uygulanmıştır.

Dördüncü aşamada atık BST'nin zemin stabilizasyonundaki davranışları belirlenmiştir. İkinci ve üçüncü aşamalarda farklı özellikteki BT atıkları için uygulanan işlemler bu aşamada atık BST için yapılmıştır.

Çalışmanın son aşamasında tüm zemin numunelerinin serbest basınç dayanımı ve şişme davranışları açısından değerlendirilmesi yapılmıştır. Donma çözülmenin numuneler üzerindeki etkileri belirlenmiştir. Tüm numunelere bilgisayarlı tomografi analizi yapılmıştır ve bilgisayarlı tomografi değerleri (HU) belirlenmiştir. Ardından en iyi dayanım sonuçlarının elde edildiği zemin numuneleri için SEM analizi yapılmıştır.

Yukarıda deney aşamaları belirtilen çalışmadan elde edilen bulgular ve bulguların irdelenmesi bu bölümde detaylı bir biçimde anlatılmaktadır.

3.1. Deneylerden Elde Edilen Veriler

Zeminin indeks özelliklerinin belirlenmesi, serbest basınç dayanımı değerlerinin elde edilmesi ve şişme davranışı hakkında bilgilerin oluşması zeminin mühendislik özelliklerinin belirlenmesinde geçmişten günümüze yıllardır uygulanan yöntemlerdir. Mühendislik özelliklerinin zayıf olduğu saptanan zeminlerde önerilen çalışmalardan biri ise zeminin iyileştirmeye tabi tutulmasıdır. İyileştirme yöntemlerinden biri olan katkılı stabilizasyon kapsamında yapılan bu deneysel çalışmada öncelikli olarak zeminin likit ve plastik limit değerleri tayin edilmiştir.

3.1.1. Kıvam Limitleri

Zeminin likit ve plastik limit değerleri üzerine yapılan ilk çalışma 1911 yılında İsveç'li kimyager Albert Atterberg tarafından gerçekleştirilmiştir (Holtz ve Kovacs, 1981). Atterberg, likit limiti viskoz akmanın alt sınırı olarak açıklarken kilin plastisite özelliğini yitirdiği limit için ise plastik limit tanımlamasını yapmıştır (Atterberg, 1911). Casagrande'nin zeminlerin kıvam limitlerini araştırdığı deneysel çalışma ve kullandığı deney aletleri günümüzde likit limit değerlerinin belirlenmesi amacıyla geçerliliğini sürdürmekte ve kullanılmaya devam etmektedir (Casagrande, 1932).

Çalışma kapsamında notasyonları belirlenen karışımlara ait, ASTM D 4318 standardına göre 1 günlük kür süresinin ardından yapılan likit limit ve plastik limit deneylerinden elde edilen sonuçlar ile plastisite indisi değerleri Tablo 3.1'de sunulmuştur.

Tablo 3.1. Deney numunelerinin kıvam limitleri

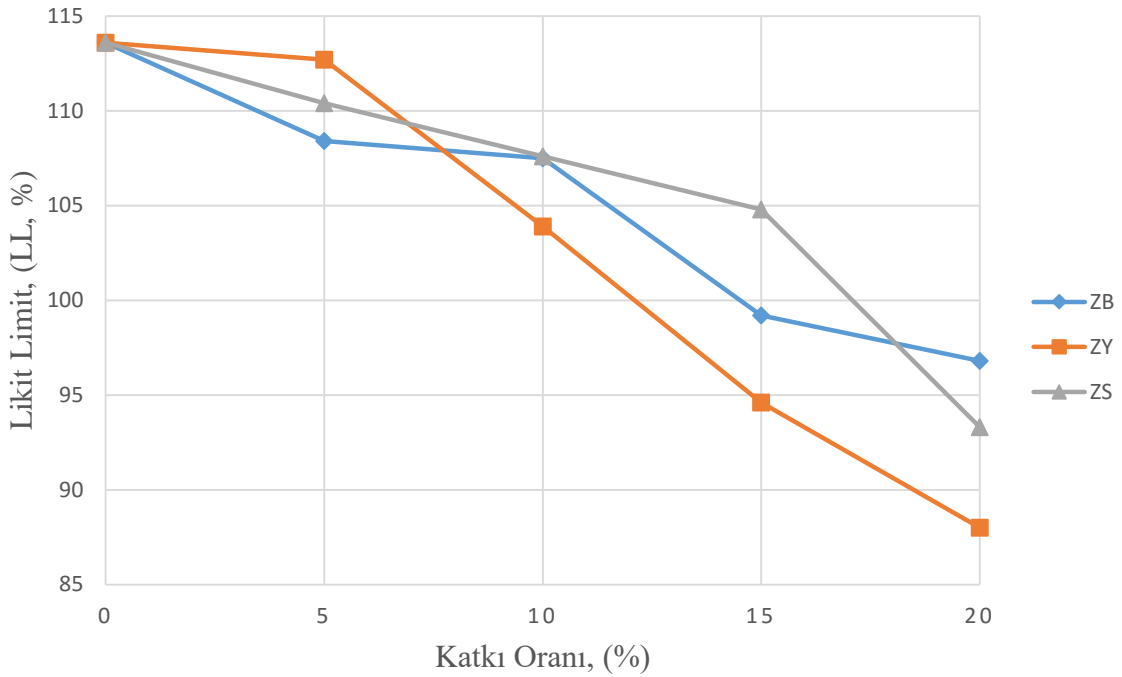
Deney Numuneleri	Likit Limit (%)	Plastik Limit (%)	Plastisite İndisi (%)
Z	113.6	28.7	84.9
ZB5	108.4	26.9	81.5
ZB10	107.5	26.4	81.1
ZB15	99.2	26.0	73.2
ZB20	96.8	25.6	71.2
ZY5	112.7	25.3	87.4
ZY10	103.9	24.8	79.1
ZY15	94.6	24.5	70.1
ZY20	88.0	23.9	64.1
ZS5	110.4	26.3	84.1
ZS10	107.6	25.4	82.2
ZS15	104.8	24.8	80.0
ZS20	93.3	24.1	69.2
ZK	78.6	42.1	36.5
ZKB5	77.3	40.9	36.4
ZKB10	78.1	41.3	36.8
ZKB15	76.4	39.6	36.8
ZKB20	75.2	39.3	35.9
ZKY5	77.6	40.7	36.9
ZKY10	73.8	38.5	35.3
ZKY15	72.4	38.2	34.2
ZKY20	70.6	37.5	33.1
ZKS5	78.4	41.1	36.5
ZKS10	76.9	41.0	35.9
ZKS15	75.3	40.1	35.2
ZKS20	72.9	39.4	33.5

Likit limit ve plastik limit sonuçları incelendiğinde, CH kilinin likit limit değerinin çok yüksek olduğu ve BT atıkları ilavesiyle bu değerlerde düşüşlerin meydana geldiği görülmektedir. %20 oranında BYT atığının zeminle karıştırılması kireçsiz numuneler içerisinde en düşük likit limit değerini vermiştir. Doğal numuneye %6 oranında kireç ilavesiyle birlikte likit limit değerinde ciddi bir düşüş olduğu tespit edilmiştir. Kireçli numunelere BT atığının eklenmesiyle likit limit değerlerindeki bu düşüşler çok az miktarda meydana gelmiştir. Buna göre, CH kiline doğrudan BT atığının eklenmesiyle likit limit

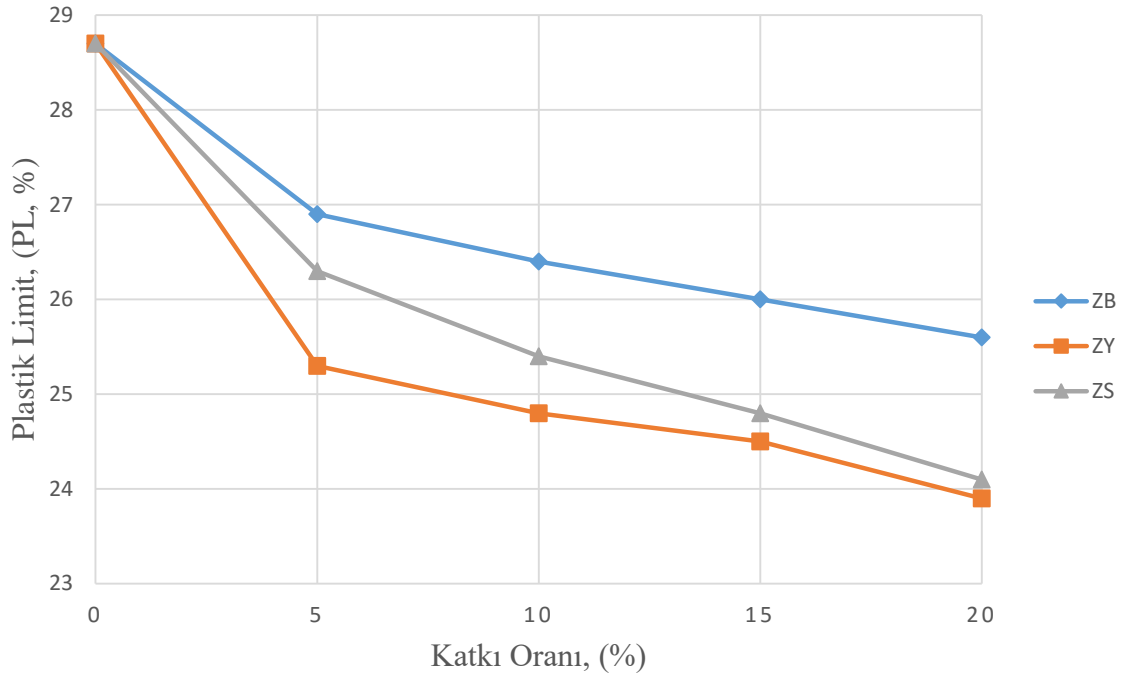
değerlerinde yüksek miktarda düşüşlerin meydana geldiği, kireçli numunelerde ise BT atıklarının ilavesiyle bu düşüşlerin düşük mertebelerde kaldığı ifade edilebilir.

Doğal zemine doğrudan BT atıklarının katılması plastik limit değerlerinde anlamlı değişiklikler meydana getirmezken, kireç ilavesiyle plastik limit değerlerinde artış meydana gelmiştir. Kireçli numunelere BT atıklarının eklenmesiyle, plastik limit değerlerinde az da olsa azalma yönünde bir eğilim olduğu Tablo 3.1'den elde edilen diğer bir veridir. ZB, ZY ve ZS numunelerine ait likit limit değerlerindeki değişimler Şekil 3.1'de sunulmuştur. Bu karışımlara ait plastik limit değerlerinin grafiği Şekil 3.2 vasıtasıyla açıklanırken, plastisite indisi değerlerindeki değişim Şekil 3.3'de gösterilmiştir.

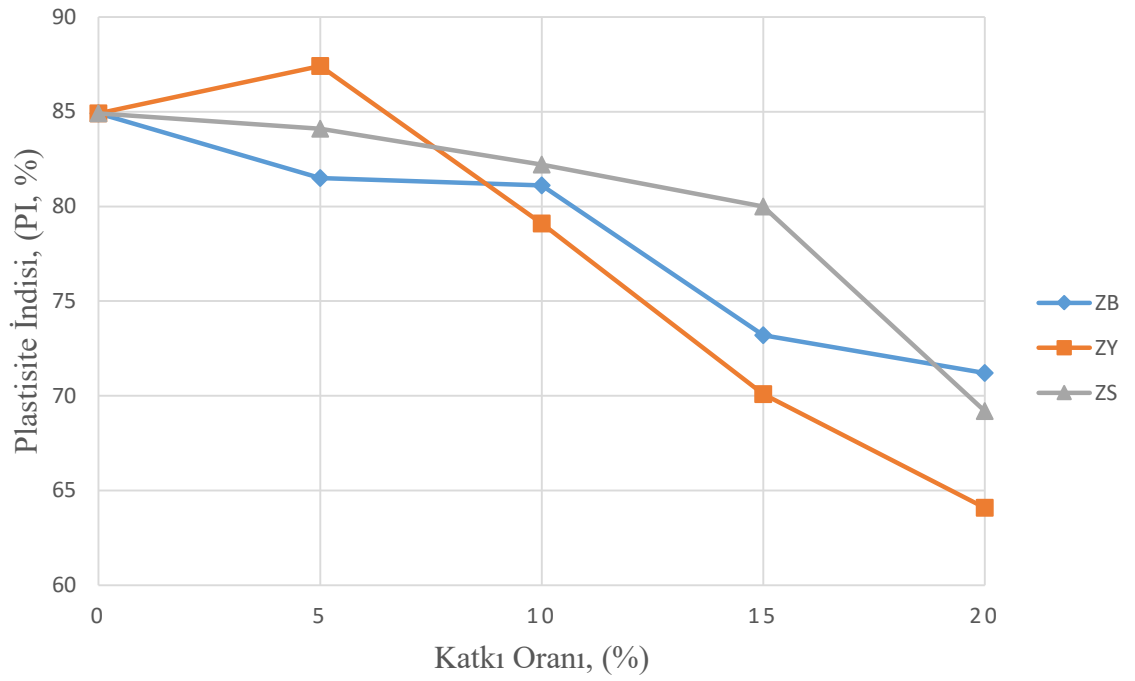
İçeriğinde %6 oranında kireç ihtiva eden ZKB, ZKY ve ZKS karışımlarına ait likit limit, plastik limit ve plastisite indisi değerlerindeki değişimler sırasıyla Şekil 3.4, Şekil 3.5 ve Şekil 3.6'da gösterilmiştir.



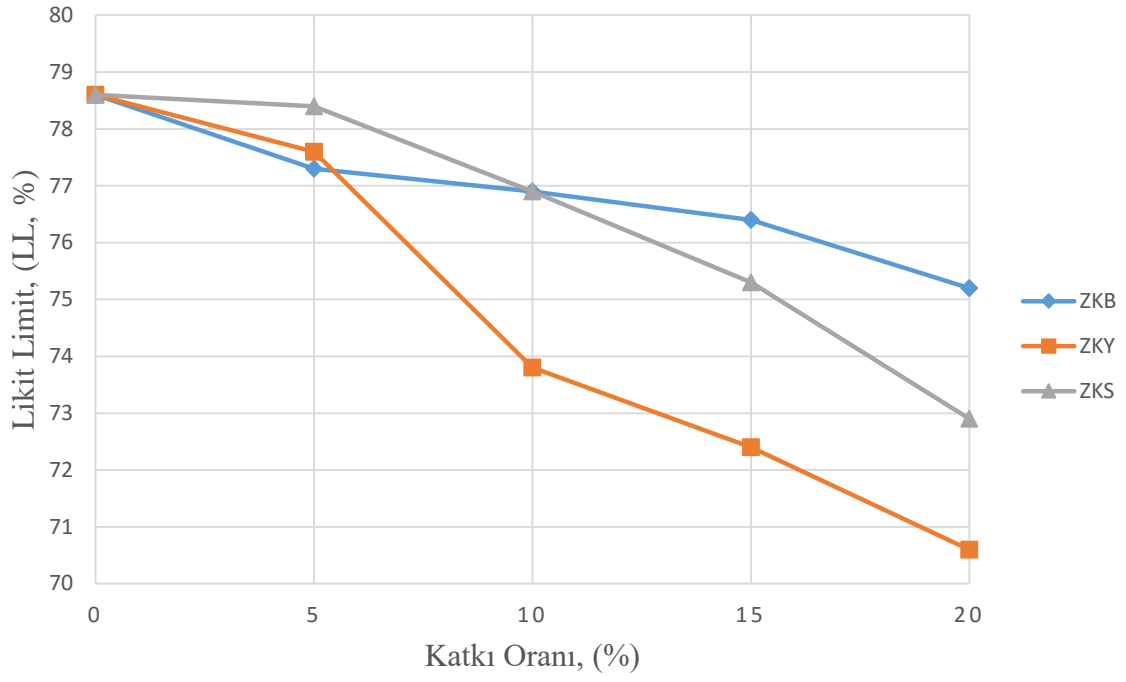
Şekil 3.1. ZB, ZY, ZS karışımlarının likit limitleri



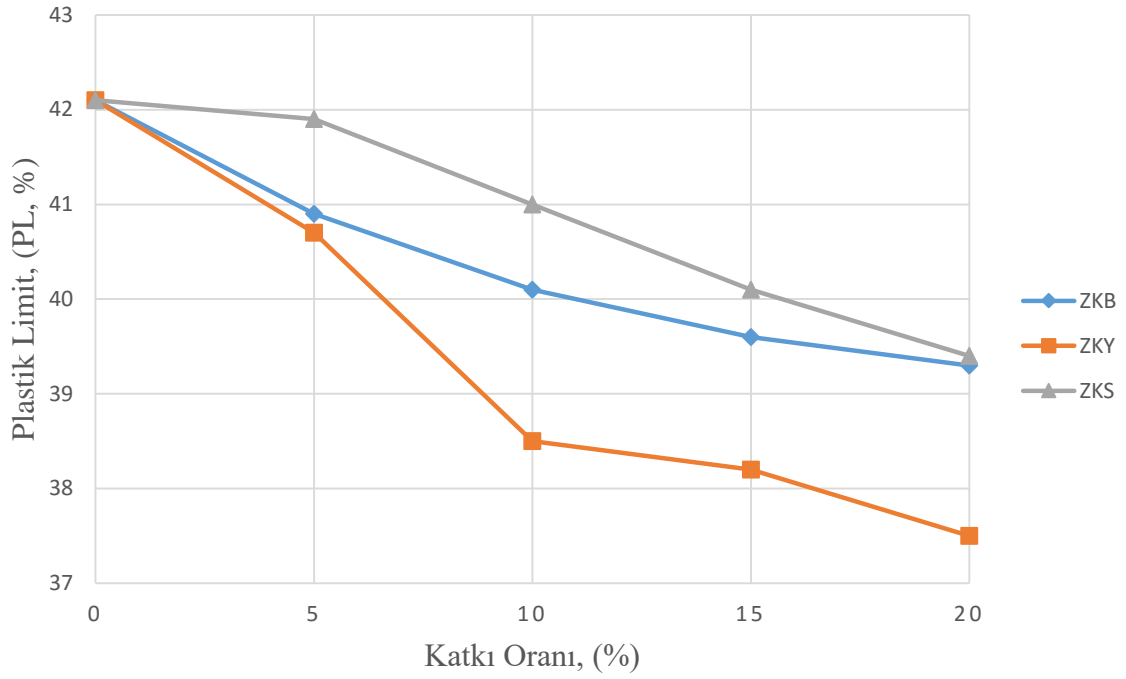
Şekil 3.2. ZB, ZY, ZS karışımlarının plastik limitleri



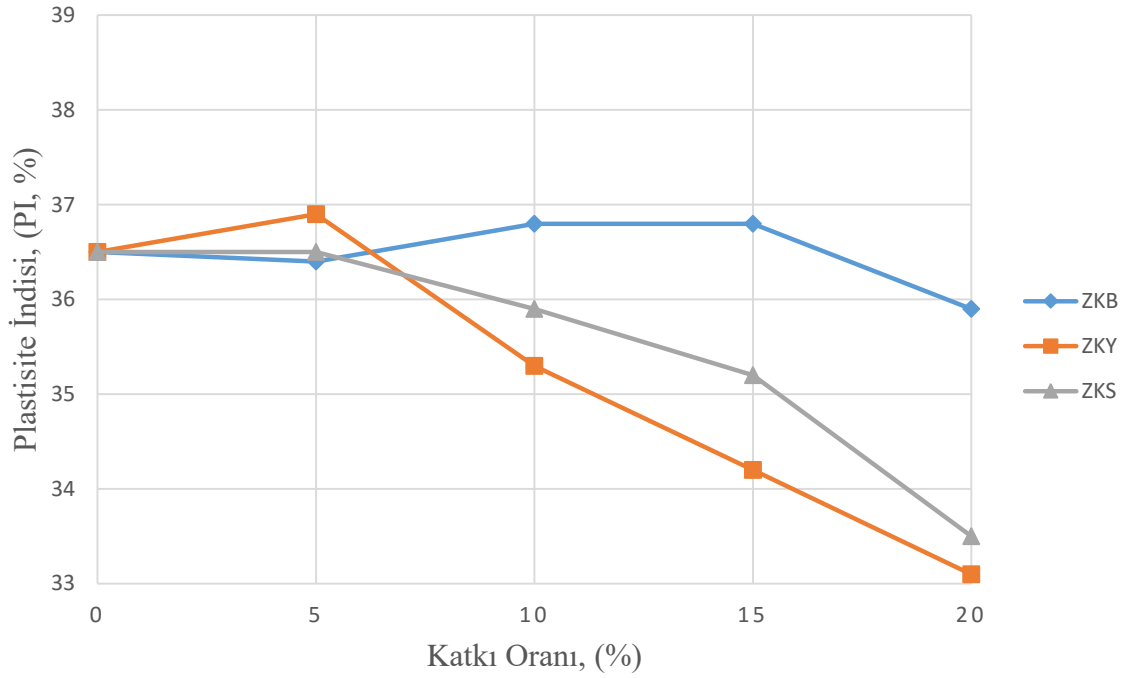
Şekil 3.3. ZB, ZY, ZS karışımlarının plastisite indisleri



Şekil 3.4. ZKB, ZKY, ZKS karışımlarının likit limitleri



Şekil 3.5. ZKB, ZKY, ZKS karışımlarının plastik limitleri



Şekil 3.6. ZKB, ZKY, ZKS karışımlarının plastisite indisleri

3.1.2. Kompaksiyon Parametreleri

Zemindeki suyun çıkması ile elde edilen sıkışmaya konsolidasyon, havanın çıkması ile elde edilen sıkışmaya kompaksiyon denilmektedir. Kompaksiyonun amacı minimum hava boşluğunda maksimum yoğunluğun elde edilmesidir. Zemin ıslahı yöntemleri arasında en ucuz ve en etkin yöntem kompaksiyon çalışmalarıdır (Tunç, 2002).

Doktora tezi çalışması kapsamında hazırlanan ve notasyonları belirlenen toplam numune çeşidi sayısı 26'dır. Kompaksiyon parametreleri olan optimum su muhtevası ve maksimum kuru birim hacim ağırlık değerlerini elde etmek için katkılı-katkısız her bir zemin türlerinin her birinden 6 adet olmak üzere toplamda 156 adet kompaksiyon yapılmıştır. BT oranı %0, %5, %10, %15 ve %20 olan kireçli ve kireçsiz karışımların maksimum kuru yoğunlukları ve optimum su içerikleri ASTM D 698 standardına göre elde edilmiştir.

Kompaksiyon deneyleri sonucu elde edilen kompaksiyon eğrisi grafikleri Ek 2'de sunulmuştur. Şekil 3.7'de kompaksiyon kabında sıkıştırılan zemin numunesi örneği görülmektedir. Şekilde ayrıca kaptan çıkarılan ve yaş ağırlıkları alınan numune örnekleri yer almaktadır.



Şekil 3.7. Sıkıştırılmış zemin ve örnek alımı

Kompaksiyon deneylerine öncelikle kireç katkısız ZB, ZY ve ZS karışımları ile başlanmıştır. BT oranı %0, %5, %10, %15 ve %20 olan ZY karışımlarına ait optimum su içerikleri ve maksimum kuru yoğunluk değerleri Tablo 3.2’de, ZB karışımlarına ait optimum su içerikleri ve maksimum kuru yoğunluk değerleri Tablo 3.3’de, ZS karışımlarına ait optimum su içerikleri ve maksimum kuru yoğunluk değerleri Tablo 3.4’te sunulmuştur.

Tablo 3.2. ZY karışımlarının kompaksiyon parametreleri

Numune	Maksimum Kuru Yoğunluk, Mg/m ³	Optimum Su İçeriği, %
Z	1.446	24.2
ZY5	1.472	24
ZY10	1.481	23.9
ZY15	1.497	23.7
ZY20	1.503	23.5

Tablo 3.3. ZB karışımlarının kompaksiyon parametreleri

Numune	Maksimum Kuru Yoğunluk, Mg/m ³	Optimum Su İçeriği, %
Z	1.446	24.2
ZB5	1.469	24.1
ZB10	1.493	23.9
ZB15	1.501	22.4
ZB20	1.526	21.2

Tablo 3.4. ZS karışımlarının kompaksiyon parametreleri

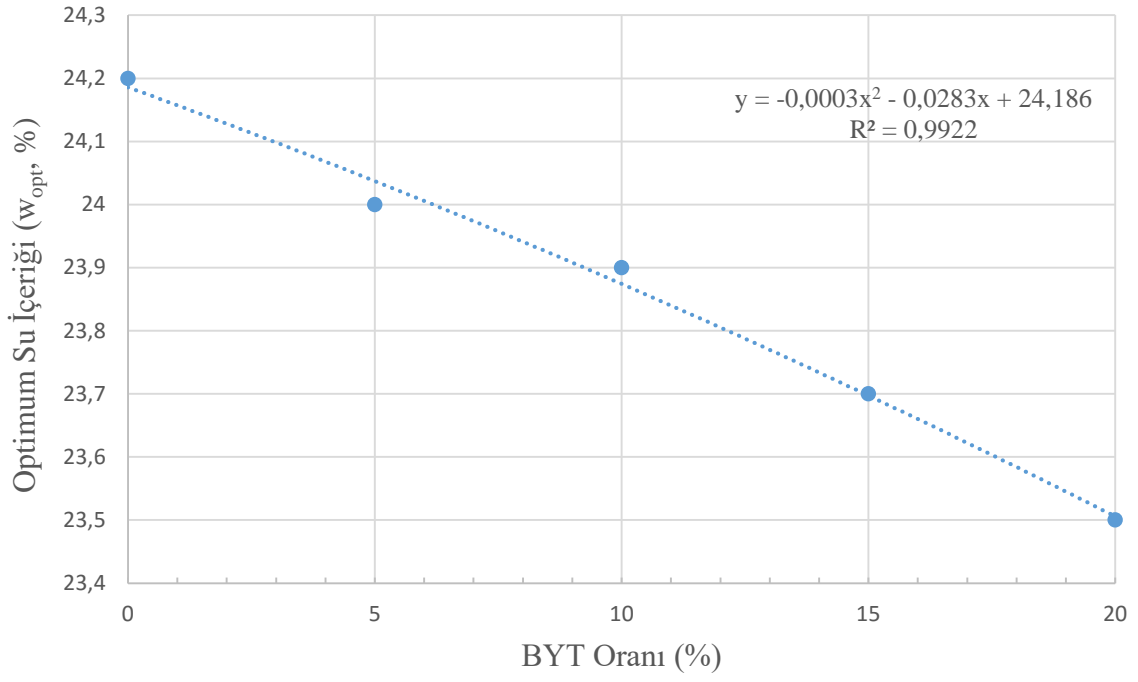
Numune	Maksimum Kuru Yoğunluk, Mg/m ³	Optimum Su İçeriği, %
Z	1.446	24.2
ZS5	1.462	23.9
ZS10	1.479	23.7
ZS15	1.483	22.2
ZS20	1.492	21.6

Tablo 3.2, 3.3 ve 3.4'deki veriler ışığında, optimum su içeriği değerlerinin BT katkılarının eklenmesiyle beraber azalış eğilimi gösterdikleri ortaya çıkmıştır. Maksimum kuru yoğunluk değerlerinde ise BT ilavesiyle artış eğilimi gözlemlenmiştir. Karışıma katılan BT oranları arttıkça optimum su içeriği değerlerindeki azalmalar devam etmiş, maksimum kuru yoğunluk değerleri ise artış eğilimini sürdürmüşlerdir. Optimum su içeriği değerlerindeki en büyük düşüş ZB20 numunelerinde meydana gelirken, bu numuneler maksimum kuru yoğunluk değerlerindeki en büyük artışı göstermişlerdir.

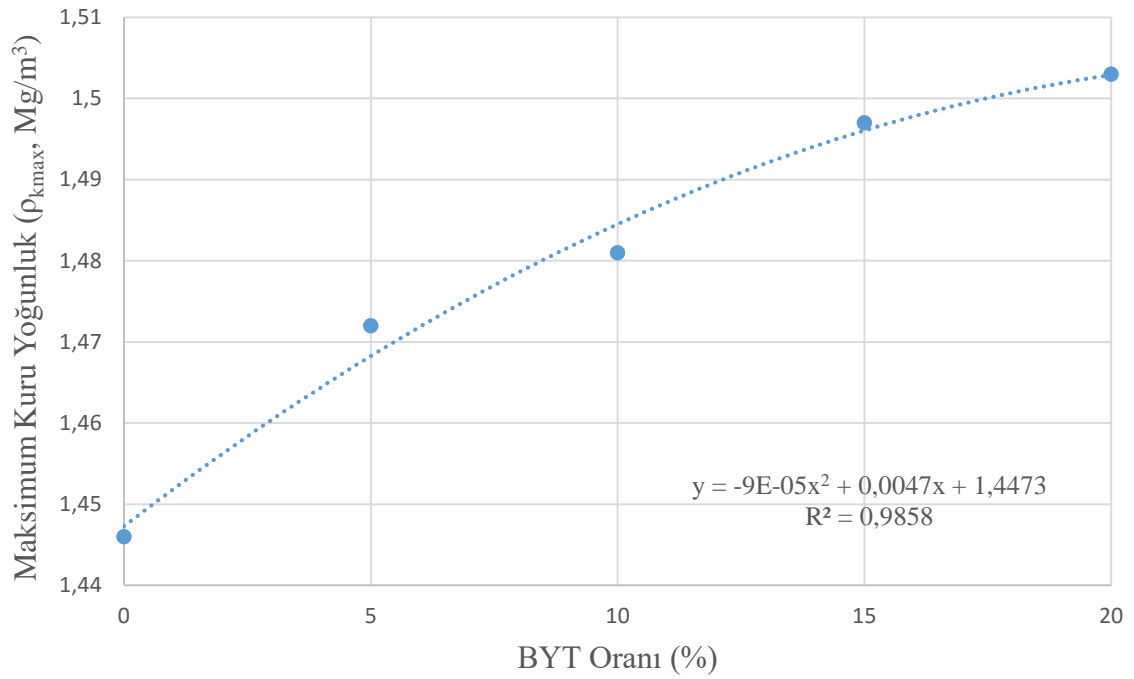
Genel olarak tüm numunelerin maksimum kuru yoğunluk değerleri 1.446-1.526 Mg/m³ arasında değişim göstermiştir. Optimum su içeriği değerlerine bakıldığında ise %24.2 ila %21.2 arasındaki değişimlerin olduğu tespit edilmiştir.

Doğal zemine kireç kullanılmaksızın belirlenen oranlarda BYT, BBT ve BST katarak incelenen optimum su içeriği ve maksimum kuru yoğunluk değerleri her üç taş atıkları için yaklaşık sonuçlar vermiştir. Buradan, kompaksiyon parametrelerindeki değişim açısından bu üç farklı taş çeşidinin birbirine benzer davranışlar sergilediklerini söylemek mümkündür.

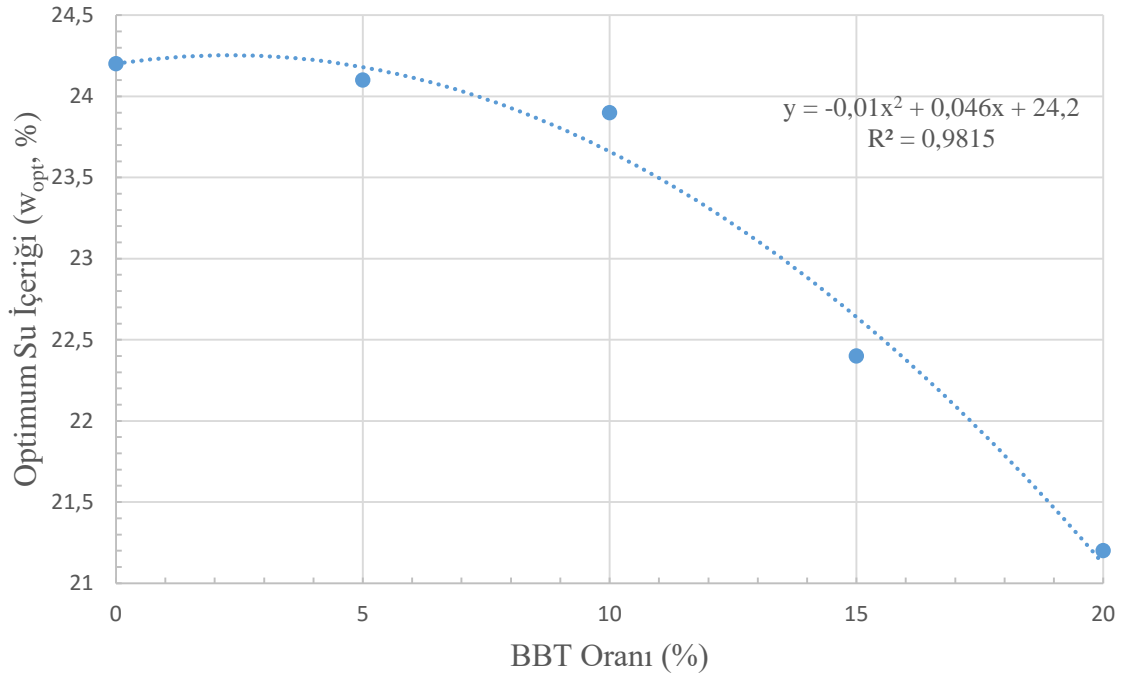
ZY karışımlarına ait optimum su içerikleri ve maksimum kuru yoğunluk değerlerindeki değişim grafikleri sırasıyla Şekil 3.8 ve Şekil 3.9'da, ZB karışımlarına ait optimum su içerikleri ve maksimum kuru yoğunluk değerlerindeki değişim grafikleri sırasıyla Şekil 3.10 ve Şekil 3.11'de, ZS karışımlarına ait optimum su içerikleri ve maksimum kuru yoğunluk değerlerindeki değişim grafikleri sırasıyla Şekil 3.12 ve Şekil 3.13'de sunulmuştur.



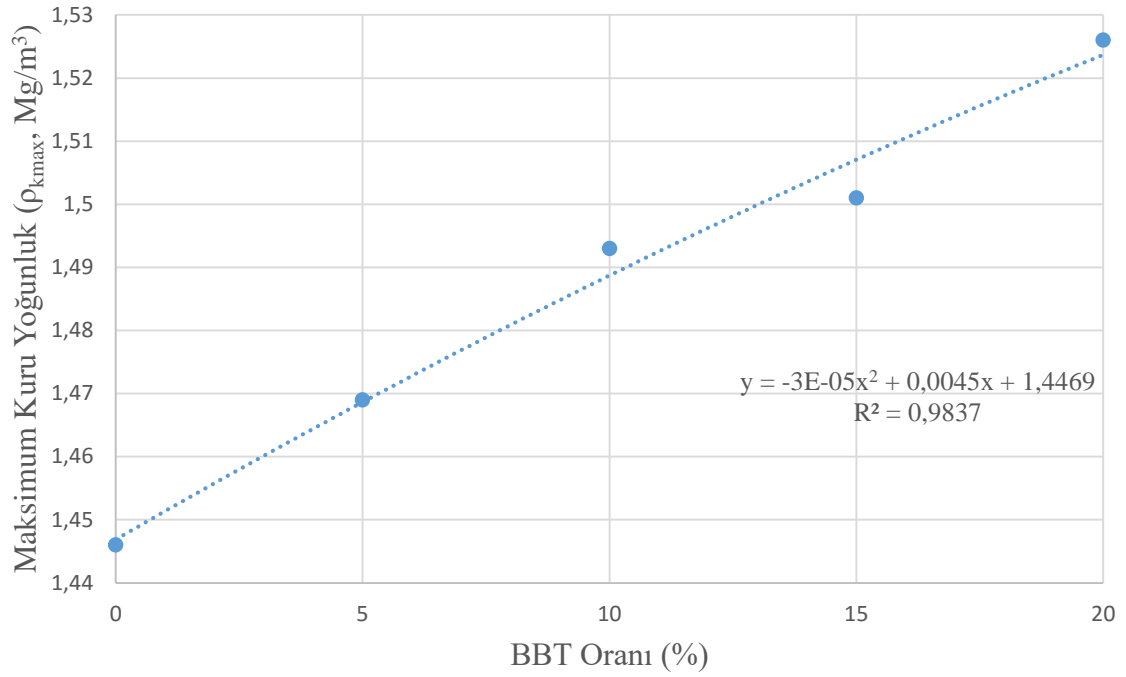
Şekil 3.8. ZY karışımlarının optimum su içerikleri



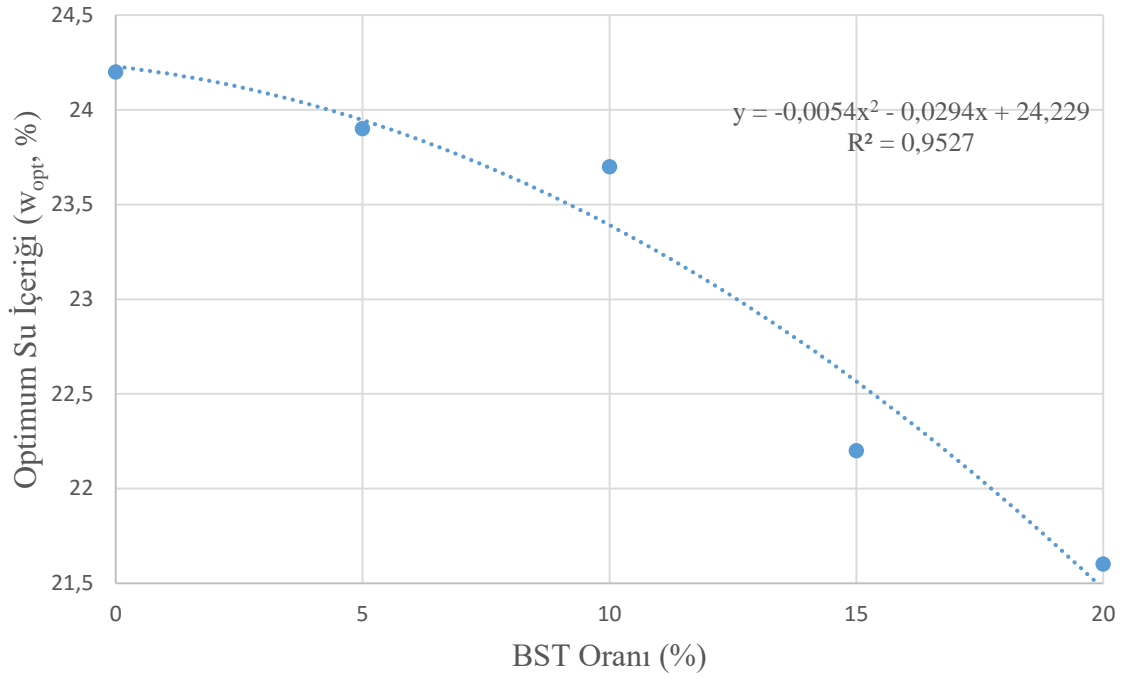
Şekil 3.9. ZY karışımlarının maksimum kuru yoğunlukları



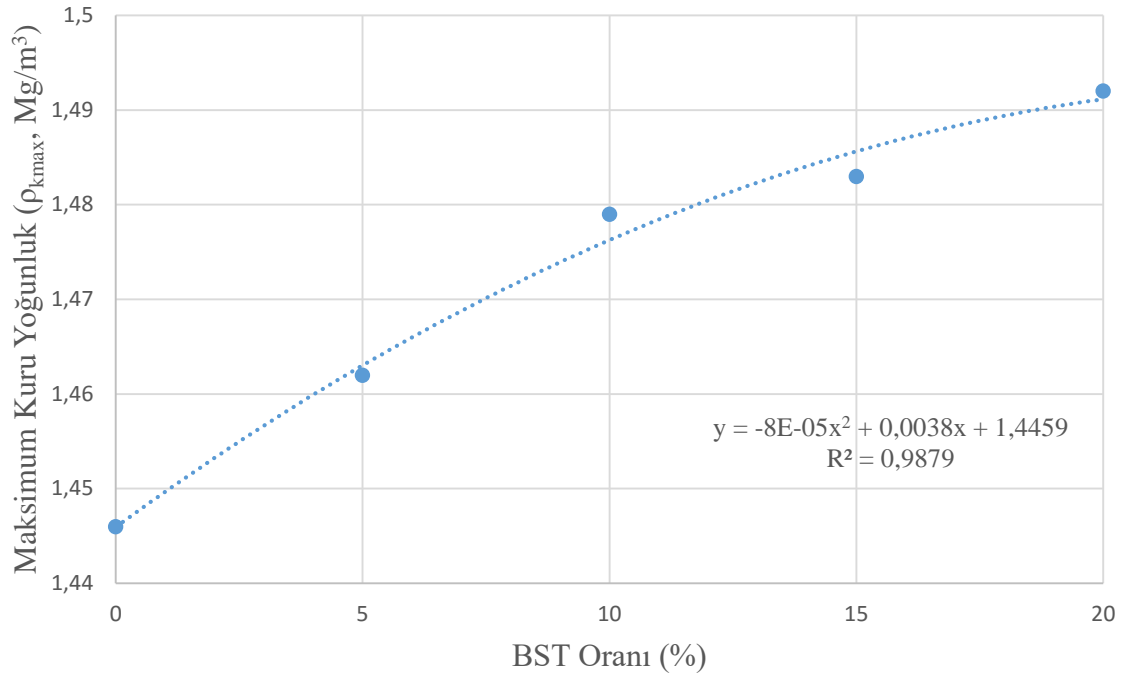
Şekil 3.10. ZB karışımlarının optimum su içerikleri



Şekil 3.11. ZB karışımlarının maksimum kuru yoğunlukları



Şekil 3.12. ZS karışımlarının optimum su içerikleri



Şekil 3.13. ZS karışımlarının maksimum kuru yoğunlukları

Kireçsiz numunelere ait kompaksiyon deneyleri tamamlandıktan ve sonuçlarla ilgili gerekli irdelemeler yapıldıktan sonra içeriğinde %6 oranında kireç ihtiva eden ZKY, ZKB ve ZKS karışımlarının kompaksiyon deneylerine geçilmiştir.

ZKY karışımlarına ait optimum su içerikleri ve maksimum kuru yoğunluk değerleri Tablo 3.5'te, ZKB karışımlarına ait optimum su içerikleri ve maksimum kuru yoğunluk değerleri Tablo 3.6'da, ZKS karışımlarına ait optimum su içerikleri ve maksimum kuru yoğunluk değerleri Tablo 3.7'de sunulmuştur.

Tablo 3.5. ZKY karışımlarının kompaksiyon parametreleri

Numune	Maksimum kuru yoğunluk, Mg/m ³	Optimum su içeriği, %
Z	1.446	24.2
ZK	1.417	27.8
ZKY5	1.441	25.1
ZKY10	1.446	24.9
ZKY15	1.459	24.1
ZKY20	1.467	23.9

Tablo 3.6. ZKB karışımlarının kompaksiyon parametreleri

Numune	Maksimum kuru yoğunluk, Mg/m ³	Optimum su içeriği, %
Z	1.446	24.2
ZK	1.417	27.8
ZKB5	1.447	25.6
ZKB10	1.461	24
ZKB15	1.479	23.8
ZKB20	1.502	23.1

Tablo 3.7. ZKS karışımlarının kompaksiyon parametreleri

Numune	Maksimum kuru yoğunluk, Mg/m ³	Optimum su içeriği, %
Z	1.446	24.2
ZK	1.417	27.8
ZKS5	1.437	24.7
ZKS10	1.449	23.8
ZKS15	1.452	22
ZKS20	1.463	21.7

Sadece kireç ihtiva eden ZK numuneleri ile yapılan kompaksiyon deneyinin ardından elde edilen veriler; optimum su içeriği değerinin kireçli numunede doğal zemine göre arttığını, maksimum kuru yoğunluk değerinin ise azaldığını göstermektedir. Yani doğal zemine optimum kireç oranında (%6) kireç katılmasıyla maksimum kuru yoğunluk değerleri azalmış, optimum su içeriği ise artmıştır.

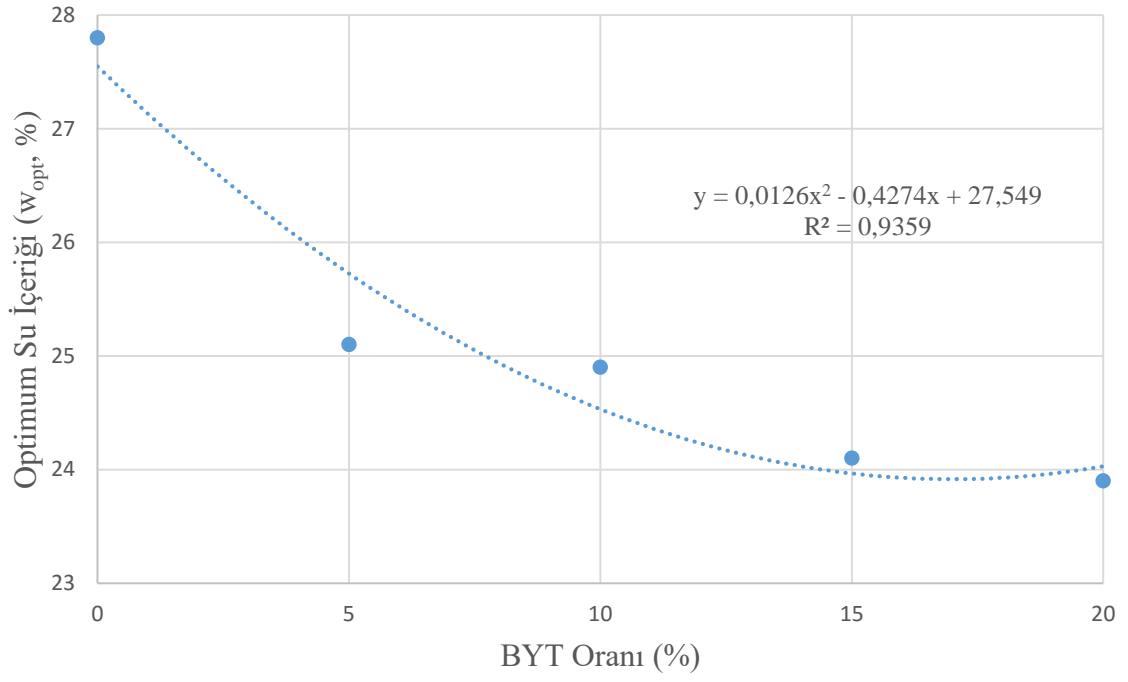
Katkı maddelerinin özgül ağırlığı genelde zeminin özgül ağırlığından düşük olduğu için maksimum kuru yoğunluk değerleri azalır (Ola, 1978; Lees vd., 1982; Rahman, 1986). Çalışma kapsamında kullanılan kireç katkısının özgül ağırlığının CH kiline göre daha küçük olması nedeniyle maksimum kuru yoğunluk değerlerinde azalmalar meydana gelmiştir. Zemin ile katkı maddeleri arasındaki puzolanik reaksiyonlar için fazladan su ihtiyacı oluşur (Manasseh ve Olufemi, 2008). Bu nedenle kireç katkılı karışımlarda optimum su içeriği değerleri artmıştır.

Optimum oranda kireç ile %5, %10, %15 ve %20 oranında BYT, BBT ve BST'nin doğal zemin ile karıştırılması sonucu elde edilen numunelerde maksimum kuru yoğunluk değerlerinde artan BT oranlarında artışlar, optimum su içeriği değerlerinde ise azalışlar meydana gelmiştir. Buna göre; doğal zemine kireç ilavesiyle optimum su içerikleri artmış BT atıkları ilavesiyle bu değerlerde azalmalar meydana gelmiştir. Maksimum kuru yoğunluk değerleri ise kireç ve BT atıkları ilavesi ile sırasıyla önce azalma eğilim göstermiş sonra artışa geçmiştir.

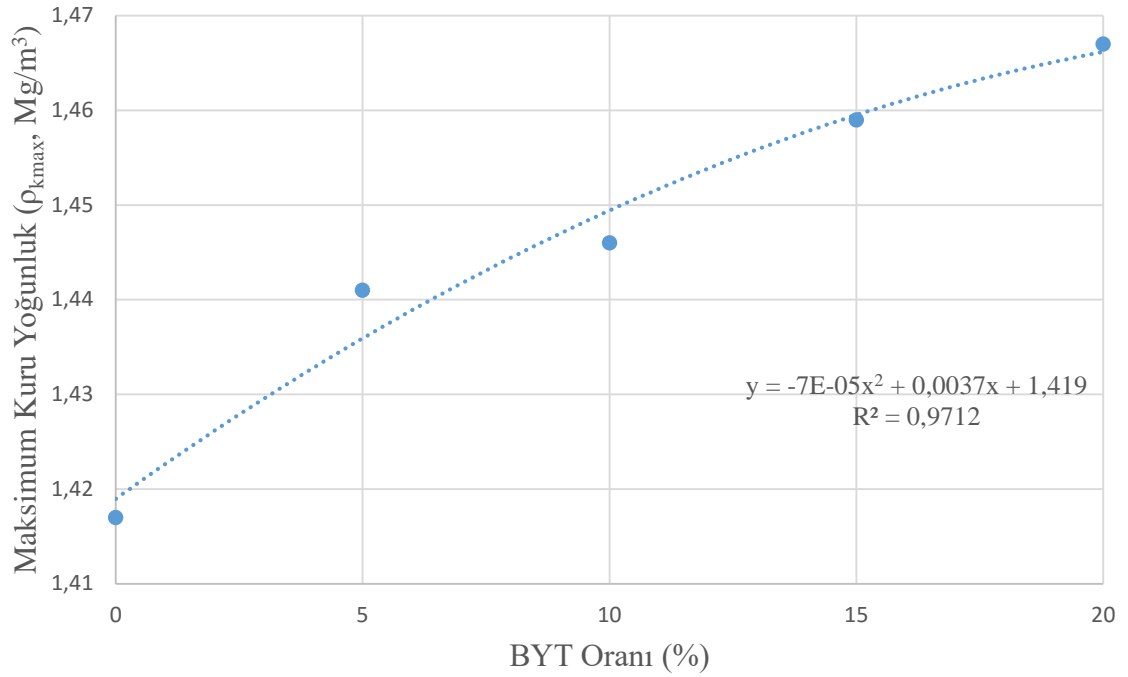
Genel olarak katkılı numunelerin maksimum kuru yoğunluk değerleri 1.417-1.502 Mg/m³ arasında değişim göstermiştir. Optimum su içeriği değerlerine bakıldığında ise %27.8 ila %21.7 arasındaki değişimlerin olduğu tespit edilmiştir.

En yüksek optimum su içeriği değeri ZK numunelerinden elde edilirken, bu parametre için en küçük değer ZKS20 numunelerinde görülmüştür. En düşük maksimum kuru yoğunluklar ZK numunelerinden, en yüksek maksimum kuru yoğunluk değeri ise ZKB20 numunelerinden elde edilmiştir.

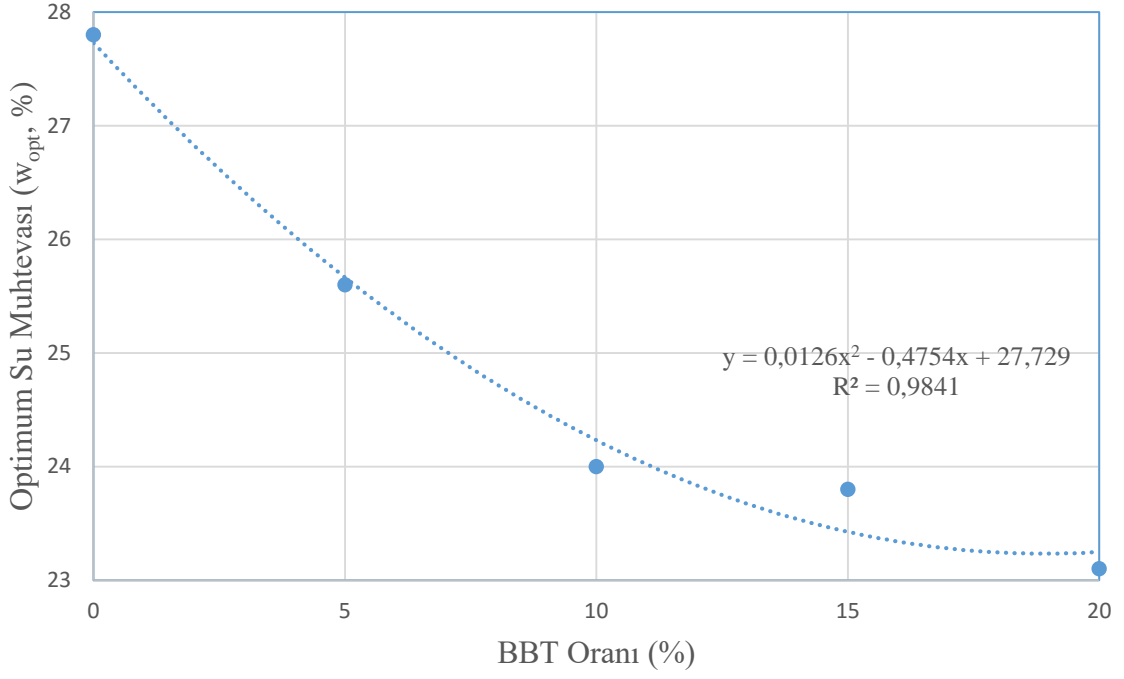
ZKY karışımlarına ait optimum su içerikleri ve maksimum kuru yoğunluk değerlerindeki değişim grafikleri sırasıyla Şekil 3.14 ve Şekil 3.15'de, ZKB karışımlarına ait optimum su içerikleri ve maksimum kuru yoğunluk değerlerindeki değişim grafikleri sırasıyla Şekil 3.16 ve Şekil 3.17'de, ZKS karışımlarına ait optimum su içerikleri ve maksimum kuru yoğunluk değerlerindeki değişim grafikleri sırasıyla Şekil 3.18 ve Şekil 3.19'da sunulmuştur.



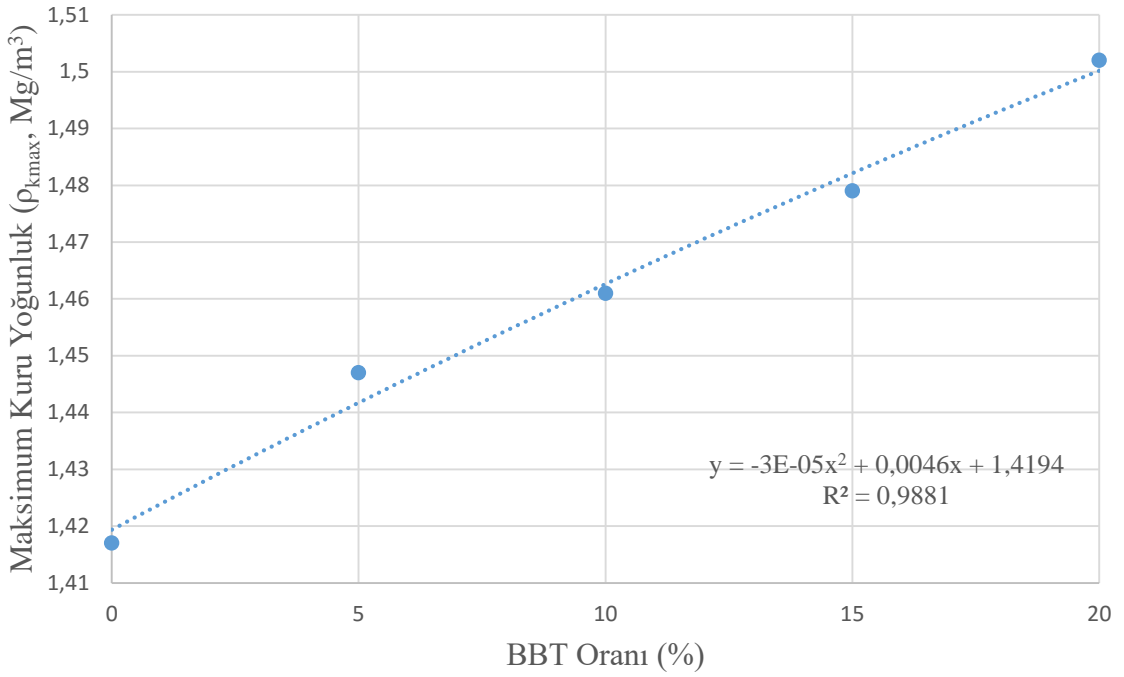
Şekil 3.14. ZKY karışımlarının optimum su içerikleri



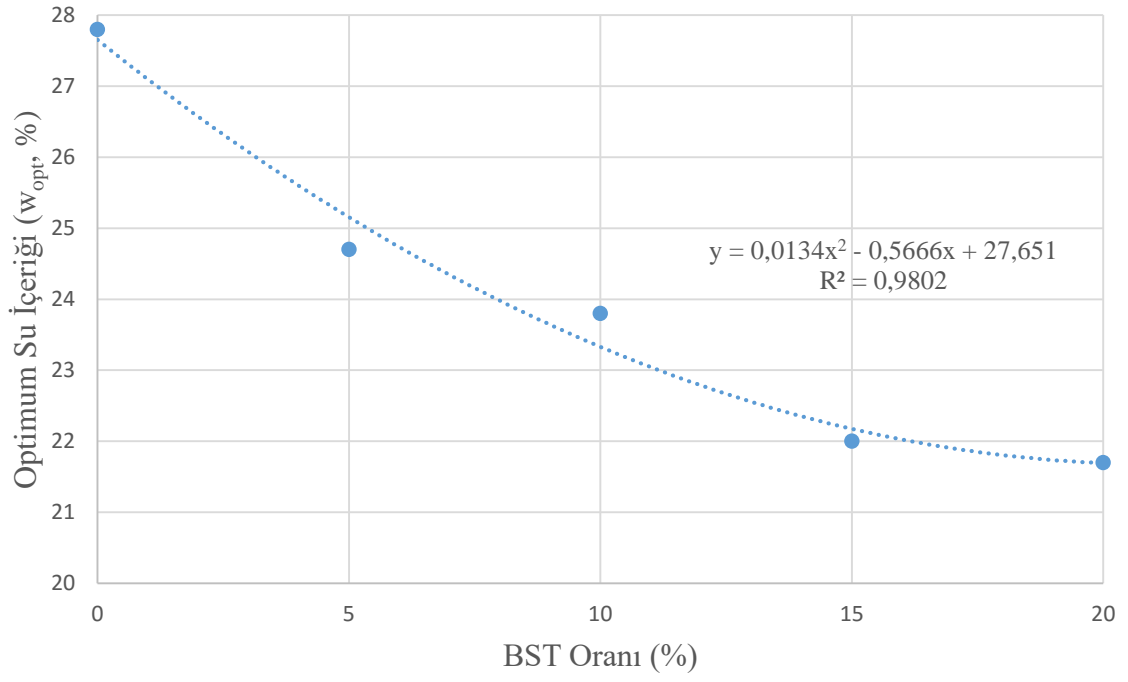
Şekil 3.15. ZKY karışımlarının maksimum kuru yoğunlukları



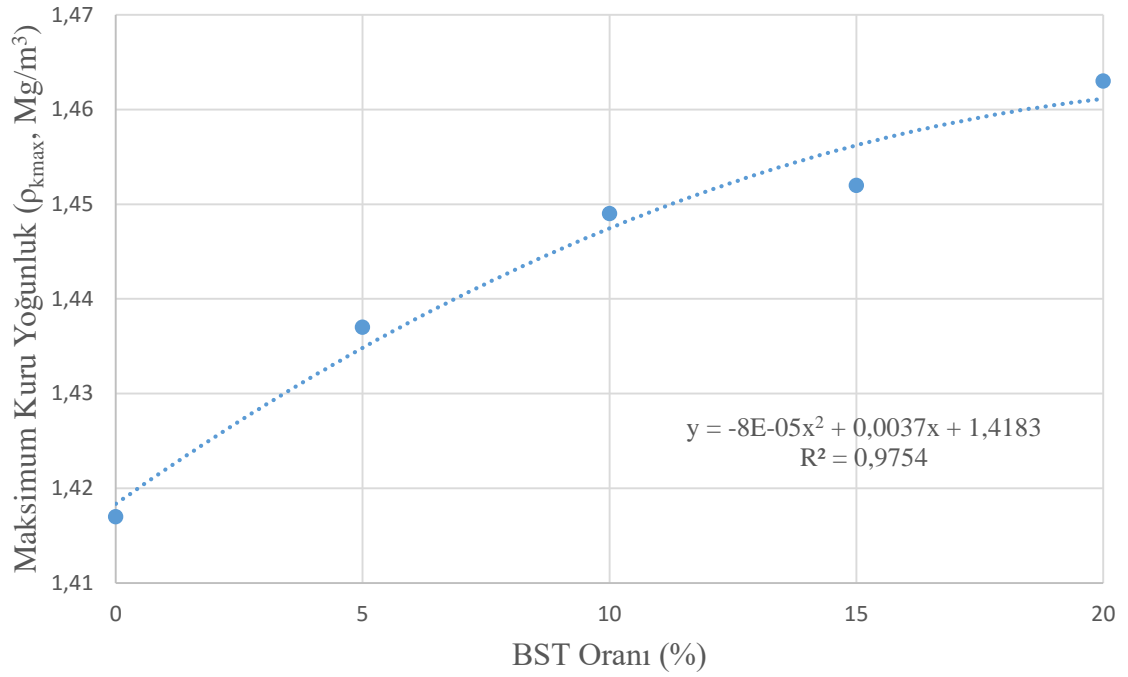
Şekil 3.16. ZKB karışımlarının optimum su içerikleri



Şekil 3.17. ZKB karışımlarının maksimum kuru yoğunlukları



Şekil 3.18. ZKS karışımlarının optimum su içerikleri



Şekil 3.19. ZKS karışımlarının maksimum kuru yoğunlukları

3.1.3. Serbest Basınç Dayanımları

Optimum su içerikleri belirlenen zemin karışımları, Standart Proctor aleti kullanılarak standart bir kompaksiyon enerjisinde sıkıştırılmıştır. Daha sonra örnek çıkarıcı yardımıyla deney numuneleri hazırlanmıştır. Hazırlanan deney numuneleri 38 mm çapında ve 76 mm yüksekliğinde silindirik numunelerdir. Hazırlanan numuneler 28 gün süre boyunca desikatörde bekletilmiştir. Literatürde kireçle stabilizasyonda nihai dayanım değerlerine 1-3 ay içerisinde ulaşıldığını ve en az 28 günlük kür süresinin gerekliliğini belirten birçok çalışma mevcuttur (Anday, 1962; Dawson, 1956; Laguros vd., 1956; Tonoz vd., 2004; Sezer vd., 2006). Kür süresi sonunda serbest basınç deneyine geçilmiş ve her bir BT atığının kireçli ve kireçsiz olarak belirlenen oranlarda katılmasının zemin stabilizasyonunda mukavemet değerlerine etkileri araştırılmıştır. Tek eksenli serbest basınç dayanımı değerlerini belirlemek için hazırlanan katkılı zemin numuneleri Şekil 3.20’de, bu numunelerin desikatörde 28 günlük küre bırakılması Şekil 3.21’de gösterilmiştir.

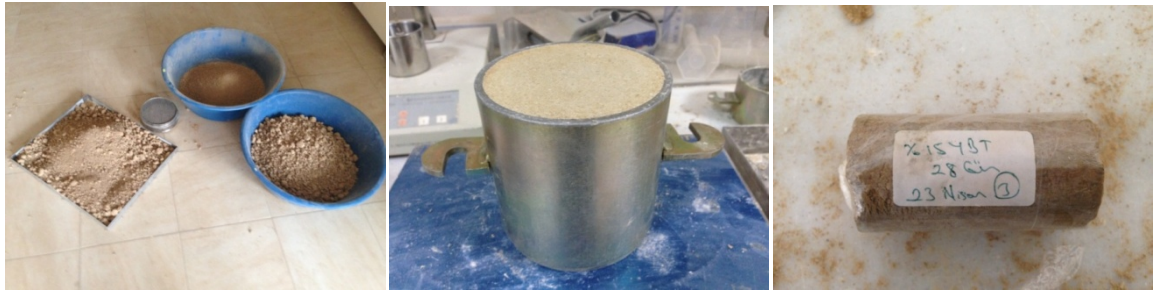


Şekil 3.20. Serbest basınç deneyi numuneleri



Şekil 3.21. Deney numunelerine desikatör içerisinde 28 günlük kür uygulama

Deney numuneleri hazırlama işlemleri öncelikle zeminin elenmesi, elenen zemine daha önce belirtilen oranlara göre katkıların katılarak standart Proktor kalıbında sıkıştırılması ve son olarak sıkıştırılmış numunelerin örnek çıkarıcı yardımıyla çıkarılması olmak üzere üç aşamalı olarak yapılmıştır. Numunelerin hazırlanma aşamaları Şekil 3.22 yardımıyla açıklanmıştır.



Şekil 3.22. Numunelerin hazırlanma aşamaları

Kıvam ve kompaksiyon parametreleri daha önceden belirlenen numunelerin dayanım parametrelerini belirlemek amacıyla, ilgili standartlara uygun bir biçimde hazırlanan numunelere 28 günlük kür süresi sonucunda tek eksenli basınç dayanımı testi yapılmıştır. Deneyin yapıldığı düzenek Şekil 3.23’de sunulmuştur.



Şekil 3.23. Tek eksenli serbest basınç dayanımı testi

Tek eksenli basınç dayanımı deneylerine öncelikle kireç katkısız ZB, ZY ve ZS karışımları ile başlanmıştır. Tüm deneyler boyunca zeminle karıştırılan BT atığı oranları %0, %5, %10, %15 ve %20’dir. Öncelikle kireçsiz numuneler hazırlanarak yapılan deneylerde ZY karışımlarına ait serbest basınç dayanımı verileri Tablo 3.8’de, ZB karışımlarına ait serbest basınç dayanımı verileri Tablo 3.9’da, ZS karışımlarına ait serbest basınç dayanımı verileri ise Tablo 3.10’da belirtildiği biçimdedir.

Tablo 3.8. ZY karışımlarının tek eksenli serbest basınç dayanımı sonuçları

Numune	Tek Eksenli Basınç Dayanımı (kPa)
Z	118.46
ZY5	115
ZY10	123.04
ZY15	119.33
ZY20	121.49

Tablo 3.9. ZB karışımlarının tek eksenli serbest basınç dayanımı sonuçları

Numune	Tek Eksenli Basınç Dayanımı (kPa)
Z	118.46
ZB5	143.8
ZB10	144.79
ZB15	148.12
ZB20	184.18

Tablo 3.10. ZS karışımlarının tek eksenli serbest basınç dayanımı sonuçları

Numune	Tek Eksenli Basınç Dayanımı (kPa)
Z	118.46
ZS5	136.62
ZS10	142.06
ZS15	158.24
ZS20	140.95

BT atıklarının zemine doğrudan karıştırılması ile gerçekleştirilen ve ilgili tablolarda sonuçları verilen tek eksenli basınç dayanımı verilerine göre, dayanım verileri açısından en güçlü etki BBT atıklarının doğal malzeme ile karıştırılması sonucu ortaya çıkmıştır. Kireç katkısız karışımların kırılma biçimlerine bakıldığında sünek davranış biçiminde kırılmaların meydana geldiği gözlemlenmiştir. Çatlakların meydana gelişi ve yayılımı izlenebilir biçimdedir. Numunelerde gevrek kırılmalar meydana gelmezken, numunelerin serbest basınç dayanımı pik değerlerinde uzun süre kaldığı ve bu değerlerin ardından kırılan numunelerdeki yükün kaldırılış süresinin de uzun olduğu tespit edilmiştir. 28 günlük kür süresinin ardından serbest basınç dayanımı testi yapılan ve kırılan kireçsiz karışımların el ile yoğrulabilir kıvamda olduğu çalışmada gözlemlenen bir diğer husustur.

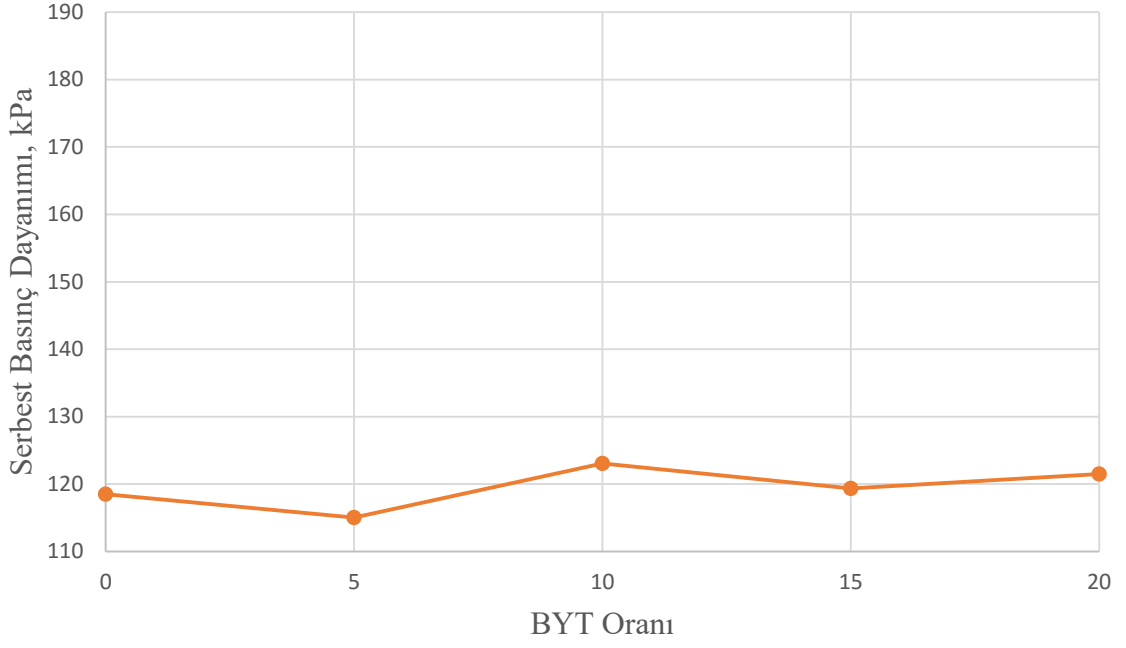
BYT'nin zeminle farklı oranlardaki karışımlarının 28 günlük kürden sonraki tek eksenli basınç dayanımı sonuçları incelendiğinde, atık BYT'nin tek başına herhangi bir bağlayıcılık özelliği göstermediği ve sonuçların birbirine oldukça yakın olduğu tespit edilmiştir (Tablo 3.8). Elde edilen sonuçlara göre en yüksek dayanım ZY10 karışımında gözlemlenmiş olup katkısız zemin numunesine göre artış %5 gibi çok düşük bir düzeydedir. Değişen BYT oranlarının tek eksenli serbest basınç dayanımlarında çok büyük değişimler göstermediği görülmektedir. Bu duruma, BYT içerisindeki CaO miktarının düşük olması nedeniyle 28 günlük kür süresince yeterli düzeyde kimyasal reaksiyonların oluşmamasının sebep olduğu sonucuna varılmıştır.

Tablo 3.9'daki değerler incelendiğinde en yüksek serbest basınç dayanımı değerlerinin BBT'nin zemine %20 oranında katılması sonucu elde edildiği görülmektedir. ZB20 karışımlarında doğal zemin numunelerine göre yaklaşık %45 oranında bir artış meydana gelmiştir. BBT'nin zemine %5, %10 ve %15 oranlarında katılmasıyla serbest basınç dayanımı değerlerinde %10-15 seviyelerinde bir artış tespit edilmiştir. ZB20 karışımının verdiği sonuç, katı atıkların yeniden kullanılabilirliği kapsamında BBT atıklarının yalnız başına zemin stabilizasyonunda kullanılabileceğini göstermiştir.

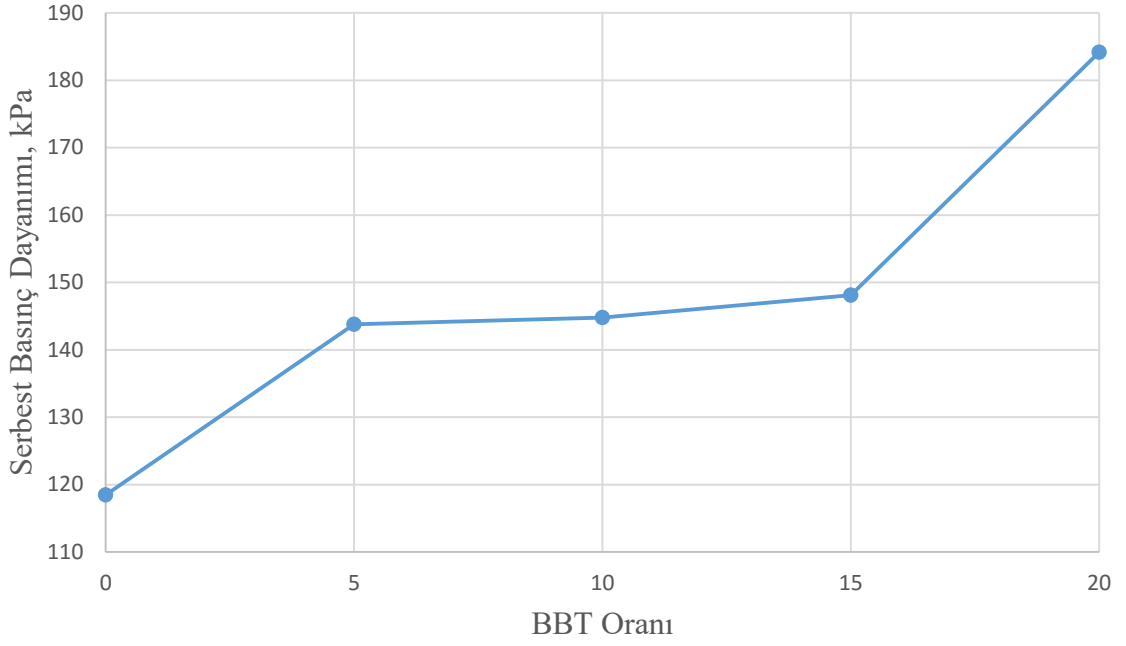
BBT ve BYT atıklarının fiziksel ve kimyasal analizleri (Tablo 2.4 ve Tablo 2.6) beraber incelendiğinde, atık BBT içindeki CaO miktarının daha fazla olduğu görülmektedir. CaO miktarının BBT atıkları içinde daha fazla bulunması tek başına bağlayıcılık yönünden önemli bir etken olmasının yanı sıra, ZB karışımlarının serbest basınç değerlerinin ZY karışımlarına göre daha yüksek mertebelerde çıkmasının bir başka önemli nedeni BYT içindeki Na₂O'nun BBT'ye göre çok yüksek olmasıdır. BYT içinde fazla bulunan bu mineralin CaO gibi SiO₂ ile kimyasal reaksiyona girmesiyle, CaO ile SiO₂ arasında yeterli düzeyde bağlar meydana gelememiş buna istinaden ZB karışımlarına ait serbest basınç dayanımı verileri daha yüksek çıkmıştır. Yani BYT içindeki Na₂O miktarının daha yüksek oluşu ilk kimyasal reaksiyonlar açısından serbest basınç dayanımı değerlerinde olumsuz bir etki meydana getirmiştir.

ZS numunelerinin serbest basınç dayanımı değerleri doğal zemine göre daha yüksek çıkmıştır (Tablo 3.10). En yüksek serbest basınç dayanımı verisi ZS15 numunesinden elde edilmiştir. Bu numunelerde dayanım artışı %33 seviyelerindedir. BST atıklarının fiziksel ve kimyasal analizleri (Tablo 2.8) BST içindeki CaO miktarının diğerlerine göre düşük olduğunu göstermektedir. Buna rağmen serbest basınç dayanımı verileri, ZY karışımlarına göre daha yüksek çıkmıştır. Bunun nedeni ise, BST içindeki Na₂O miktarının oldukça düşük olması ve CaO ile SiO₂ arasında meydana gelen kimyasal reaksiyonları azaltıcı etki göstermemesidir. Elde edilen tüm serbest basınç dayanımı verileri, BT atıklarının fiziksel ve kimyasal analizleri ile örtüşen bir tablo ortaya koymuştur.

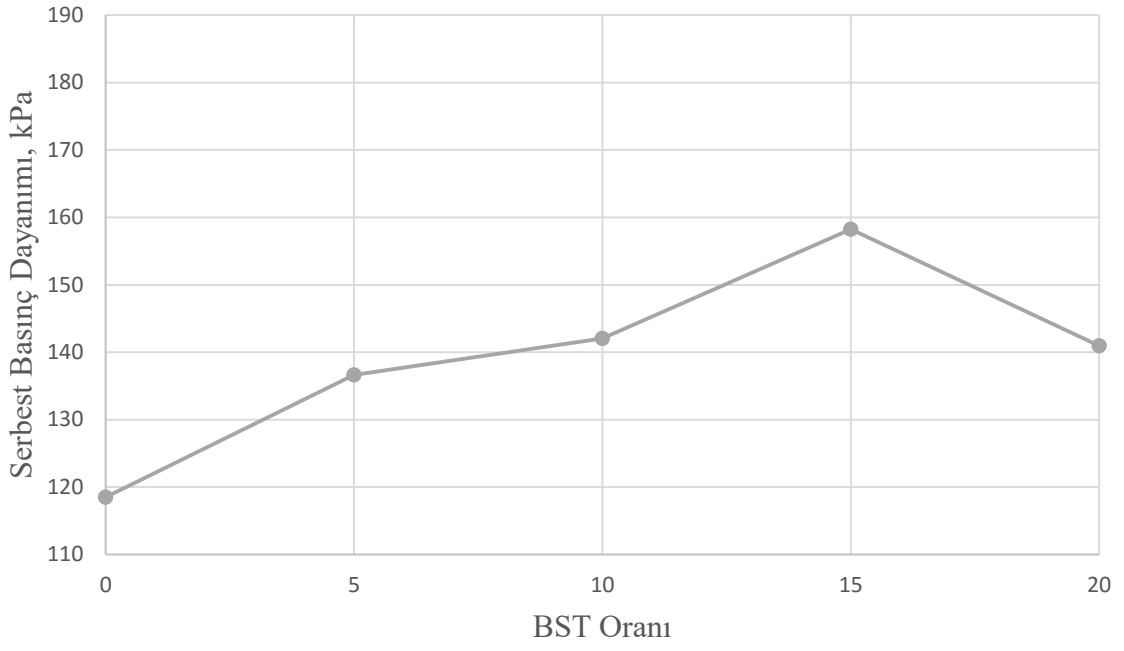
ZY karışımlarına ait serbest basınç dayanımı grafiği Şekil 3.24'de, ZB karışımlarına ait serbest basınç dayanımı grafiği Şekil 3.25'te, ZS karışımlarına ait serbest basınç dayanımı grafiği ise Şekil 3.26'da, bu kireçsiz karışımların serbest basınç dayanımı değerlerinin değişimini gösteren grafik ise Şekil 3.27'de sunulmuştur.



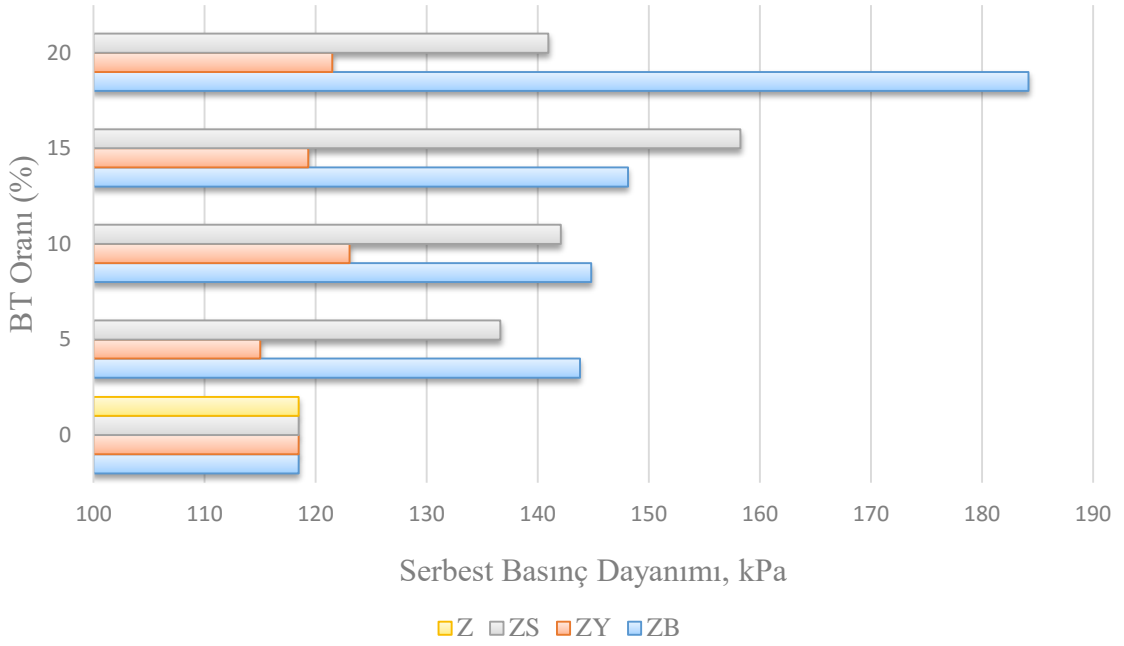
Şekil 3.24. ZY karışımlarının serbest basınç dayanımları



Şekil 3.25. ZB karışımlarının serbest basınç dayanımları



Şekil 3.26. ZS karışımlarının serbest basınç dayanımları



Şekil 3.27. Kireçsiz karışımların serbest basınç dayanımı değerlerinin değişimi

Kireçsiz karışımların tek eksenli basınç dayanımı deneylerinin tamamlanmasının ardından %6 kireç içeren ZK, ZKB, ZKY ve ZKS karışımlarının deneylerine geçilmiştir. Kireçsiz karışımlarda kullanılan %0, %5, %10, %15 ve %20 BT atığı oranları kireçli karışımlarda da aynı oranlarda tercih edilmiştir. Yapılan deneyler sonucu elde edilen ZKY karışımlarına ait serbest basınç dayanımı verileri Tablo 3.11’de, ZKB karışımlarına ait serbest basınç dayanımı verileri Tablo 3.12’de, ZKS karışımlarına ait serbest basınç dayanımı verileri ise Tablo 3.13’te belirtildiği biçimdedir.

Tablo 3.11. ZKY karışımlarının tek eksenli serbest basınç dayanımı sonuçları

Numune	Tek Eksenli Basınç Dayanımı (kPa)
Z	118.46
ZK	1072.23
ZKY5	1540.29
ZKY10	1463.93
ZKY15	1472.84
ZKY20	1363.02

Tablo 3.12. ZKB karışımlarının tek eksenli serbest basınç dayanımı sonuçları

Numune	Tek Eksenli Basınç Dayanımı (kPa)
Z	118.46
ZK	1072.23
ZKB5	1336.83
ZKB10	1651.59
ZKB15	1547.52
ZKB20	1352.68

Tablo 3.13. ZKS karışımlarının tek eksenli serbest basınç dayanımı sonuçları

Numune	Tek Eksenli Basınç Dayanımı (kPa)
Z	118.46
ZK	1072.23
ZKS5	1251.22
ZKS10	1245.29
ZKS15	1210.58
ZKS20	1114.87

Kireçli karışımların serbest basınç dayanımı verilerini içeren tablolar incelendiğinde dikkat çeken ilk husus, doğal zemine %6 oranında kireç katılmasıyla birlikte elde edilen

ZK karışımının serbest basınç dayanımı değerinde meydana gelen artıştır. Birleşik zemin sınıflandırma sistemine göre yüksek plastisiteli kil grubunda yer alan ve Şekil 2.2’de verilen granülometri eğrisinden görüleceği üzere oldukça ince daneli bir yapıya sahip olan doğal zeminin serbest basınç dayanımı verileri, %6 oranında kireç ilavesiyle birlikte yaklaşık 10 kat artış göstermiştir. Bu sonuç, kireçle stabilizasyonun ince daneli zeminlerde ne kadar etkin olduğunun bir göstergesidir.

BYT atıklarının kireç ilave edilmeksizin doğrudan zemin ile karıştırılmasında serbest basınç dayanımı değerlerinde ciddi artışların meydana gelmediği çalışma kapsamında daha önce ifade edilmiştir. Buna karşın, kireç ile birlikte BYT’nin zemin stabilizasyonunda kullanılması halinde serbest basınç dayanımında katkısız zemine göre 13 kata varan artışlar tespit edilmiştir (Tablo 3.11). Bu artışın görüldüğü kireç katkılı BYT oranı %5’tir. Bu oranda hazırlanan ZKY5 karışımlarında sadece kireç içeren ZK karışımlarına göre %43 oranında artış meydana gelmiştir. Artan oranlarda daha düşük dayanımlar görülmesine rağmen, BYT karıştırılarak hazırlanan tüm numunelerde sadece kireçli numunelere göre daha yüksek dayanımlar elde edilmiştir. Yüksek orandaki dayanım artışlarının temel nedeni BYT kimyasal içeriğindeki ana oksitlerin (SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3), kireçteki CaO ile kimyasal tepkimeye girmesidir. Bu sonuçlar atık BYT’nin puzolanik özelliklerinin olduğunu ve ikincil bağlayıcı olarak zemin stabilizasyonunda kullanılabileceğini göstermiştir. Bu atıkların zemin stabilizasyonda değerlendirilmesi ise zemin mekaniği açısından önemli olduğu kadar, çevre mühendisliği ve katı atıkların yeniden değerlendirilebilmesi açısından da bir o kadar öneme sahiptir.

ZKB karışımlarının serbest basınç dayanımı verileri incelendiğinde en yüksek dayanımın ZKB10 karışımlarında meydana geldiği görülmüştür. BBT atıklarının %15 ve %20 oranlarında ZK karışımlarına eklenmesiyle serbest basınç dayanımı değerlerinde azalmalar meydana gelmesine rağmen, bu değerler yine ZK karışımlarına göre daha yüksek mertebelere sahiptir. ZKB ve ZKY karışımlarının serbest basınç dayanımı değerleri beraber irdelendiğinde dayanım verilerinin yüksek ve birbirine benzer nitelikte çıktıkları söylenebilir. Bununla birlikte, ZKB karışımlarının daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür. ZY ve ZB karışımlarında serbest basınç dayanımı değerlerindeki farklılığa neden olan ana etmenler bu karışımlar için de aynı farklılıkları göstermişlerdir.

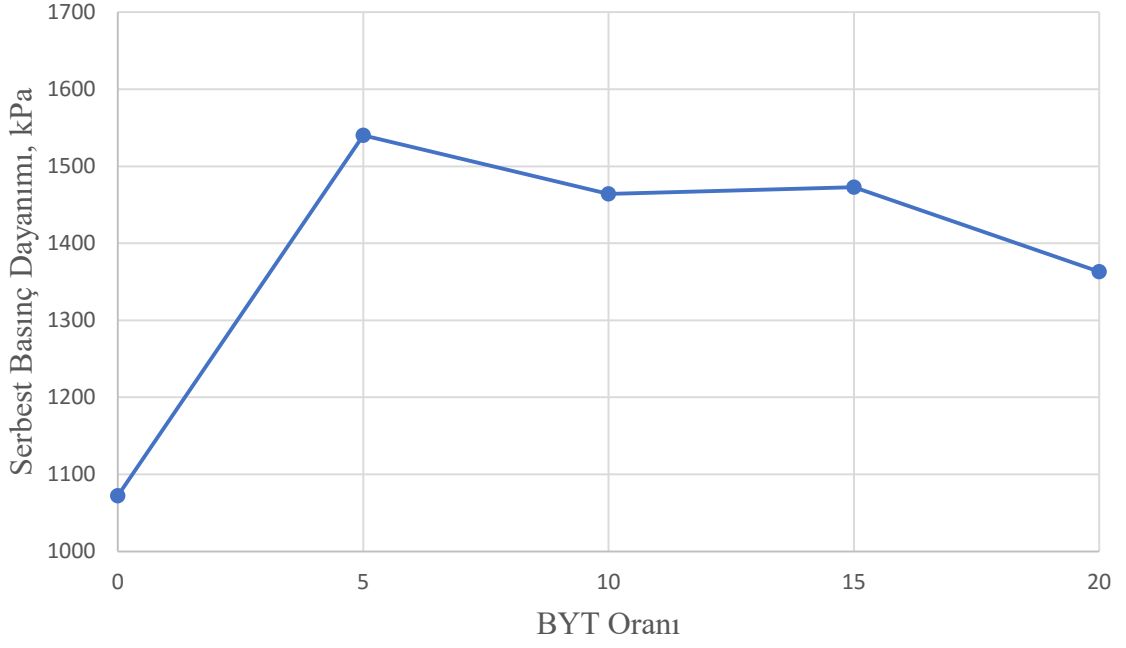
Tablo 3.13 incelendiğinde ZKS karışımları içinde en yüksek dayanım değerininin ZKS5 karışımından elde edildiği görülmektedir. ZKS5 karışımlarında sadece kireç içeren ZK karışımlarına göre %17 oranında artış meydana gelmiştir. BST atığı içeren ZKS5,

ZKS10 ve ZKS15 karışımlarının sadece kireçli numunelere göre daha yüksek dayanımlar verdiği tespit edilmiştir. Fakat bu dayanım verileri ZKY ve ZKB numunelerine göre daha düşüktür. Bunun en önemli nedeni ise BST atıklarının çok düşük oranda CaO içermesiyle birlikte, puzolanik aktivitelerinin oldukça düşük olmasıdır. ZKS20 karışımında ise ZK karışımına yakın bir değerde dayanım görülmüştür. Buradan, eklenen BST atığının yüksek oranda olmasının düşük değerde dayanım verdiği sonucu çıkmaktadır. Elde edilen verilerin zemin-kireç karışımlarına göre genel olarak daha yüksek olması ise BST atıklarının zemin stabilizasyonunda çok yüksek mertebelerde etkin olmamasına karşın kullanılabilir olduğunu göstermiştir.

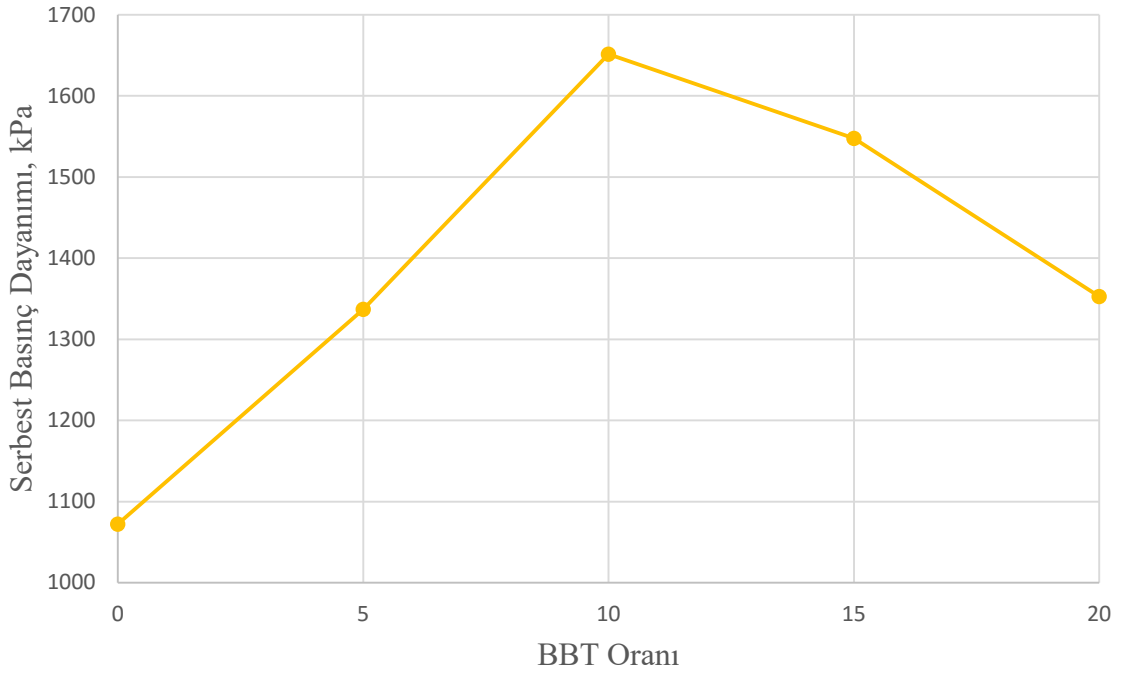
ZK, ZKY, ZKB ve ZKS karışımlarının tek eksenli serbest basınç dayanımı deneyleri boyunca gerçekleşen kırılma davranışları incelendiğinde gevrek kırılma biçiminde kırılmaların meydana geldiği gözlemlenmiştir. Çatlakların meydana gelişi ve yayılımı hızlı bir şekilde gerçekleşmiştir. Numunelerde ani kırılmalar ve parçacıklar halinde dağılmalar izlenmiştir. Serbest basınç dayanımı pik değerlerindeki sürelerin ve kırılan numunelerdeki yükün kaldırılış süresinin oldukça kısa olduğu tespit edilmiştir. Bu izlenimlerin yanı sıra, 28 günlük kür süresinin ardından serbest basınç dayanımı testi yapılan ve kırılan kireçli karışımların el ile yoğrulabilir kıvamdan oldukça uzak ve rijit oldukları gözlemlenmiştir.

Kireçli numunelerin tek eksenli serbest basınç dayanımı sonuçlarına göre; ZKY karışımları içindeki en yüksek dayanım ZKY5 karışımlarından, ZKB karışımları içindeki en yüksek dayanım ZKB10 karışımlarından, ZKS karışımları içindeki en yüksek dayanım ise ZKS5 karışımlarından elde edilmiştir. Özellikle ZKY ve ZKB karışımlarının verdiği yüksek serbest basınç dayanımı değerleri, BT atıklarının zemin stabilizasyonunda kireçle birlikte kullanımının uygun olduğunu göstermiştir.

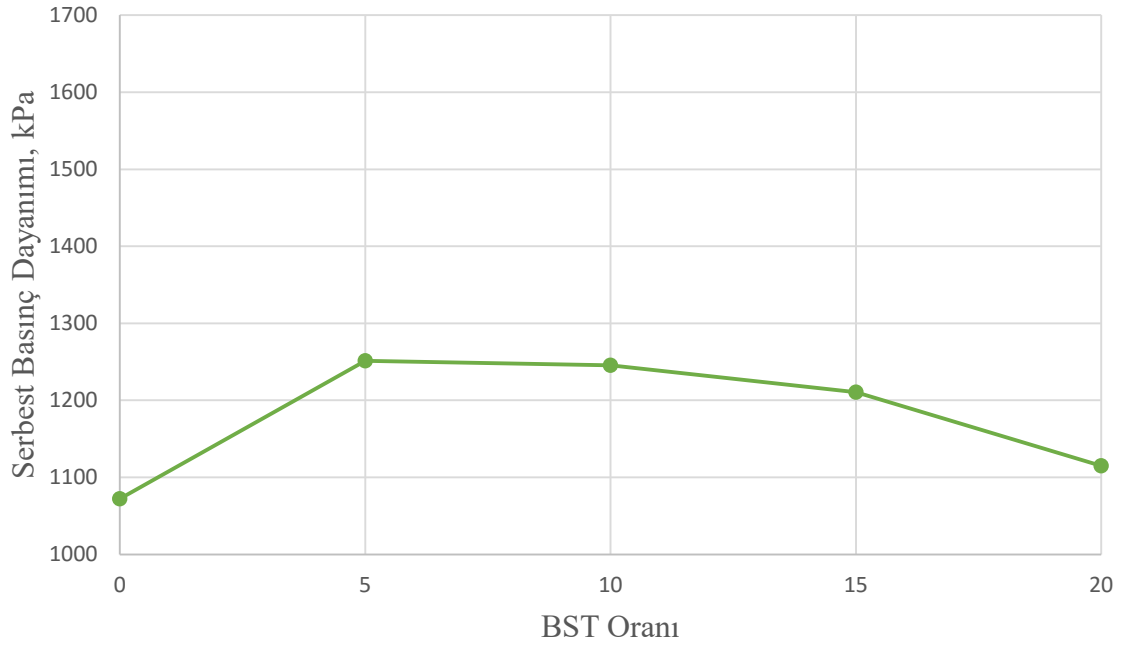
ZKY karışımlarına ait serbest basınç dayanımı grafiği Şekil 3.28'de, ZKB karışımlarına ait serbest basınç dayanımı grafiği Şekil 3.29'da, ZKS karışımlarına ait serbest basınç dayanımı grafiği ise Şekil 3.30'da, bu karışımların serbest basınç dayanımı değerlerinin değişimini gösteren grafik ise Şekil 3.31'de sunulmuştur.



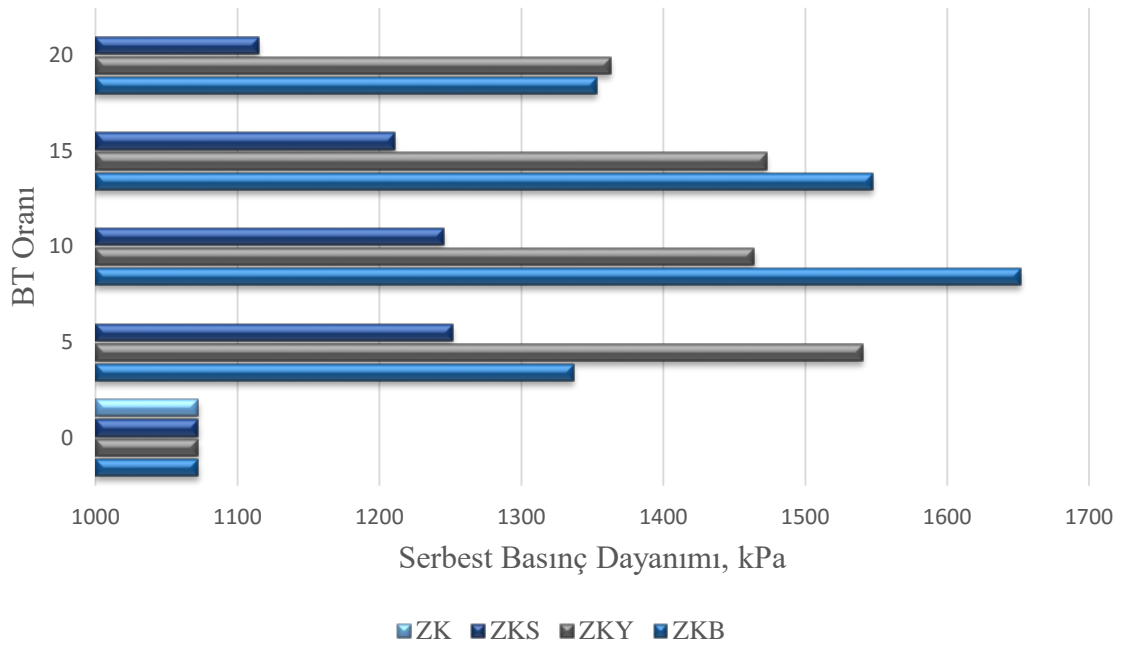
Şekil 3.28. ZKY karışımlarının serbest basınç dayanımları



Şekil 3.29. ZKB karışımlarının serbest basınç dayanımları



Şekil 3.30. ZKS karışımlarının serbest basınç dayanımları



Şekil 3.31. Kireçli karışımların serbest basınç dayanımı değerlerinin değişimi

3.1.4. Durabilite Tetkikleri

Doktora tez çalışması kapsamında hazırlanan karışımların değişen çevre koşullarında gösterdiği dayanım davranışlarını belirlemek, yapılan stabilizasyon çalışmasının özellikle soğuk iklime sahip bölgelerde uygulanabilirliğini tespit edebilmek açısından son derece önemlidir. Bu amaçla, hazırlanan deney numunelerine ASTM D 560 standardına göre donma-çözülme çevrimi (DÇÇ) uygulanmıştır. İlgili standarta göre karışımlar 12 donma-çözülme çevrimine tabi tutulmuştur. Donma-çözülme çevriminin tamamlanmasının ardından ise bu karışımların dayanımları tek eksenli serbest basınç deneyi ile birlikte belirlenmiştir.

Donma-çözülme çevrimi sonrası tek eksenli basınç dayanımı deneylerine öncelikle kireç katkısız ZB, ZY ve ZS karışımları ile başlanmıştır. Tüm deneyler boyunca zeminle karıştırılan BT atığı oranları %0, %5, %10, %15 ve %20'dir. Öncelikle kireçsiz numuneler hazırlanarak yapılan deneylerde ZY karışımlarına ait DÇÇ sonrası serbest basınç dayanımı verileri Tablo 3.14'te, ZB karışımlarına ait DÇÇ sonrası serbest basınç dayanımı verileri Tablo 3.15'te, ZS karışımlarına ait DÇÇ sonrası serbest basınç dayanımı verileri ise Tablo 3.16'da sunulmuştur.

Tablo 3.14. ZY karışımlarının DÇÇ sonrası tek eksenli serbest basınç dayanımı sonuçları

Numune	Tek Eksenli Basınç Dayanımı (kPa)
Z	88.77
ZY5	94.25
ZY10	96.84
ZY15	96.91
ZY20	97.05

Tablo 3.15. ZB karışımlarının DÇÇ sonrası tek eksenli serbest basınç dayanımı sonuçları

Numune	Tek Eksenli Basınç Dayanımı (kPa)
Z	88.77
ZB5	89.26
ZB10	91.16
ZB15	102.03
ZB20	119.78

Tablo 3.16. ZS karışımlarının DÇÇ sonrası tek eksenli serbest basınç dayanımı sonuçları

Numune	Tek Eksenli Basınç Dayanımı (kPa)
Z	88.77
ZS5	90.36
ZS10	91.67
ZS15	105.05
ZS20	99.88

ZY, ZB ve ZS karışımlarının DÇÇ sonrası serbest basınç dayanımı tablolarına göre, doğal zeminde DÇÇ sonrası %25 oranında bir dayanım kaybı meydana gelmiştir. Doğal zemine katılan BYT, BBT ve BST atıkları doğal zeminin DÇÇ sonrasında durabilitesini arttırmıştır. ZB20 karışımlarının DÇÇ sonrası serbest basınç dayanımı değeri, doğal zeminin ilk test edilen dayanımından daha yüksek bir veridir.

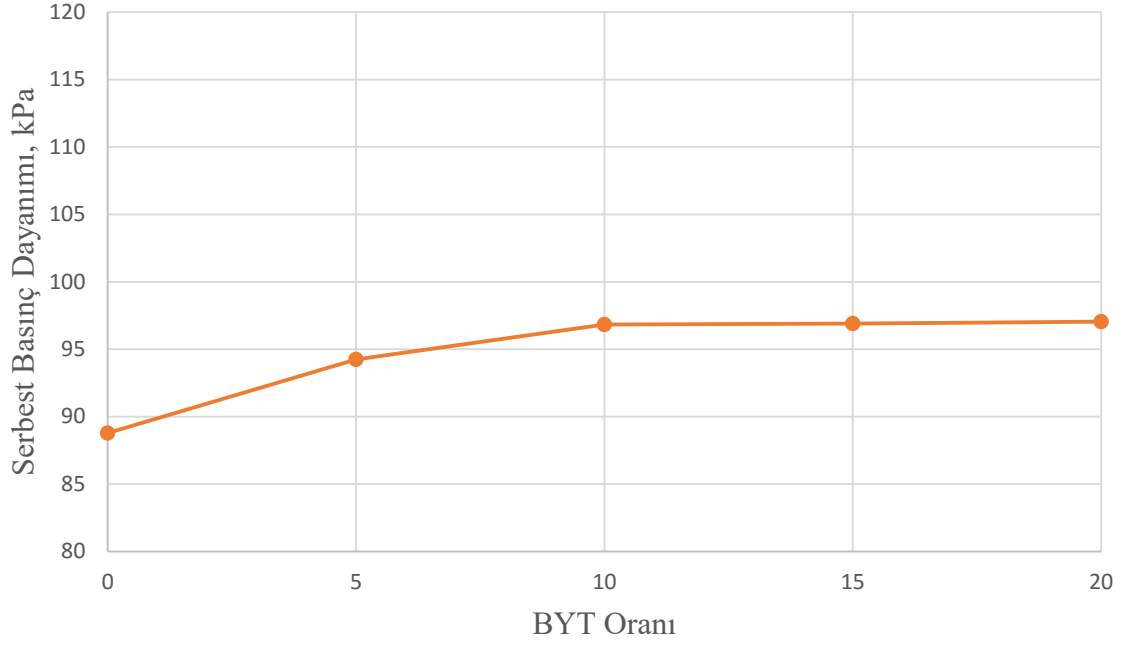
ZY karışımlarında ilk etapta %5 oranında BYT atığının zeminle karıştırılması neticesinde, doğal zeminin DÇÇ sonrası dayanım verilerine göre %6 oranında daha durabil bir davranış tespit edilirken, artan BYT oranlarında bu değerde anlamlı değişimler olmamıştır. ZY20 karışımlarında bu oran ancak %9 seviyelerine kadar çıkmıştır.

ZB karışımlarının DÇÇ sonrası serbest basınç dayanımı verileri, ZY karışımlarına göre daha güçlüdür. Buradan BBT atıklarının yalnız başına zeminle karıştırılmasıyla zemin durabilitesinin arttığını söylemek mümkündür. ZB karışımları artan BBT atığı katkısı oranlarında artan bir dayanım göstermişlerdir.

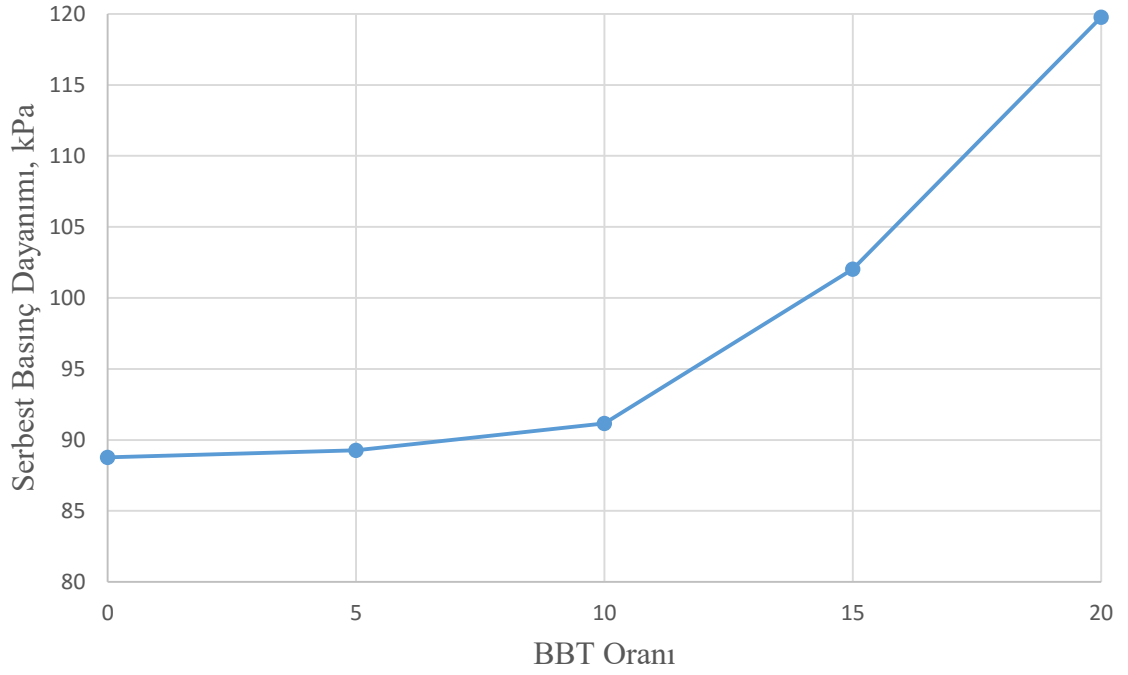
ZS karışımlarında en yüksek dayanım verisi ZS15 karışımlarından elde edilmiş olup, DÇÇ sonrası zemine göre dayanım artışı %18 seviyelerinde meydana gelmiştir. ZS20 karışımlarının dayanımında diğer BST katkılı karışımlara göre azalış görülmesine rağmen bu değer doğal zeminin DÇÇ sonrası dayanımına göre %12 oranında daha büyüktür.

Zeminle karıştırılan atık taşların her biri zeminin DÇÇ sonrası dayanım değerlerini arttırmıştır. Buradan, BT atıklarının zemin stabilizasyonunda durabilite yönünden de olumlu etkiler meydana getirdiği sonucuna varılmıştır.

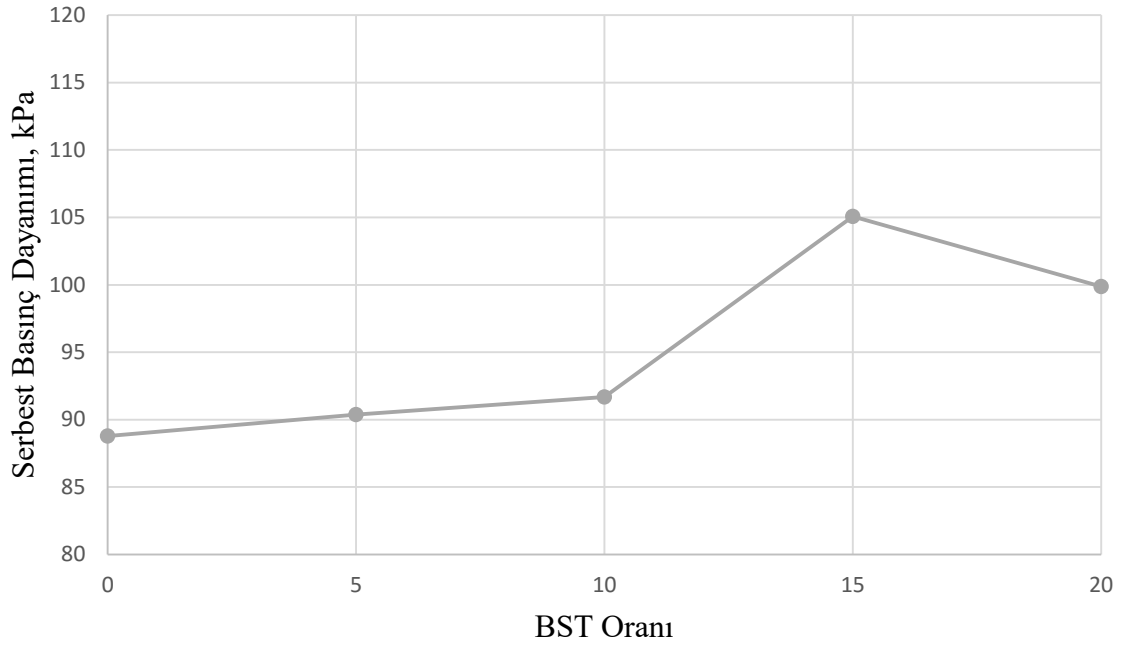
ZY karışımlarına ait DÇÇ sonrası serbest basınç dayanımı grafiği Şekil 3.32'de, ZB karışımlarına ait DÇÇ sonrası serbest basınç dayanımı grafiği Şekil 3.33'te, ZS karışımlarına ait DÇÇ sonrası serbest basınç dayanımı grafiği Şekil 3.34'te, bu kireçsiz karışımların DÇÇ sonrası serbest basınç dayanımı değerlerinin değişimini gösteren grafik ise Şekil 3.35'de sunulmuştur.



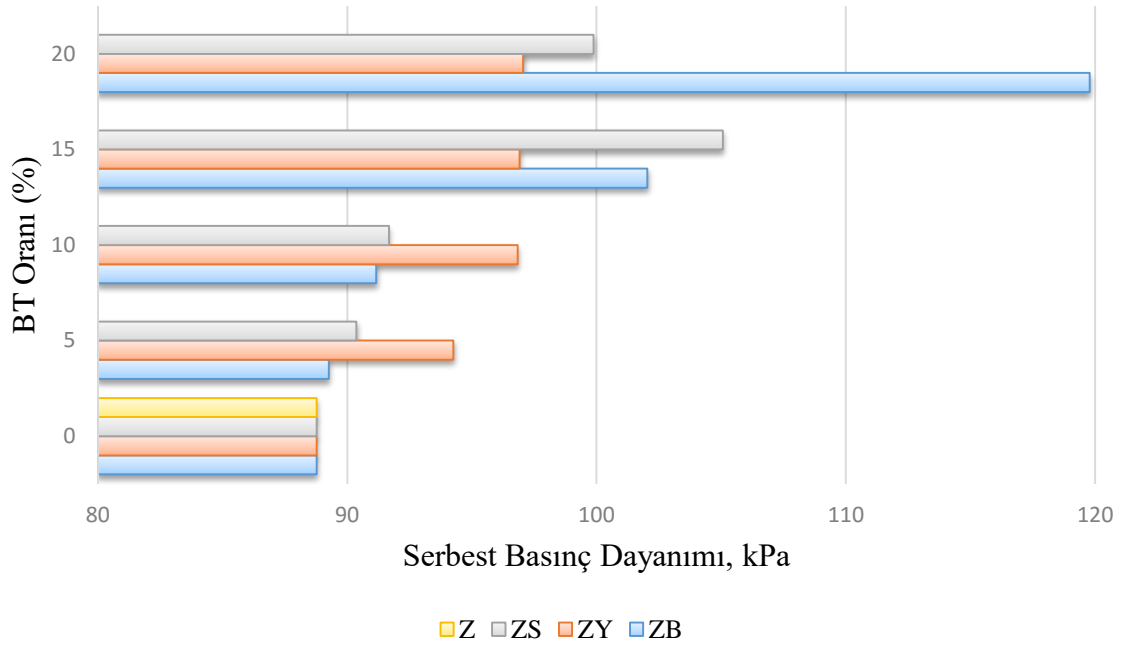
Şekil 3.32. DÇÇ sonrası ZY karışımlarının serbest basınç dayanımları



Şekil 3.33. DÇÇ sonrası ZB karışımlarının serbest basınç dayanımları



Şekil 3.34. DÇÇ sonrası ZS karışımlarının serbest basınç dayanımları



Şekil 3.35. DÇÇ sonrası kireçsiz karışımların serbest basınç dayanımı değişimi

Kireçsiz karışımların DÇÇ sonrası tek eksenli basınç dayanımı değerlerinin belirlenmesinin ardından %6 kireç içeren ZK, ZKB, ZKY ve ZKS karışımlarının deneylerine geçilmiştir. Kireçsiz karışımlarda kullanılan %0, %5, %10, %15 ve %20 BT atığı oranları kireçli karışımlarda da aynı oranlarda tercih edilmiştir. Yapılan deneyler sonucu elde edilen ZKY karışımlarına ait DÇÇ sonrası serbest basınç dayanımı verileri Tablo 3.17’de, ZKB karışımlarına ait DÇÇ sonrası serbest basınç dayanımı verileri Tablo 3.18’de, ZKS karışımlarına ait DÇÇ sonrası serbest basınç dayanımı verileri ise Tablo 3.19’da belirtildiği biçimdedir.

Tablo 3.17. ZKY karışımlarının DÇÇ sonrası tek eksenli serbest basınç dayanımı sonuçları

Numune	Tek Eksenli Basınç Dayanımı (kPa)
Z	88.77
ZK	675.42
ZKY5	1380.49
ZKY10	1382.05
ZKY15	1372.48
ZKY20	1270.76

Tablo 3.18. ZKB karışımlarının DÇÇ sonrası tek eksenli serbest basınç dayanımı sonuçları

Numune	Tek Eksenli Basınç Dayanımı (kPa)
Z	88.77
ZK	675.42
ZKB5	738.45
ZKB10	816.85
ZKB15	1055.61
ZKB20	1087.79

Tablo 3.19. ZKS karışımlarının DÇÇ sonrası tek eksenli serbest basınç dayanımı sonuçları

Numune	Tek Eksenli Basınç Dayanımı (kPa)
Z	88.77
ZK	675.42
ZKS5	995.56
ZKS10	981.89
ZKS15	961.12
ZKS20	868.16

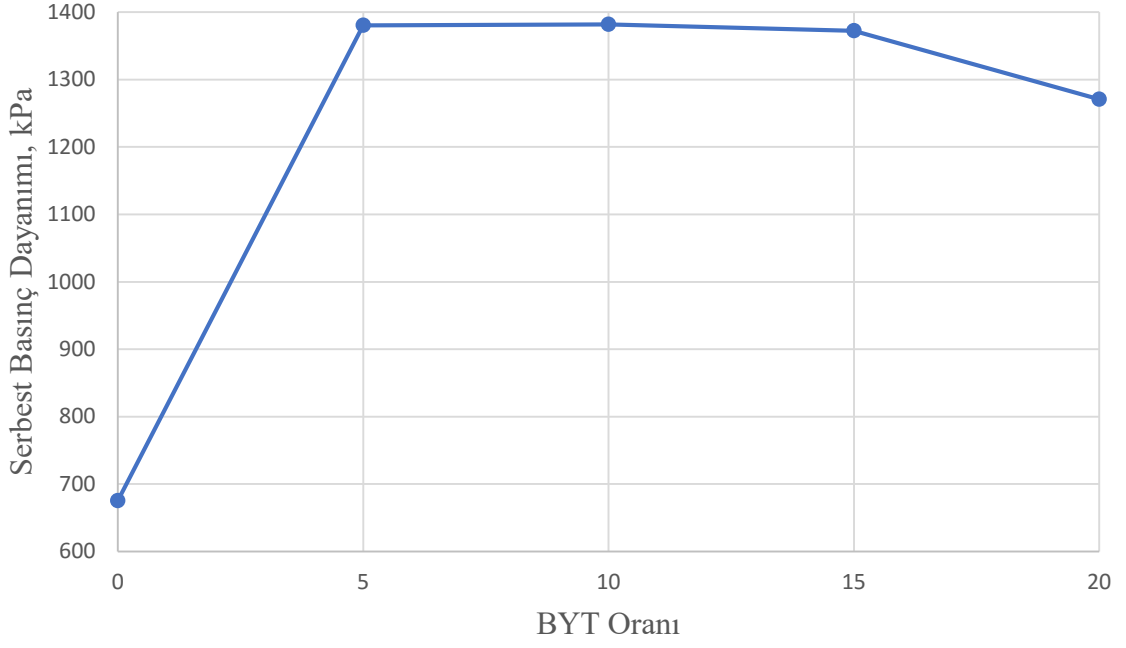
Kireçli karışımların DÇÇ sonrası dayanım verilerine göre, DÇÇ ile birlikte sadece kireç içeren ZK karışımlarının dayanımında %37 oranında azalma meydana gelmiştir. ZKY karışımlarının DÇÇ sonrası dayanım verileri incelendiğinde, ZK karışımının ilk serbest basınç dayanımına göre daha yüksek değerler elde edilmiştir. Bu sonuç BYT atıklarının donma-çözülme olaylarına karşı durabilitesinin oldukça yüksek olduğunu ortaya koymuştur.

ZKB karışımları, DÇÇ sonrasında ZK karışımlarının DÇÇ sonrası dayanımına göre daha yüksek dayanım vermiştir. Serbest basınç dayanımı verileri, ZK karışımının ilk dayanımından daha düşüktür fakat sadece kireç içeren numunelerin donma-çözülme sonrası dayanımına göre dayanım artışları meydana gelmiştir. Bu veriler, BBT atıklarının zemin stabilizasyonunda donma-çözülme etkilerine karşı durabilite özelliklerinin güçlü olduğunu göstermiştir.

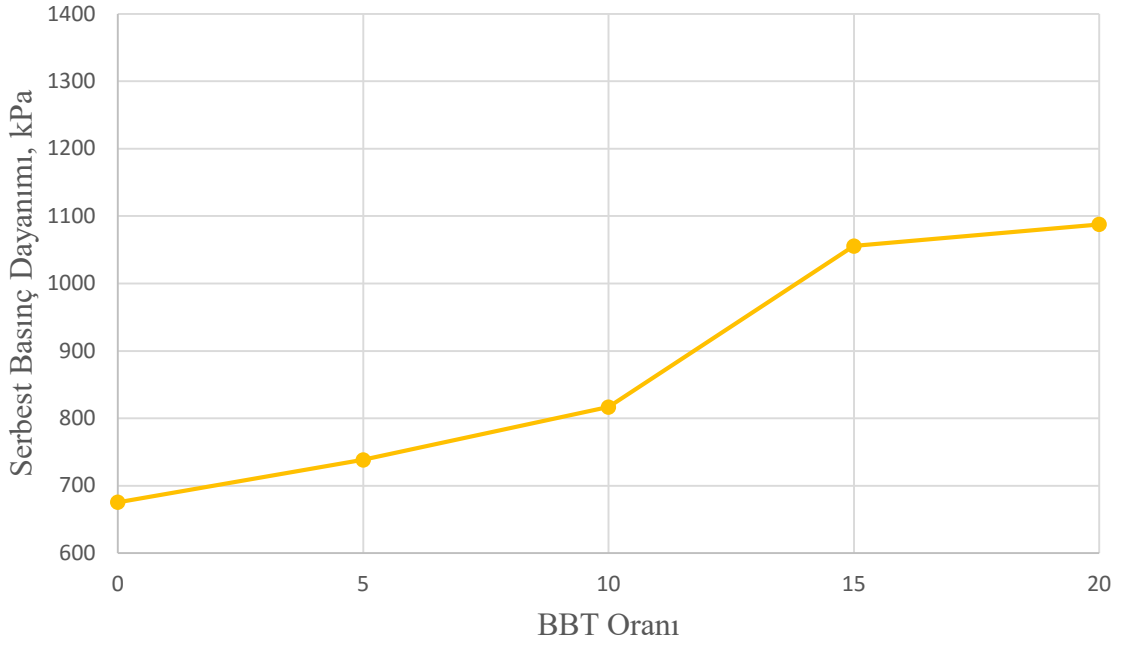
ZKS karışımlarında, ZK karışımlarının donma-çözülme çevrimi öncesi ilk dayanımına göre sadece %7 oranında azalma meydana gelmiştir. Bu dayanım verisi ZKS5 karışımlarından elde edilmiştir. Buradan, BBT ve BYT atıklarında olduğu gibi BST atıklarının da durabilite özelliklerinin iyi olduğu sonucu çıkarılmıştır.

Karışımların durabilite özellikleri beraber incelendiğinde, durabilite yönünden en yüksek dayanım verileri sırasıyla BYT, BBT ve BST ile karıştırılan karışımlardan elde edilmiştir. ZKY karışımlarının DÇÇ sonrası serbest basınç değerlerinin ZKB karışımlarına göre daha yüksek mertebelerde çıkmasının en önemli nedeninin, BYT içindeki Na_2O 'nun BBT'ye göre çok yüksek olması olduğu düşünülmektedir. Çünkü, Na_2O 'nun suyla reaksiyonu sonucunda NaOH oluşur. Oluşan NaOH ise ortamın pH değerini yükseltir, meydana gelen CSH ürünlerinin kararlılığını artırır ve çevresel faktörler sonucu meydana gelen bozulmaları önleyici etki yapar (Al- Amoudi, 2002). Buna göre BYT içindeki Na_2O miktarının daha yüksek oluşu ilk kimyasal reaksiyonlar açısından serbest basınç dayanımı değerlerinde olumsuz bir etki meydana getirmiş olmasına rağmen, donma-çözülme etkileri altında tam tersi bir durum meydana gelmiştir. Na_2O ile SiO_2 arasındaki kimyasal bağlar ZKY karışımlarının DÇÇ sonrası durabilite özelliklerini iyileştirmiştir.

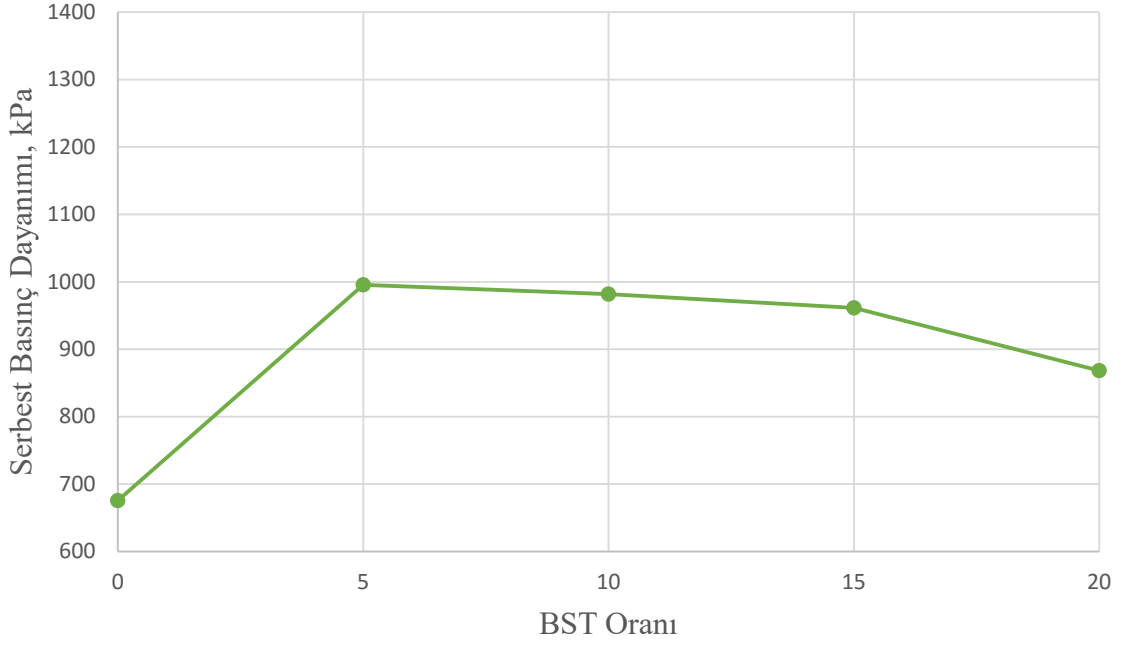
ZKY karışımlarına ait DÇÇ sonrası serbest basınç dayanımı grafiği Şekil 3.36'da, ZKB karışımlarına ait DÇÇ sonrası serbest basınç dayanımı grafiği Şekil 3.37'de, ZKS karışımlarına ait DÇÇ sonrası serbest basınç dayanımı grafiği Şekil 3.38'te, bu karışımların DÇÇ sonrası serbest basınç dayanımı değerlerinin değişimini gösteren grafik ise Şekil 3.39'da sunulmuştur.



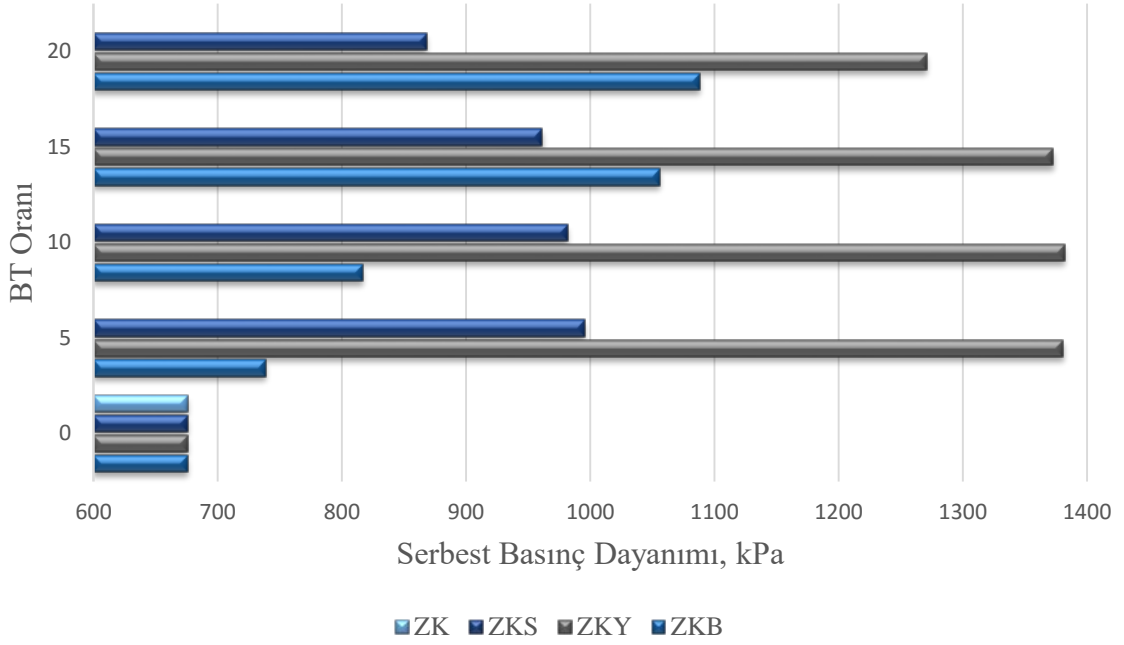
Şekil 3.36. DÇÇ sonrası ZKY karışımlarının serbest basınç dayanımları



Şekil 3.37. DÇÇ sonrası ZKB karışımlarının serbest basınç dayanımları



Şekil 3.38. DÇÇ sonrası ZKS karışımlarının serbest basınç dayanımları



Şekil 3.39. DÇÇ sonrası kireçli karışımların serbest basınç dayanımı değişimi

3.1.5. Şişme Yüzdesi Deneyi

Serbest şişme yüzdesi deneyi, zeminlerin şişme potansiyellerinin tahmininde çok yaygın kullanılan bir yöntemdir. Çalışma kapsamında hazırlanan karışımların serbest şişme yüzdesi miktarları belirlenmiştir. Deneyler için hazırlanan örnekler Şekil 3.40'ta gösterilmiştir.



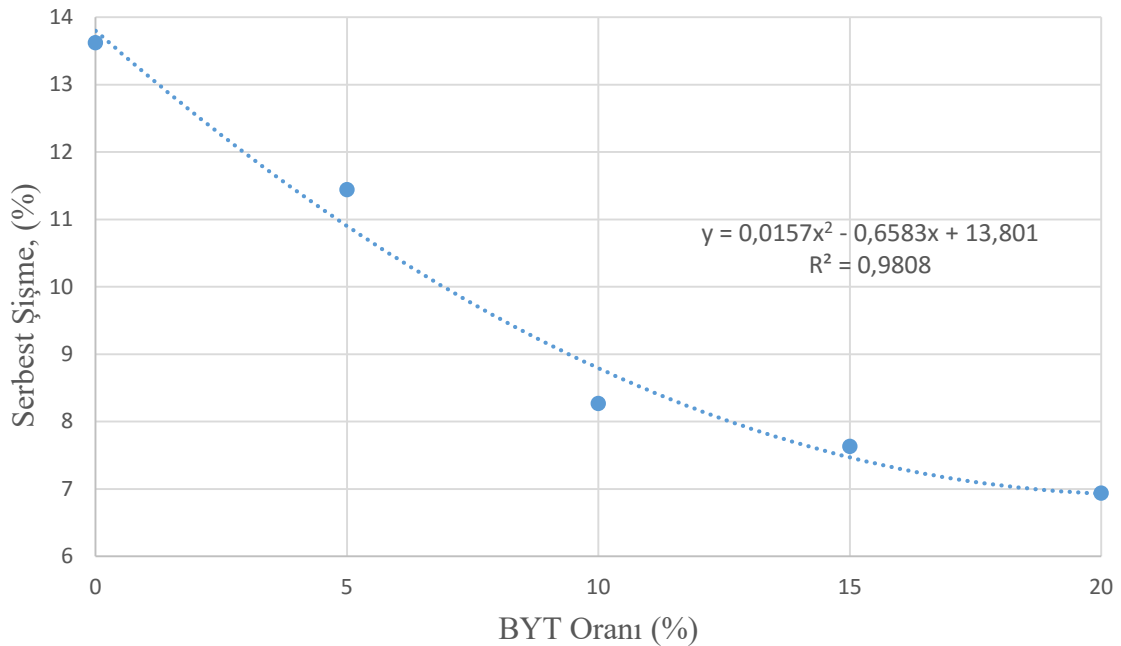
Şekil 3.40. Şişme yüzdesi deney numuneleri

Yapılan deneyler sonucunda, optimum kireç oranında hazırlanan ZK karışımlarının şişme davranışının tamamen ortadan kalktığı tespit edilmiştir. ZKY, ZKB ve ZKS karışımlarının farklı oranlarında da herhangi bir şişme meydana gelmemiştir. Deney sonrası örneklerin, oldukça rijit bir yapıda olduğu gözlemlenmiştir. İçeriğinde kireç bulunan karışımların tümünde şişmenin meydana gelmediğinin tespit edilmesinin ardından kireçsiz karışımların deneylerine geçilmiştir.

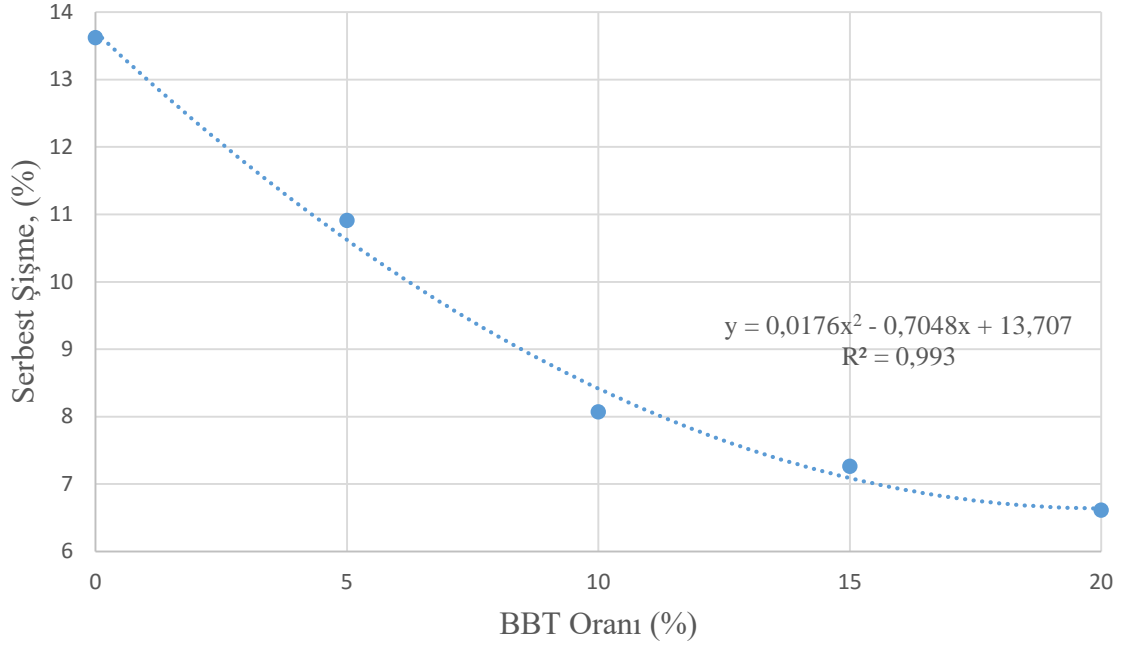
Tablo 3.20. ZY, ZB ve ZS karışımlarının serbest şişme yüzdesi değerleri

Notasyon	Serbest şişme, (%)	Notasyon	Serbest şişme, (%)	Notasyon	Serbest şişme, (%)
Z	13.62	Z	13.62	Z	13.62
ZY5	11.44	ZB5	10.91	ZS5	12.04
ZY10	8.27	ZB10	8.07	ZS10	9.41
ZY15	7.63	ZB15	7.26	ZS15	8.13
ZY20	6.94	ZB20	6.61	ZS20	7.49

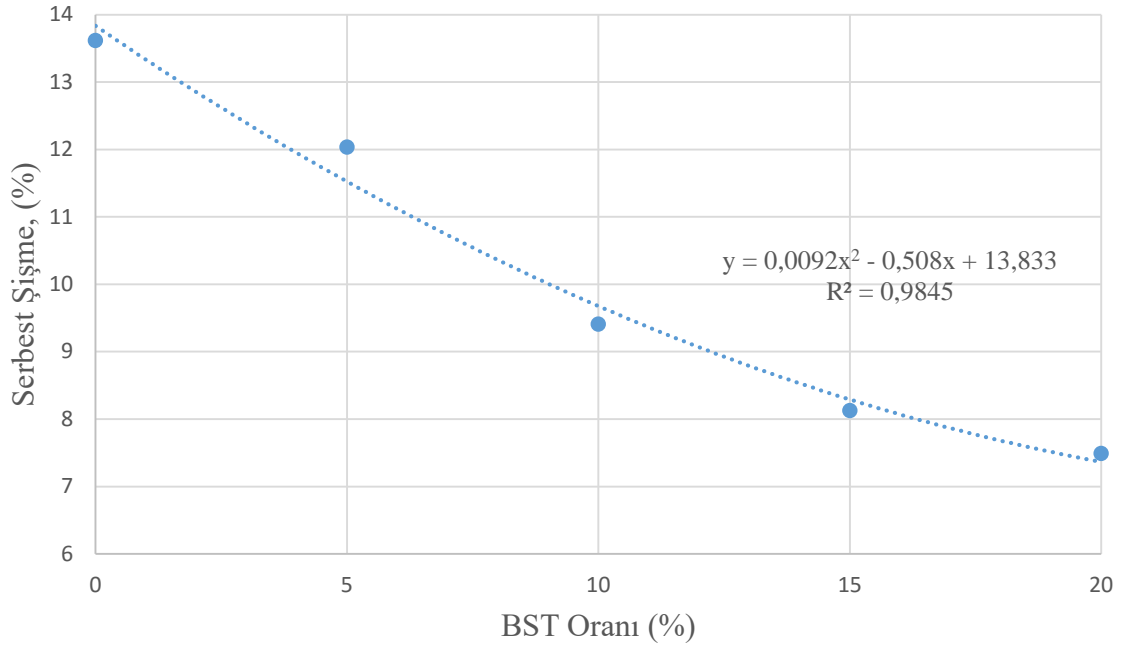
Kireçsiz ZY, ZB ve ZS karışımları üzerinde yapılan deneylere ait serbest şişme yüzdesi değerleri Tablo 3.20’de sunulmuştur. Deney sonuçları, yeşil, beyaz ve sarı renkteki BT atıklarının tek başlarına doğal zeminle karıştırılmaları sonucu, zeminin şişme davranışında azalmaların meydana geldiğini göstermektedir. Artan BT atıkları oranında, azalan serbest şişme yüzdesi değerleri elde edilmiştir. Her üç BT atıklarının da şişme yüzdeleri bakımından birbirine benzer sonuçlar verdiği tespit edilmiştir. En iyi veriler ise ZB20 karışımından elde edilmiştir. Deneyden çıkarılan numunelerin oldukça likit bir kıvamda olduklarını söylemek mümkündür. ZY karışımlarının serbest şişme yüzdesi değerleri Şekil 3.41’de, ZB karışımlarının serbest şişme yüzdesi değerleri Şekil 3.42’de, ZS karışımlarının serbest şişme yüzdesi değerleri ise Şekil 3.43’te sunulmuştur.



Şekil 3.41. ZY karışımlarının serbest şişme yüzdesi değerleri



Şekil 3.42. ZB karışımlarının serbest şişme yüzdesi değerleri



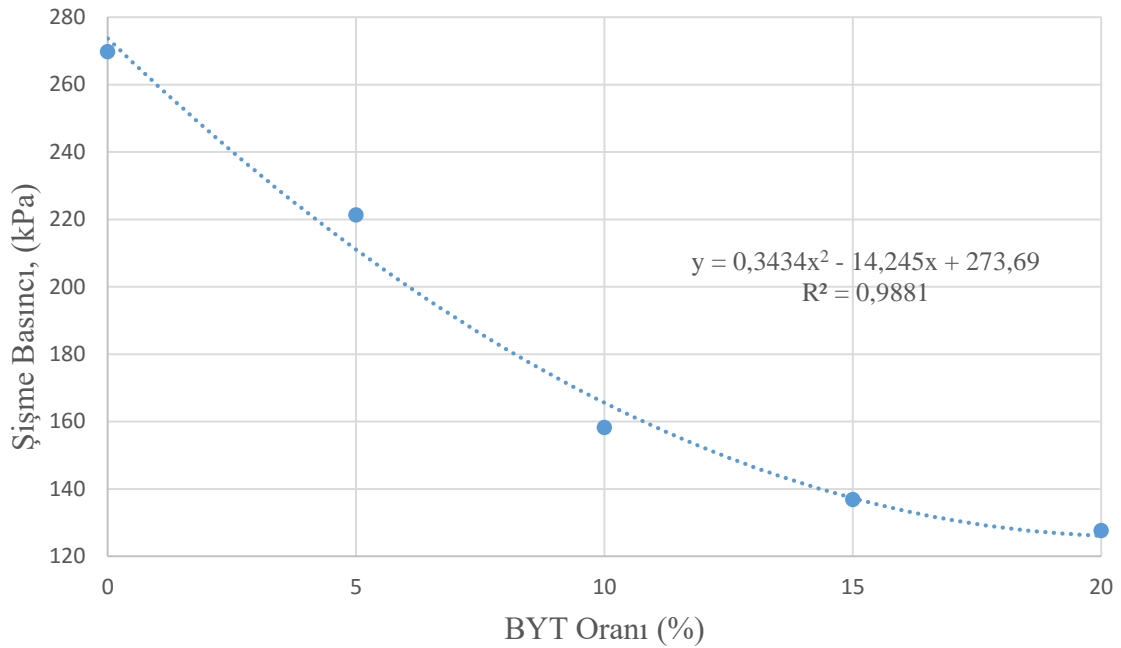
Şekil 3.43. ZS karışımlarının serbest şişme yüzdesi değerleri

3.1.6. Şişme Basıncı Deneyi

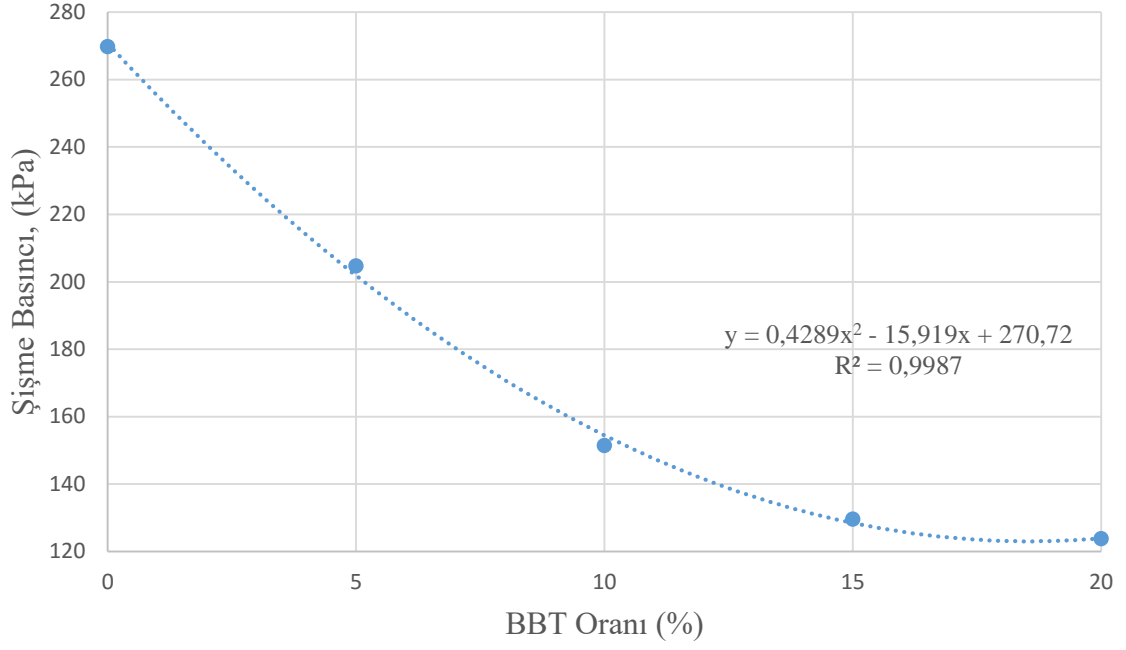
Serbest şişme deneyleri sonucunda kireçli karışımların şişme davranışının tamamen ortadan kalktığı belirlendiği için sadece kireçsiz karışımlar üzerinde yapılan şişme basıncı deneyleri sonucunda, zeminin şişme basıncı değerlerinin artan oranlarda katılan BT atıklarıyla azaldığı tespit edilmiştir. Doğal zeminin şişme basıncı 269.8 kPa olarak belirlenirken, %20 oranında BBT atığı ilave edilerek hazırlanan karışımlarda bu değer 123.8 kPa olmuştur. ZY, ZB ve ZS karışımlarının şişme basıncı değerleri Tablo 3.21’de, ZY karışımlarının şişme basıncı grafiği Şekil 3.44’te, ZB karışımlarının şişme basıncı grafiği Şekil 3.45’de, ZS karışımlarının şişme basıncı grafiği Şekil 3.46’de sunulmuştur.

Tablo 3.21. ZY, ZB ve ZS karışımlarının şişme basıncı değerleri

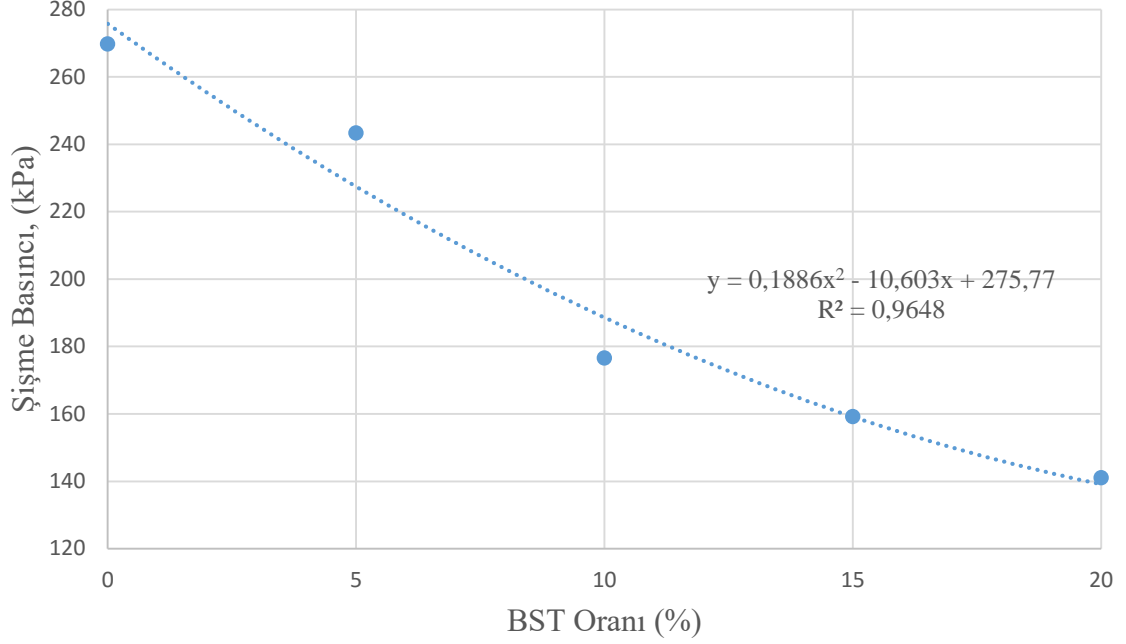
Notasyon	Şişme basıncı, (kPa)	Notasyon	Şişme basıncı, (kPa)	Notasyon	Şişme basıncı, (kPa)
Z	269.8	Z	269.8	Z	269.8
ZY5	221.3	ZB5	204.7	ZS5	243.4
ZY10	158.2	ZB10	151.4	ZS10	176.6
ZY15	136.9	ZB15	129.6	ZS15	159.2
ZY20	127.6	ZB20	123.8	ZS20	141.1



Şekil 3.44. ZY karışımlarının şişme basıncı değerleri



Şekil 3.45. ZB karışımlarının şişme basıncı değerleri



Şekil 3.46. ZS karışımlarının şişme basıncı değerleri

3.1.7. Bilgisayarlı Tomografi ile Numunelerin Analizi

Çalışma kapsamında hazırlanan karışımların bilgisayarlı tomografi yöntemi ile analiz edilmesinin ana gayesi, serbest basınç dayanımı verileri (SBD) ile tomografi değerlerinin (HU) arasında bir ilişkinin var olup olmadığını tespit etmektir. Buna göre öncelikle karışımların tomografi görüntüleri elde edilmiştir, ardından bu görüntüler 3D Doctor programında analiz edilmiştir ve son olarak elde edilen HU değerleri ile SBD değerleri arasında bir ilişkinin var olup olmadığı SPSS 18.0 paket programı kullanılarak yapılan regresyon ve korelasyon analizleri ile belirlenmiştir.

Bilgisayarlı tomografi kullanılarak yapılan analizler Bayburt Devlet Hastanesi Radyoloji Bölümü Bilgisayarlı Tomografi Görüntüleme Merkezi'nde Toshiba marka Alexion model bilgisayarlı tomografi cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Görüntülemenin yapıldığı bilgisayarlı tomografi cihazı Şekil 3.47'de sunulmuştur.



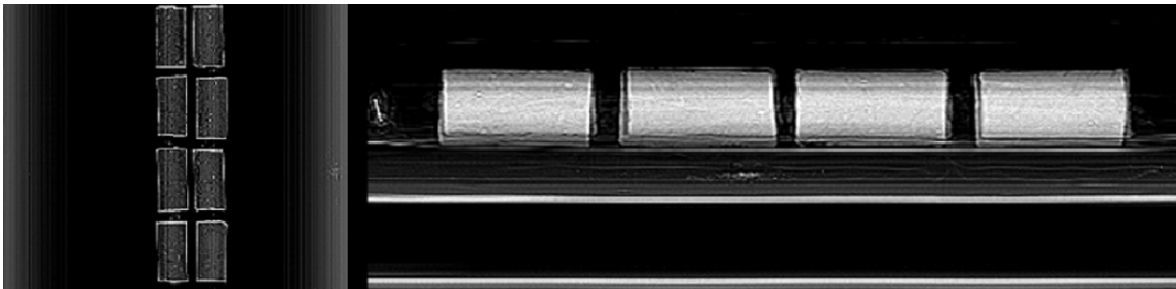
Şekil 3.47. Bilgisayarlı tomografi cihazı

Yükseklikleri 76 mm ve çapları 38 mm olan numuneler 95 mm'lik bir görüntü alanı kullanılarak görüntülenmiştir. Taramalar 100 keV enerji düzeyinde, 200 mA akımda ve 0.5 mm kesit kalınlığında gerçekleştirilmiştir. Yapılan taramalarda kullanılan enerji düzeyleri, literatürde zemin için bir enerji düzeyi değeri bulunmadığından beton numunelerin çekildiği enerji düzeyleri dikkate alınarak belirlenmiştir. Yapılan analizin hassasiyetini belirlemedeki en önemli unsur kesit kalınlığının belirlenmesidir. 76 mm uzunluğundaki bir numuneye 0.5 mm kesit kalınlığında tomografi çekimi, her bir numune için 152 kesitin taranması demektir. Taranan kesit kalınlığının küçük olması analizin hassasiyetini arttırmaktadır (Akın, 1996; Wellington, 1990).

Bilgisayarlı tomografi cihazına yerleştirilen numuneler Şekil 3.48'de, bu numunelerin üstten ve yandan tomografik görüntüleri ise Şekil 3.49'da sunulmuştur.



Şekil 3.48. Numunelerin bilgisayarlı tomografi cihazına yerleştirilmesi



Şekil 3.49. Bilgisayarlı tomografi numunelerinin üstten ve yandan görünümü

Bilgisayarlı tomografi cihazından elde edilen görüntüler DICOM formatlı dosyalardır. Bu dosyalar 512×512 piksel boyutunda olup, 16 bit renk derinliğine sahiptir. Buna göre, bir numune için taranan 152 kesitin her birinde 262144 adet piksel bulunmaktadır. Elde edilen tomografi görüntüleri bu piksellere göre siyah ile beyaz arasında kalan renk tonlarından meydana gelmektedir. Bilgisayarlı tomografinin çalışma prensibinde her bir piksele ve taranan kesitlerdeki siyah ve beyaz arasındaki her bir renk tonuna karşılık gelen bir HU değeri bulunmaktadır. Çalışma kapsamında karışımların 28 günlük kür süresi sonundaki ve donma çözülme çevrimi sonrası tomografi görüntülerinin analizinden elde edilen ortalama HU değerleri, tüm numunelerdeki farklı 152 kesitin her bir kesitinde yer alan 262144 adet pikselin 3D Doctor programında analizi sonucunda bulunmuştur.

Bilgisayarlı tomografi görüntülerinin 3D Doctor programında analiz edilmesinin ardından, katkısız zemine ait ortalama HU değeri 1 günlük numunelerde 1580 olarak bulunmuştur. Literatür çalışmalarına göre betonun HU değeri 1800 olarak tespit edildiğinden, doğal zemin için bulunan HU değerinin literatürle uyumlu olduğu sonucuna varılmıştır.

Çalışma kapsamında SBD ile HU arasındaki ilişki kireçsiz ve kireçli karışımlar için ayrı ayrı incelenmiştir. Tablo 3.22’de kireçsiz karışımların 28 günlük kür süresi ve DÇÇ sonundaki HU ve SBD değerleri verilmiştir.

Tablo 3.22. Kireçsiz karışımların HU ve SBD değerleri

Notasyon	28 günlük SBD (kPa)	HU	DÇÇ sonrası SBD (kPa)	DÇÇ sonrası HU
Z	118.46	1582	88.77	1579
ZY5	115	1582	94.25	1580
ZY10	123.04	1582	96.84	1580
ZY15	119.33	1582	96.91	1580
ZY20	121.49	1582	97.05	1580
ZB5	143.5	1591	89.26	1579
ZB10	114.79	1592	91.16	1580
ZB15	148.12	1594	102.03	1588
ZB20	184.18	1602	119.78	1596
ZS5	136.62	1588	90.36	1581
ZS10	142.06	1589	91.67	1581
ZS15	158.24	1593	105.05	1583
ZS20	140.95	1589	99.88	1582

HU ve SBD arasındaki ilişkiyi belirlemek için öncelikle kireçsiz karışımların 28 gün kür süresi sonundaki değerleri incelenmiştir. HU ve SBD arasında anlamlı bir ilişkinin olup olmadığını tespit edebilmek için ilgili ölçüm değerlerine basit korelasyon analizi uygulanmıştır. Kireçsiz karışımların toplam numune sayısı CH kili ile birlikte toplam 13'tür. Çalışmadaki veri sayısı az olduğu için (N=13) basit korelasyon analizinde Spearman's rho korelasyon testi kullanılmıştır. Spearman's rho korelasyon testi örneklem sayısının düşük olduğu durumlarda ya da verilerin normal dağılmadığı durumlarda kullanılır (Field, 2009). Tablo 3.23'te Spearman's rho testi sonuçları verilmiştir.

Tablo 3.23. Kireçsiz karışımların Spearman's rho korelasyon testi sonucu

	Serbest basınç dayanımı	Tomografi değerleri
Serbest basınç dayanımı	1	
Tomografi değerleri	0.97	1

Tablo 3.23'te verilen kireçsiz karışımların Spearman's rho testi sonucuna göre, serbest basınç dayanımı ile tomografi değerleri arasında pozitif yönlü anlamlı düzeyde ilişki olduğu tespit edilmiştir ($r=0.97$, $p<0.01$). Buna göre serbest basınç dayanımı değerlerindeki artışların tomografi değerlerini arttıracacağı söylenebilir.

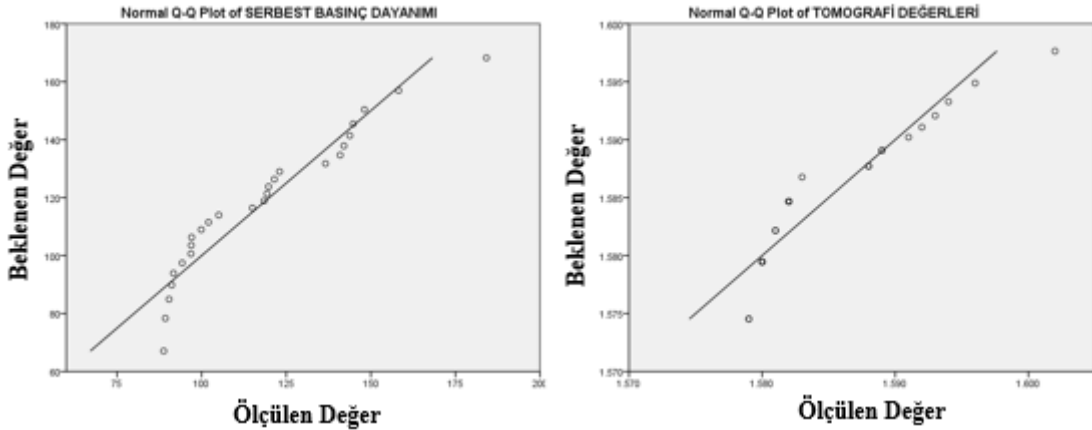
Kireçsiz karışımların 28 günlük kür süresi sondaki HU ve SBD değerleri arasındaki ilişkinin incelenmesinin ardından, bu karışımların DÇÇ çevrimi sonrası değerleri arasındaki ilişki incelenmiştir. Toplam veri sayısı az olduğu için (N=13) basit korelasyon analizinde Spearman's rho korelasyon testi kullanılmıştır. Tablo 3.24'te kireçsiz karışımların DÇÇ sonrası Spearman's rho testi sonuçları verilmiştir.

Tablo 3.24. Kireçsiz karışımların DÇÇ sonrası Spearman's rho korelasyon testi sonucu

	Serbest basınç dayanımı	Tomografi değerleri
Serbest basınç dayanımı	1	
Tomografi değerleri	0.76	1

Tablo 3.24'te verilen kireçsiz karışımların DÇÇ sonrası Spearman's rho testi sonucuna göre, serbest basınç dayanımı ile tomografi değerleri arasında pozitif yönlü anlamlı düzeyde ilişki olduğu tespit edilmiştir ($r=0.76$, $p<0.01$). Buna göre serbest basınç dayanımı değerlerindeki artışların tomografi değerlerini arttıracacağı söylenebilir.

Kireçsiz karışımların korelasyon analizleri DÇÇ öncesi ve sonrasında ayrı ayrı yapıldıktan sonra, bu iki durumdaki değerler beraber ele alınmıştır. Veri sayısı parametrik test yapmak için uygun olduğundan ($N=26$) normallik varsayımları test edilmiştir. Verilerin normal dağılıp dağılmadığını incelemek için Kolmogorov-Smirnov testi yapılmış, Q-Q (kutu-bıyık) grafiği çizilmiş ve basıklık çarpıklık değerlerine bakılmıştır (Seçer, 2013; Durmuş vd., 2013). Kolmogorov-Smirnov testi sonucunda serbest basınç dayanımı verilerinin normal dağıldığı görülmüş ($p=0.58>0.05$), tomografi değerlerinin ise normal dağılıma uymadığı belirlenmiştir ($p=0.04<0.05$). Q-Q grafiğine bakıldığında tomografi değerlerindeki iki ölçüm dışında normalden önemli ölçüde sapma olmadığı görülmüştür. Şekil 3.50'de serbest basınç dayanımı ve tomografi değerlerine ait Q-Q grafikleri yer almaktadır.



Şekil 3.50. Kireçsiz karışımlarda HU ve SBD değerlerinin Q-Q grafikleri

Son olarak basıklık ve çarpıklık değerlerine bakılmıştır. Basıklık ve çarpıklık değerleri -1, +1 aralığında bulunmuş olup verilerin normal dağıldığı belirlenmiştir (Howell, 2010). Verilerin normal dağılması nedeniyle korelasyon analizinde Pearson katsayısı kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar Tablo 3.25'te sunulmuştur.

Tablo 3.25. Kireçsiz karışımların korelasyon testi sonucu

	Serbest Basınç Dayanımı	Tomografi Değerleri
Serbest Basınç Dayanımı	1	
Tomografi Değerleri	0.87	1

Tablo 3.25 incelendiğinde serbest basınç dayanımı ile tomografi değerleri arasında pozitif yönlü anlamlı düzeyde ilişki olduğu tespit edilmiştir ($r=0.87$, $p<0.01$). Buna göre serbest basınç dayanımı değerlerinin artmasının tomografi değerlerini arttıracığı söylenebilir. Serbest basınç değerinin tomografi değerleriyle yordanıp yordanmadığını (tahmin edilip edilemediğini) belirlemek için verilere regresyon analizi yapılmıştır. Regresyon analizi ANOVA'sı sonucunda $p<0.05$ bulunmuş olup, bu değer regresyon sonucunun anlamlı olduğunu ifade etmektedir (Field, 2009). Regresyon analizi sonuçları Tablo 3.26'da sunulmuştur.

Tablo 3.26. Kireçsiz karışımların regresyon analizi sonuçları

Değişken	Standart				
	B	hata	β	t	p
Sabit	-5522.484	651.441		-8.477	0,000
Tomografi Değerleri	3.56	0.411	0.870	8.658	0,000

Tablo 3.26 incelendiğinde tomografi değerlerinin serbest basınç değeri ile yüksek düzeyde anlamlı bir ilişkiye sahip olduğu görülmektedir ($r=0.87$, $r^2=0.76$, $p<0.01$). Buna göre tomografi değerleri toplam varyansın %76'sını açıklamaktadır. Standardize edilmiş β katsayısı yordayan (tahmin eden) değişkende meydana gelen 1 birimlik değişimin yordanan (tahmin edilen) değişkende ne kadar değişime sebep olacağını gösterir (Seçer, 2013). Standardize edilmiş β katsayısı ve t değerleri incelendiğinde tomografi değerlerinin serbest basınç değeri için anlamlı bir yordayıcı olduğu tespit edilmiştir. Mevcut karışımlar için yapılan basit doğrusal regresyon analizi sonucunda ε_i hata payı eklenerek;

$$SBD = (3.56 \times HU) - 5522.48 + \varepsilon_i$$

modeli elde edilmiştir.

Kireçsiz karışımların SBD ile HU verileri arasındaki ilişki incelendikten sonra kireçli karışımlar için aynı çalışmalar yapılmıştır. Tablo 3.27’de kireçli karışımların 28 günlük kür süresi ve DÇÇ sonundaki HU ve SBD değerleri verilmiştir.

Tablo 3.27. Kireçli karışımların HU ve SBD değerleri

Notasyon	28 günlük SBD (kPa)	HU	DÇÇ sonrası SBD (kPa)	DÇÇ sonrası HU
ZK	1072.23	1645	675.42	1612
ZKY5	1540.29	1667	1380.49	1650
ZKY10	1463.93	1654	1382.05	1650
ZKY15	1472.84	1654	1372.48	1650
ZKY20	1363.02	1651	1270.76	1649
ZKB5	1336.83	1650	738.45	1619
ZKB10	1651.59	1671	816.85	1620
ZKB15	1547.52	1667	1055.61	1630
ZKB20	1352.68	1651	1087.79	1630
ZKS5	1251.22	1649	995.56	1628
ZKS10	1245.29	1649	981.89	1628
ZKS15	1210.58	1649	961.12	1628
ZKS20	1114.87	1648	868.16	1623

Kireçli karışımlarda HU ve SBD arasında anlamlı bir ilişkinin olup olmadığını tespit edebilmek için ilgili ölçüm değerlerine basit korelasyon analizi uygulanmıştır. Kireçli karışımların Spearman’s rho testi sonuçları Tablo 3.28’de verilmiştir.

Tablo 3.28. Kireçli karışımların Spearman’s rho korelasyon testi sonucu

	Serbest basınç dayanımı	Tomografi değerleri
Serbest basınç dayanımı	1	
Tomografi değerleri	0.99	1

Tablo 3.28’de verilen kireçli karışımların Spearman’s rho testi sonucuna göre, serbest basınç dayanımı ile tomografi değerleri arasında pozitif yönlü anlamlı düzeyde ilişki olduğu tespit edilmiştir ($r=0.99$, $p<0.01$). Buna göre serbest basınç dayanımı değerlerindeki artışların tomografi değerlerini arttıracığı söylenebilir.

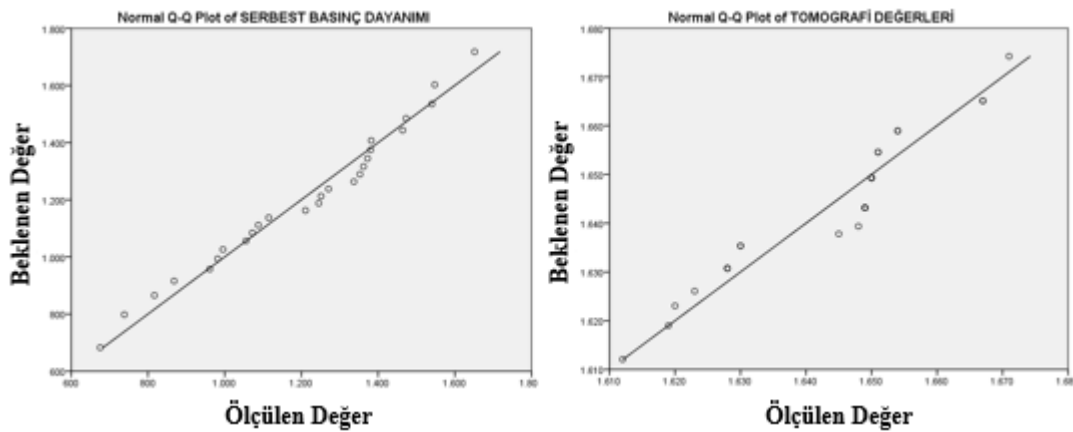
Kireçli karışımların DÇÇ çevrimi sonrası Spearman's rho korelasyon testi sonuçları Tablo 3.29'da verilmiştir.

Tablo 3.29. Kireçli karışımların DÇÇ sonrası Spearman's rho korelasyon testi sonucu

	Serbest basınç dayanımı	Tomografi değerleri
Serbest basınç dayanımı	1	
Tomografi değerleri	0.99	1

Tablo 3.29'da verilen kireçli karışımların DÇÇ sonrası Spearman's rho testi sonucuna göre, serbest basınç dayanımı ile tomografi değerleri arasında pozitif yönlü anlamlı düzeyde ilişki olduğu tespit edilmiştir ($r=0.99$, $p<0.01$). Buna göre serbest basınç dayanımı değerlerindeki artışların tomografi değerlerini arttıracığı söylenebilir.

Kireçli karışımların DÇÇ öncesi ve sonrası durumları beraber incelendiğinde, Kolmogorov-Smirnov testi sonucunda serbest basınç dayanımı verilerinin normal dağıldığı görülmüştür ($p=0.83>0.05$). Tomografi değerlerinin de aynı şekilde normal dağılıma sahip olduğu tespit edilmiştir ($p=0.11>0.05$). Q-Q grafiğine bakıldığında tomografi değerlerindeki normalden önemli ölçüde sapma olmadığı görülmüştür. Şekil 3.51'de serbest basınç dayanımı ve tomografi değerlerine ait Q-Q grafikleri yer almaktadır.



Şekil 3.51. Kireçli karışımlarda HU ve SBD değerlerinin Q-Q grafikleri

Son olarak basıklık ve çarpıklık değerlerine bakılmıştır. Basıklık ve çarpıklık değerleri -1, +1 aralığında bulunmuş olup, verilerin normal dağılması nedeniyle korelasyon

analizinde Pearson katsayısı kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar Tablo 3.30'da sunulmuştur.

Tablo 3.30. Kireçli karışımların korelasyon testi sonucu

	Serbest Basınç Dayanımı	Tomografi Değerleri
Serbest Basınç Dayanımı	1	
Tomografi Değerleri	0.96	1

Tablo 3.30 incelendiğinde serbest basınç dayanımı ile tomografi değerleri arasında pozitif yönlü anlamlı düzeyde ilişki olduğu tespit edilmiştir ($r=0.96$, $p<0.01$). Buna göre serbest basınç dayanımı değerlerinin artmasının tomografi değerlerini arttıracığı söylenebilir. Serbest basınç değerinin tomografi değerleriyle yordanıp yordanmadığını (tahmin edilip edilemediğini) belirlemek için verilere regresyon analizi yapılmıştır. Regresyon analizi ANOVA'sı sonucunda $p<0.05$ bulunmuş olup, bu değer regresyon sonucunun anlamlı olduğunu ifade etmektedir (Field, 2009). Regresyon analizi sonuçları Tablo 3.31'de sunulmuştur.

Tablo 3.31. Kireçli karışımların regresyon analizi sonuçları

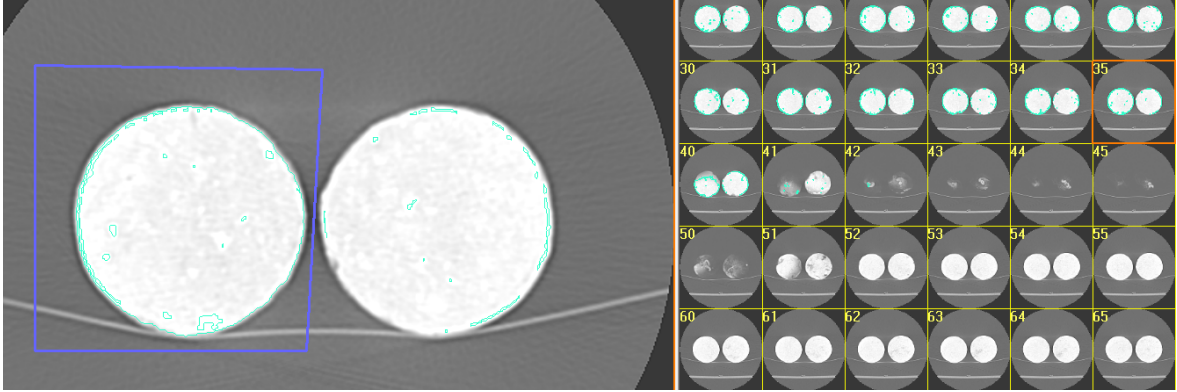
Değişken	Standart		β	t	p
	B	hata			
Sabit	-25157.72	1501.748		-16.75	0,000
Tomografi Değerleri	16.04	0.914	0.963	17.55	0,000

Tablo 3.31 incelendiğinde tomografi değerlerinin serbest basınç değeri ile yüksek düzeyde anlamlı bir ilişkiye sahip olduğu görülmektedir ($r=0.96$, $r^2=0.93$, $p<0.01$). Buna göre tomografi değerleri toplam varyansın %93'ünü açıklamaktadır. Standardize edilmiş β katsayısı ve t değerleri incelendiğinde tomografi değerlerinin serbest basınç değeri için anlamlı bir yordayıcı olduğu tespit edilmiştir. Basit doğrusal regresyon analizi sonucunda;

$$\text{SBD} = (16.04 \times \text{HU}) - 25157.72 + \varepsilon_i$$

modeli elde edilmiştir.

Doğal zemine katkıların ilave edilmesiyle yapılan stabilizasyon çalışması neticesinde, hazırlanan karışımların kür süresi ve DÇÇ sonunda iç yapılarında değişimler meydana gelmiştir. Bu iç yapıdaki değişimler 3D Doctor programında makro boşluk oranı gelişimi analiz edilerek incelenmiştir. Makro boşluk oranı analizi yapılırken önce ilgilene kesit belirlenmelidir. Daha sonra bu kesitin sınır değerleri oluşturulur. Düşük HU değerlerine sahip bölgeler de yine sınır şartları ile gösterilir. Bu durumun 3D Doctor programındaki gösterimi Şekil 3.52’de yer almaktadır. Mavi renkteki dörtgen ilgilene alanı temsil eder. Bu alan bir numunedeki 152 kesit boyunca aynı şekilde alınır. Turkuaz bölgeler ise sınır şartlarını göstermektedir. Şekilden görülebileceği üzere sınır şartlar numunenin çevresi ve HU değeri oldukça düşük olan bölgelerden oluşmaktadır. Yandaki küçük kesitler incelendiğinde sınır şartların tüm kesitlerde ayrı ayrı oluştuğu görülmektedir. Makro boşluk yapısı incelenirken ve sınır şartlar oluşturulurken boşluklu alanlar çıkarılmıştır ve buna göre hacim hesaplanmıştır.

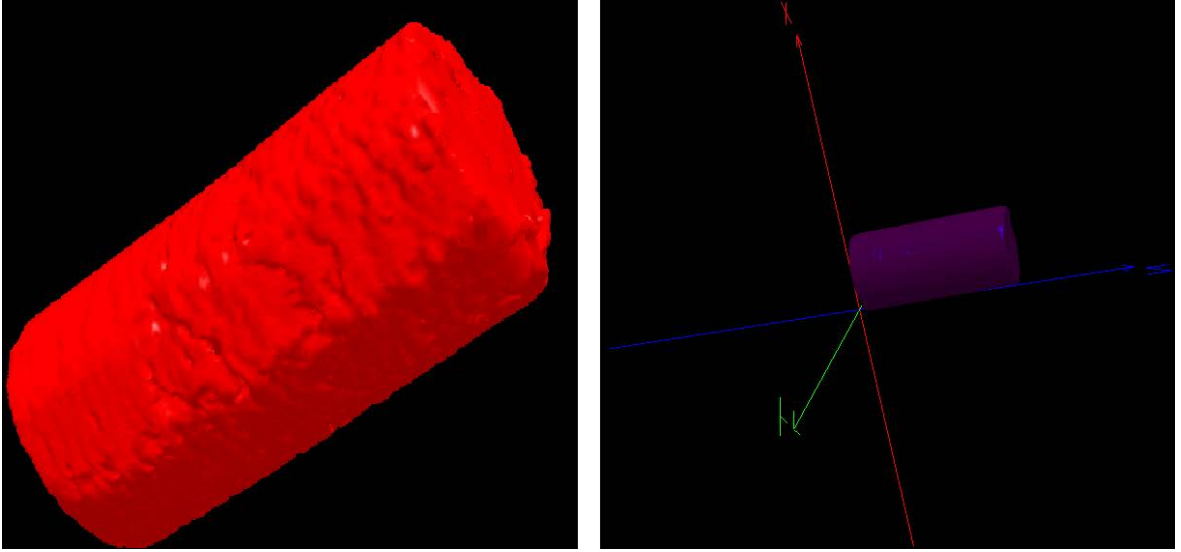


Şekil 3.52. Hesap yapılacak alanın ve sınır şartlarının belirlenmesi

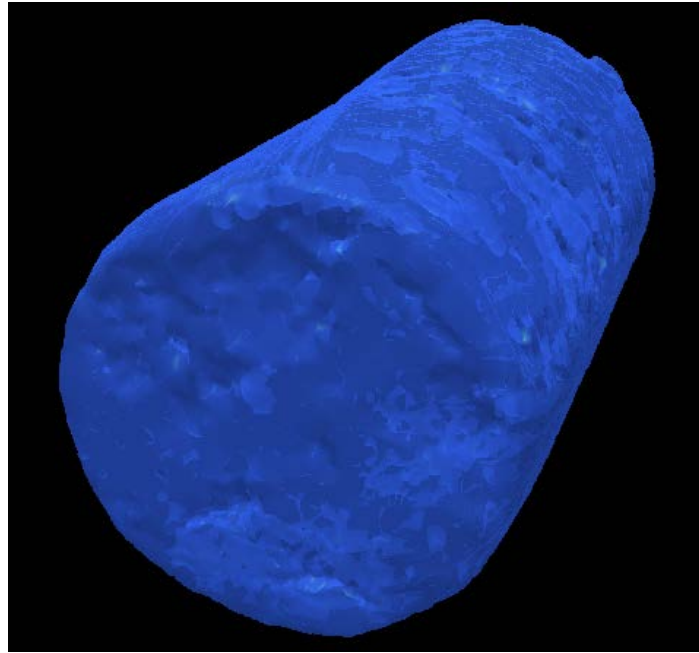
Çapı 38 mm ve yüksekliği 76 mm olan numunelerin hacmi 86193 mm^3 'tür. Bu değer silindirin hacminin hesaplanması ile elde edilmiştir. Fakat uygulamada, numune hazırlanırken ve örnek alıcı ile örneklerin alınımında tam olarak bu hacimde örnek alınması oldukça zordur. Numune yüksekliğindeki ve çapındaki milimetrik oynamalar veya küçük girinti ve çıkıntılar birbirine oldukça yakın fakat rakamsal olarak farklı hacimlerde numunelerin elde edilmesine yol açar. Bu yüzden makro boşlukların gelişim analizinde öncelikle karışımların gerçek hacimleri 3D Doctor programı ile ölçülmüş ve ardından hacimsel değişimler incelenmiştir. Karışımların HU ve SBD değerleri incelendiğinde kireçsiz karışımlarda en yüksek değerler ZB20 karışımından, kireçli karışımlarda ise

ZKB10 karışımından elde edilmiştir. Bu sebepten dolayı makro boşluk gelişim analizi Z, ZK, ZB20 ve ZKB10 karışımlarında incelenmiştir.

Programdan elde edilen üç boyutlu görünüm ve bu üç boyutlu örneğin eksenler üzerindeki gösterimi Şekil 3.53'te verilmiştir. Şekil 3.54'te ise üç boyutlu numune içi görüntülenebilecek saydamlığa getirilmiş ve bu numunedeki yoğun bölgelerin görüntülenebilmesi sağlanmıştır.

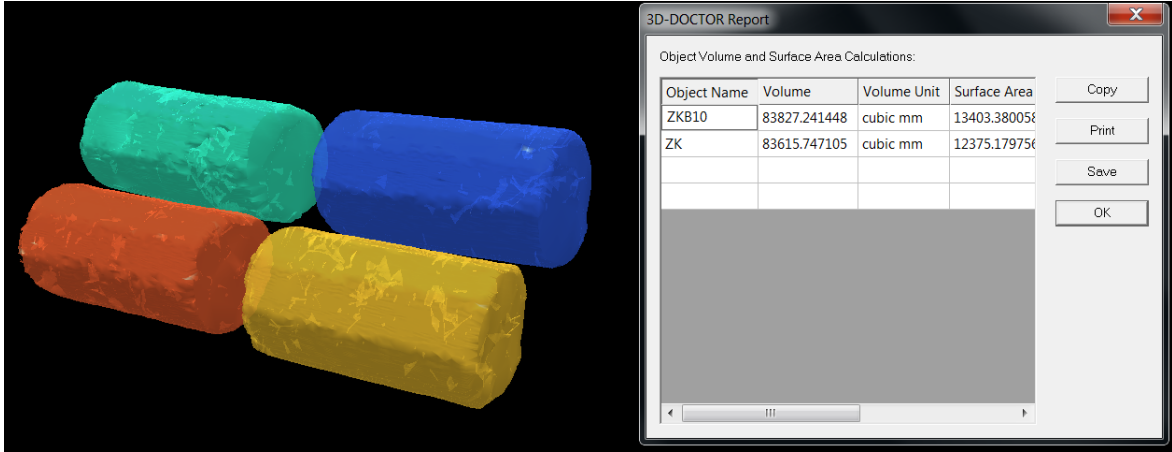


Şekil 3.53. Numunelerin üç boyutlu görünümü ve eksenler üzerine yerleştirilmesi



Şekil 3.54. Numunedeki farklı HU değerlerindeki bölgelerin görünümü

Z, ZK, ZB20 ve ZKB10 karışımlarının hacim analizleri yapılırken 1 günlük ve 28 günlük kür sürelerindeki değerleri ile DÇÇ sonrasındaki değerleri hesaplanmıştır. Örnek teşkil etmesi açısından ZK ve ZKB10 karışımlarının 28. gün bilgisayarlı tomografi görüntülerinin 3D Doctor programında hacimsel analizi Şekil 3.55'te sunulmuştur.



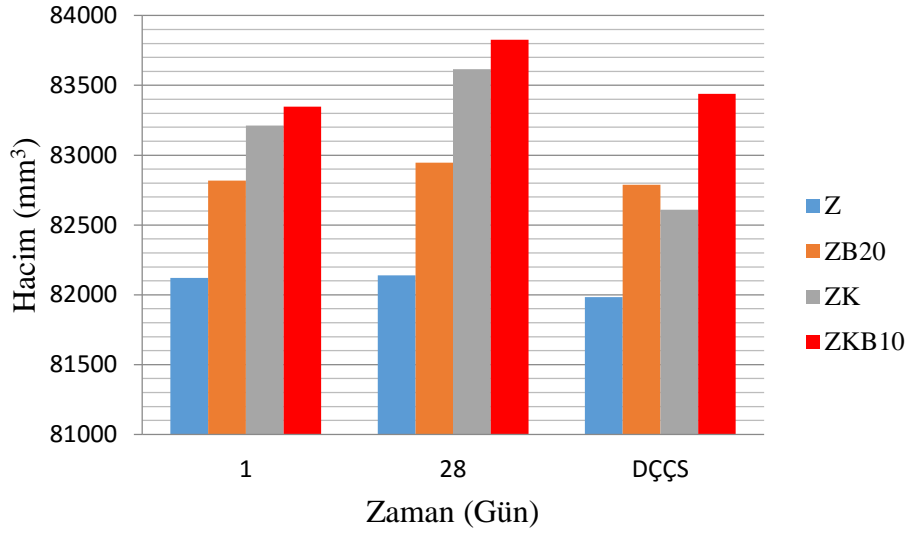
Şekil 3.55. 3D Doctor programında kireçli numunelerin 28. gün hacim analizi

Karışımların hacim hesabında, katı kısımların hacmi esas alınmıştır. Şekil 3.52'de sunulduğu üzere boşluklu yerler sınır şartları getirilerek hacme katılmamıştır. 28 günlük ve DÇÇ sonrası bilgisayarlı tomografi görüntüleri çekilen malzemelerin hacim değerleri ise bu makro boşlukların değişimini ifade etmektedir.

Hazırlanan karışımlarda meydana gelen hacimsel değişimler Tablo 3.32'de, bu değerlere ait grafik ise Şekil 3.56'da yer almaktadır.

Tablo 3.32. Karışımların hacimsel değişimleri

Notasyon	1. gün hacim (mm ³)	28. gün hacim (mm ³)	DÇÇ sonrası hacim (mm ³)
Z	82121	82139	81983
ZB20	82818	82946	82787
ZK	83211	83615	82609
ZKB10	83347	83827	83438



Şekil 3.56. Karışımların hacimlerinde meydana gelen değişimler

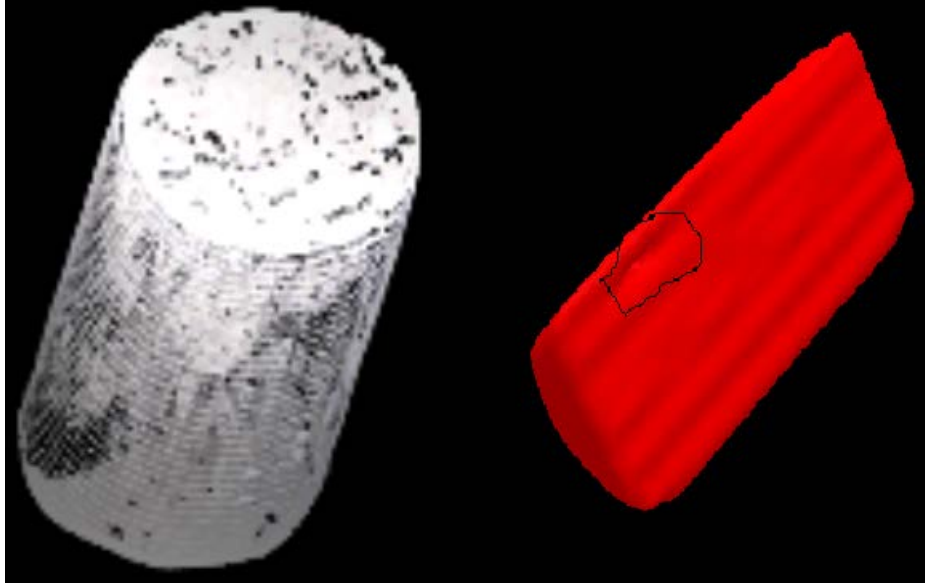
Bilgisayarlı tomografi görüntüleri 3D Doctor programında analiz edilen Z, ZB20, ZK ve ZKB10 karışımlarının hacimlerdeki değişimleri sunan Tablo 3.32 ve Şekil 3.56 verilerine göre karışımların ilk gündeki hacimlerinin 28 günlük kür sonunda değiştiği tespit edilmiştir. Bu meydana gelen değişimler malzemenin boşluk yapısında değişimlerin meydana geldiğini gösterir.

Doğal zemin numunelerinin 1 ve 28 günlük hacimleri ile DÇÇ sonrası hacimleri incelendiğinde kayda değer bir hacimsel değişimin oluşmadığı, sadece DÇÇ sonrası daha boşluklu bir yapının meydana gelmesi neticesiyle hacim değerinde azalmanın meydana geldiği tespit edilmiştir.

ZB20 karışımlarında ilk hacme göre az da olsa bir artış, DÇÇ sonrası ise azalma tespit edilmiştir. Kireçli ve kireçsiz karışımların HU değerlerindeki ve serbest basınç dayanımı verilerindeki değişim ile hacimsel değişim verileri beraber incelendiğinde, elde edilen verilerin birbirini destekler nitelikte olduğu ve tek eksenli serbest basınç dayanımı verileriyle örtüşen değerlerin ortaya çıktığı tespit edilmiştir.

ZK karışımlarında 28 günlük kür süresi sonunda hacimsel artış meydana gelmiştir. ZKB10 karışımlarında ise bu artış sadece kireçli karışıma nazaran daha fazladır. ZK karışımlarının DÇÇ sonrası içinde daha çok boşlukların meydana gelmesinden dolayı hacminde daha büyük azalmalar oluşurken, ZKB10 karışımlarında daha durabilitesi yüksek bir yapı gözlemlenmiştir.

Bilgisayarlı tomografi tekniğiyle beraber ölçülen tüm hacimler boşlukların çıkarılıp katı hacmin ölçülmesi ile sağlanmıştır. Bu yüzden ölçülen ilk hacimlerin ardından, 28. gün değerlerinde artışlar meydana gelmiştir. Farklı karışım örneklerinde farklı miktarlarda meydana gelen bu hacimsel artış, 28 günlük kür süresince suyun varlığında desikatör içinde meydana gelen kimyasal reaksiyonlar ve bağlar sonucunda, boşluk olan bölgelerin 28 günün ardından bilgisayarlı tomografi cihazı tarafından dolu olarak algılanması manasına gelmektedir. Yani hacim artışı ile beraber makro boşluklarda ilk güne nazaran azalma, DÇÇ sonrası hacimsel azalma neticesinde ise makro boşluklarda artış meydana gelmiştir. ZK numunesinin DÇÇ sonrası meydana gelen boşluklu yapısı ve bu numuneden 3D Doctor programı ile alınan kesitteki makro boşluğun tespiti Şekil 3.57’de sunulmuştur.



Şekil 3.57. DÇÇ sonrası kireçli karışımlarda makro boşluk tespiti

Bilgisayarlı tomografi tekniği kullanılarak yapılan HU değerleri tespiti ve hacimsel analizler neticesinde, bu yöntemin zemin stabilizasyonu için hazırlanan karışımlar içinde zamanla veya DÇÇ gibi farklı etkenlerle meydana gelen değişimleri yorumlamada kullanılabilir olduğu sonucuna varılmıştır.

3.1.8. Taramalı Elektron Mikroskobu Deneyi

Taramalı elektron mikroskobu deneyi Z, ZK, ZB20 ve ZKB10 karışımlarına uygulanmıştır. SEM analizinde doğal zemin ve kireçli numunenin yanı sıra %20 oranında BBT içeren kireçsiz karışımların ve %10 BBT içeren kireçli karışımların kullanım nedeni, serbest basınç dayanımı açısından en yüksek değerlerin bu numunelerden elde edilmiş olmasıdır. Analizler Karadeniz Teknik Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Fakültesi Mikro Analiz Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiştir. Bu deneyde %0.1-%1 hassasiyetle çalışan, ışık mikroskobundan 300 kat daha fazla alan derinliğine sahip Zeiss EQV LS-10 marka elektron mikroskobu cihazı kullanılmıştır. Cihazın çalışma prensibine göre, cihazın yolladığı x-ışınları numuneden geri dönerek tekrar kendi dedektörüne döner. Bu işlem esnasındaki açı ve mesafeler işlenerek numuneye ait mikroskobik görüntü elde edilir. Numuneler cihaza yerleştirildikten sonra 1 saat kadar vakum süresi beklenmelidir. Ardından numunelere ait görüntülerin elde edilmesi mümkündür. Kullanılan deney düzeneği ve analiz için hazırlanan numuneler Şekil 3.58 ve Şekil 3.59'da sunulmuştur.



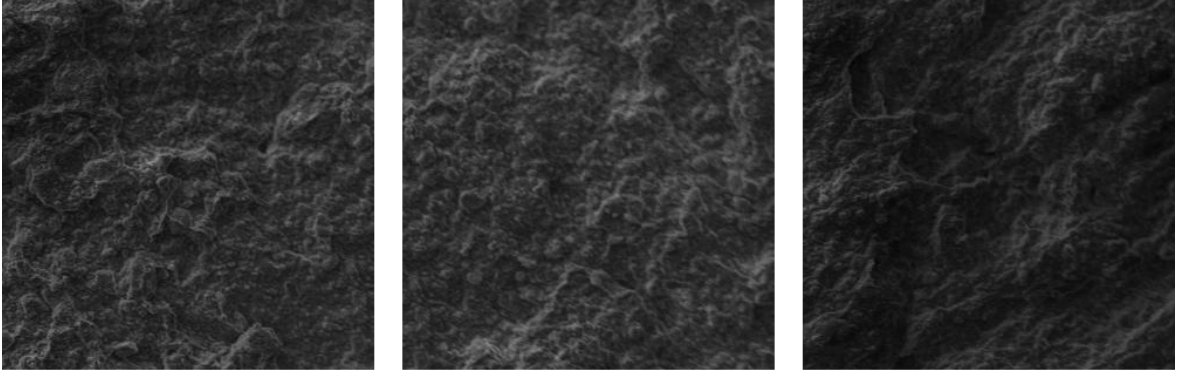
Şekil 3.58. Taramalı elektron mikroskobu



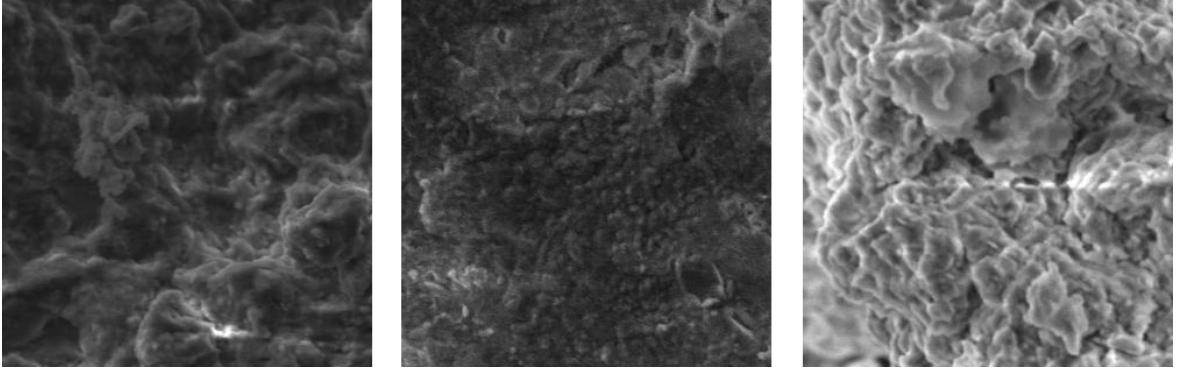
Şekil 3.59. SEM analizi için hazırlanan numuneler

Taramalı elektron mikroskobu görüntüleri Z, ZK, ZB20 ve ZKB10 numuneleri için 1 günlük ve 28 günlük kür süreleri sonunda alınmıştır. Ayrıca numuneler donma-çözülme çevrimine tabi tutulduktan sonra SEM görüntüleri tekrar incelenmiştir. Zemin numunelerinde 500 kat büyütme, ZK karışımı numunelerde 2500 kat büyütme, ZKB10 karışımı numunelerde 5000 kat büyütme, ZB20 karışımı numunelerde ise 10000 kat büyütme yapılarak taramalı elektron mikroskobu deneyleri gerçekleştirilmiştir.

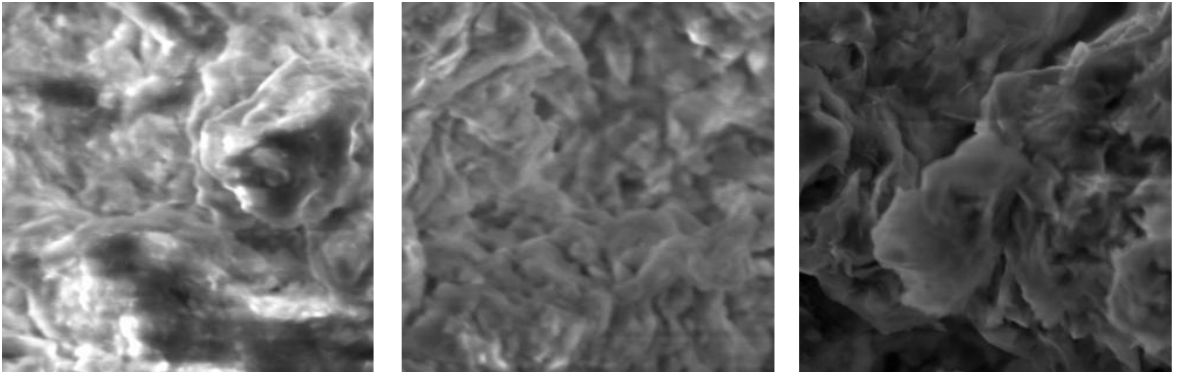
Zemin numunelerinin 500 kat büyütülmüş SEM görüntüleri Şekil 3.60'ta, ZK numunelerinin 2500 kat büyütülmüş SEM görüntüleri Şekil 3.61'de, ZKB10 numunelerinin 5000 kat büyütülmüş SEM görüntüleri Şekil 3.62'de, ZB20 numunelerinin 10000 kat büyütülmüş SEM görüntüleri Şekil 3.63'te sunulmuştur.



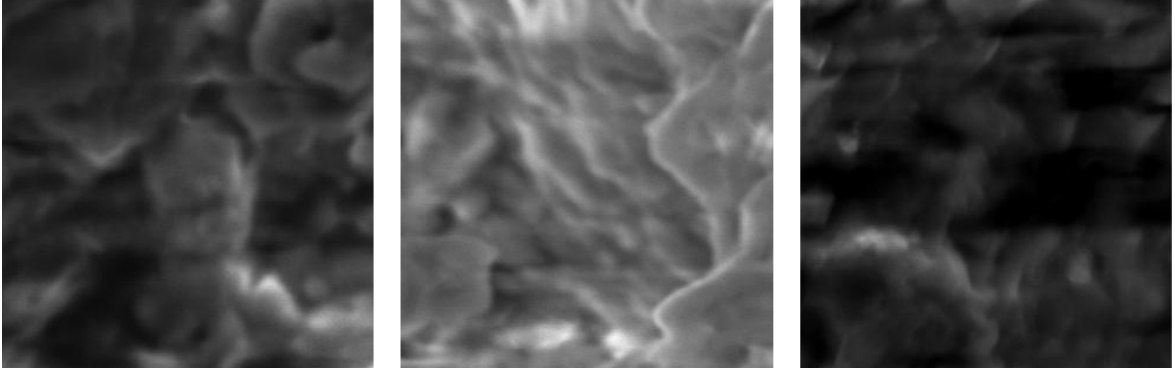
Şekil 3.60. Zemin numunelerinin sırasıyla 1. gün, 28. gün ve DÇÇ sonrası 500 kat büyütülmüş SEM görüntüleri



Şekil 3.61. ZK karışımlarının sırasıyla 1. gün, 28. gün ve DÇÇ sonrası 2500 kat büyütülmüş SEM görüntüleri



Şekil 3.62. ZKB10 karışımlarının sırasıyla 1. gün, 28. gün ve DÇÇ sonrası 5000 kat büyütülmüş SEM görüntüleri



Şekil 3.63. ZB20 karışımlarının sırasıyla 1. gün, 28. gün ve DÇÇ sonrası 10000 kat büyütülmüş SEM görüntüleri

Numuneler üzerinde yapılan mikroskobik analiz, katkılı numunelerin morfolojik değişimini açıkça ortaya koymaktadır. Karışımlar hazırlandıktan itibaren 1 günlük kür süresi sonucunda, katkı ihtiva eden numunelerde morfolojik değişimler meydana gelmiştir. Doğal zemin numuneleri topaklı bir yapıya sahipken, %20 oranında BBT içeren numunelerde bu yapı daha sıkı bir görüntü oluşturmuştur. Özellikle kireçli ve ZKB10 karışımlarında morfolojik yapının tamamen değiştiği görülmektedir. 28 günlük kür süreleri ardından bu numunelerde daha sıkı bir dizilim görüntüsü ortaya çıkmıştır. Doğal zeminin 1 ve 28 günlük görüntülerinde ciddi farklılıklar meydana gelmemiştir. Tamamen yapısı değişen kireçli numunelerde ise, donma-çözülme çevrimi neticesinde boşluklu bir yapının meydana geldiği görülmektedir. Bu görüntüler donma-çözülme çevrimi neticesinde serbest basınç dayanımlarındaki düşüşlerin mikroskobik boyutta analizlerini teşkil eder. Taramalı elektron mikroskobu analizleri, DÇÇ öncesi ve sonrasında elde edilen serbest basınç dayanımı verileriyle örtüşen bir tablo ortaya koymuştur.

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Yüksek plastisiteli killerin stabilizasyonunu konu edinen bu doktora tezi kapsamında, tüfit taşların zemin stabilizasyonunda kireçle birlikte kullanılabilirliği araştırılmıştır. Stabilizasyon çalışmasında kullanılan Bayburt Taşı (BT), orijin olarak tuf/tüfit taşlar grubundadır. BT atıklarının yeşil, beyaz ve sarı olmak üzere üç farklı tipi vardır. Bayburt ili çevresindeki 180 milyon m³ civarında rezervi olduğu bilinen BT farklı endüstriyel alanlarda kullanılmaktadır. Kimyasal olarak yüksek oranda silis içermekte ve bu silisi yapı zeolit minerallerinden oluşmaktadır. BT genel olarak dış duvar kaplaması, denizlik ve yüzey kaplamaları yanında çeşitli restorasyon işlerinde, köprü, cami ve çeşme gibi imalatlarda kullanılmaktadır. BT'nin ocak işletmeciliğinde ve işlenmesinde modern yöntemlere geçilmemesi sebebiyle %70'e varan kayıplar oluşmaktadır. Bu kayıp tarım arazilerini ve havayı kirletmekte, çevre ve sağlık problemlerine sebep olmaktadır. BT'nin fazla miktarda atığı depolama sorunlarını da beraberinde getirmektedir. Katı atıkların yeniden değerlendirilmesi kapsamında, BT atıkları kireçli ve kireçsiz olarak zemin stabilizasyonu deneylerinde kullanılmıştır. Farklı oranlarda hazırlanan karışımların dayanım, şişme ve durabilite özellikleri araştırılmış ayrıca karışımlara taramalı elektron mikroskopu ve bilgisayarlı tomografi analizleri yapılmıştır. Çalışma sonucunda aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır:

- ✓ Kireçsiz karışımlardan elde edilen kıvam deneyi sonuçları her üç taşın katkı maddesi olarak kullanılmasının LL, PL ve PI değerlerinde düşüşe neden olduğunu göstermektedir. Bu değerler için en büyük düşüşler ZY20 karışımlarında meydana gelmiştir.
- ✓ Çalışma kapsamında yapılan pH deneyleri sonucunda zeminin optimum kireç oranı %6 olarak belirlenmiş olup, kireç ihtiva eden numunelerde bu oran esas alınarak karışımlar hazırlanmıştır.
- ✓ Kirecin optimum oranda stabilizasyon çalışmalarına katılmasıyla birlikte LL ve PI değerlerinde önemli miktarda düşüşler meydana gelirken, PL değerleri artış göstermiştir. Kireç ve BT atıklarının beraber kullanılmasıyla LL, PL ve PI değerlerindeki değişimler sadece kireç içeren ZK karışımlarına göre düşük mertebelerde seyretmiştir. En düşük LL, PL ve PI değerleri ZKY20 karışımlarından elde edilmiştir.

- ✓ Kompaksiyon parametreleri incelendiğinde; ZY, ZS ve ZB karışımlarında optimum su içeriği değerlerinin artan BT atığı oranıyla birlikte azaldığı, maksimum kuru yoğunluk değerlerinin ise arttığı sonucuna ulaşılmıştır. Kireçsiz karışımlarda en düşük optimum su içeriği değeri ZB20 karışımından elde edilmiştir.
- ✓ Sadece kireç içeren ZK karışımında doğal zemine göre optimum su içeriği değeri artmış, maksimum kuru yoğunluk değeri ise azalmıştır. ZKY, ZKS ve ZKB numunelerinde kireçli numunelere göre optimum su içeriği değerlerinde azalmalar, maksimum kuru yoğunluk değerlerinde ise artışlar meydana gelmiştir.
- ✓ Doğal zemine BYT, BBT ve BST katarak incelenen optimum su içeriği ve maksimum kuru yoğunluk değerleri her üç taş atıkları için yaklaşık sonuçlar vermiştir. Buradan kompaksiyon parametrelerindeki değişim açısından bu üç farklı taş çeşidinin birbirine benzer davranışlar sergilediklerini söylemek mümkündür.
- ✓ BT atıklarının zemin stabilizasyonunda kullanılabilirliğini hedef alan bu çalışmada öncelikle atık BYT'nin zemin stabilizasyonunda kullanılıp kullanılmayacağı incelenmiştir. Elde edilen tek eksenli serbest basınç dayanımı verilerine göre, atık BYT'nin tek başına zemin stabilizasyonunda kullanılabileceğini söylemek güçtür. Çünkü BYT katkılı ZY karışımlarının dayanım değerlerinde doğal zemine göre önemli oranlarda yükselmeler meydana gelmemiştir. %10 atık BYT içeren ZY10 karışımlarında dayanım artışı görülse bile, bu artış ancak %5 mertebesinde kalmıştır.
- ✓ Atık BYT'nin kireç ile birlikte zemin stabilizasyonunda kullanılması halinde, serbest basınç dayanımında doğal zemine göre 13 kata varan artışlar gözlemlenmiştir. Bu artışın görüldüğü kireç katkılı BYT oranı %5'tir. Artan oranlarda daha düşük dayanımlar görülmesine rağmen, BYT karıştırılan tüm karışımlarda sadece kireçli numunelere göre daha yüksek dayanımlar elde edilmiştir. Bu sonuçlar atık BYT'nin puzolanik özelliklerinin olduğunu ve ikincil bağlayıcı olarak zemin stabilizasyonunda kullanılabileceğini göstermiştir. Bu atıkların zemin stabilizasyonda değerlendirilmesi ise zemin mekaniği açısından önemli olduğu kadar, çevre mühendisliği ve katı atıkların yeniden değerlendirilebilmesi açısından da bir o kadar öneme sahiptir.
- ✓ Atık BBT'nin yalnız başına stabilizasyon çalışmalarında kullanılabilirliğini araştırmak amacıyla elde edilen serbest basınç dayanımı verileri atık BYT'ye oranla daha iyi sonuçlar vermiştir. Deneyler sonucunda en yüksek basınç dayanımı

değerleri BBT'nin zemine %20 oranında katılması sonucu elde edildiği tespit edilmiştir. Bu oranda hazırlanan ZB20 karışımlarında doğal zemin numunelerine göre yaklaşık %45 oranında bir artış görülmektedir. BBT'nin zemine %5, %10 ve %15 oranlarında katılmasıyla birlikte serbest basınç dayanımı değerlerinde doğal zemine göre %10-15 seviyelerinde bir artış meydana gelmiştir. ZB20 karışımının verdiği sonuç katı atıkların yeniden değerlendirilebilmesi açısından stabilizasyon çalışmaları için çok anlamlı bir sonuç olmakla birlikte atık BBT'nin yalnız başına zemin stabilizasyonunda kullanılabileceğinin bir göstergesidir.

- ✓ Atık BST katılarak hazırlanan ZS karışımlarından elde edilen en yüksek serbest basınç dayanımı 158.24 kPa'dır. Bu değer ZS15 karışımlarından elde edilmiştir.
- ✓ Kireçsiz numunelere 28 gün kür uyguladıktan sonra yapılan serbest basınç dayanımı testi sonuçlarına göre, en yüksek dayanım verileri BBT içeren karışımlar olan ZB numunelerinden elde edilmiştir. Zemine BYT atıklarının katılması ile serbest basınç dayanımı değerlerinde kayda değer değişimler meydana gelmemiştir. Sadece BT atıklarının kullanıldığı numunelerde en yüksek dayanım ZB20 numunelerinden elde edilmiştir.
- ✓ Atık BBT ile yapılan deneyler sonucunda elde edilen verilerin birçok farklı açılardan değerlendirilebilmesi mümkündür. Öncelikle BBT atıklarının yeni bir stabilizasyon malzemesi olarak kullanılabileceği sonucuna varılmış olup, bu yeni stabilizasyon malzemesi ile yapılabilecek yeni çalışmaların önü açılmıştır. Çevre kirliliğinin önlenmesinde katı atıkların yeniden kullanılabilirliğine bir örnek teşkil edebilecek bu çalışma, katı atık yönetimi kapsamında BBT atıklarının kullanılabilir olduğunu göstermiştir. Bu çalışma verilerinden yola çıkarak, BBT atıklarının killi zeminlerin iyileştirilmesinde kullanılmasıyla, BBT'nin kullanımının Bayburt yöresi civarında ve tüm Türkiye genelinde özellikle cami, çeşme inşaatlarında ve işleme sanatında giderek artış göstermesine istinaden yakın gelecekte oluşabilecek çok daha büyük çevre sorunlarının önüne geçilmesi planlanmaktadır.
- ✓ Zemin ve %6 oranında kireç içeren ZK karışımlarının serbest basınç dayanımı değeri 1072.23 kPa olarak belirlenmiştir. Bu değer, doğal zeminin 118.46 kPa olan dayanım değerine oranla yaklaşık 10 kat artışın meydana geldiğini göstermiştir. Zemine optimum seviyede kireç katılmasıyla elde edilen bu artış, kireçle stabilizasyonun ince daneli zeminlerde ne derecede etkin olduğunun bir göstergesidir.

- ✓ ZKY5 karışımlarının serbest basınç dayanımı değerinde ZK karışımlarına göre %43 oranında artış meydana gelmiştir. BYT atığı karıştırılarak elde edilen ZKY karışımlarının tümünde sadece kireç içeren ZK karışımlarına göre daha yüksek dayanım verileri elde edilmiştir.
- ✓ BBT atığının kireçle birlikte kullanılmasıyla elde edilen en yüksek dayanım değeri 1651.59 kPa'dır. Bu değer ZKB10 karışımlarından elde edilmiştir. BBT atığı karıştırılarak elde edilen ZKB karışımlarının tümünde sadece kireçli karışımlara göre daha yüksek dayanım elde edilmiştir.
- ✓ ZKS karışımlarında ZK karışımına göre elde edilen en yüksek dayanım artışı %17'dir. Bu artış ZKS5 karışımlarından elde edilmiştir. ZKS karışımlarının serbest basınç dayanımı verileri ZKB ve ZKY karışımlarına oranla daha düşüktür.
- ✓ ZKY karışımlarında en yüksek dayanımı ZKY5 karışımları, ZKB karışımlarında en yüksek dayanımı ZKB10 karışımları, ZKS karışımlarında dayanımı ise ZKS5 karışımları vermiştir. Özellikle ZKY ve ZKB karışımlarının verdiği yüksek serbest basınç dayanımı değerleri, BT atıklarının zemin stabilizasyonunda kireçle birlikte kullanımının uygun olduğunu göstermiştir.
- ✓ DÇÇ sonrasında serbest basınç dayanımındaki değişikliklerin incelendiği durabilite tetkiklerine göre, kireçli karışımlarda en iyi dayanım verileri ZKY karışımlarından elde edilmiştir. Kirecsiz karışımlarda ise DÇÇ sonrası en güçlü değer ZB20 karışımlarından elde edilmiştir.
- ✓ ZK karışımlarının DÇÇ sonrası serbest basınç dayanımı 675.42 kPa olarak tespit edilmiştir. BT atıkları içeren tüm ZKB, ZKY ve ZKS karışımlarında DÇÇ sonrası bu değer üstünde dayanım verileri elde edilmiştir. Bu sonuçlar, BT atıklarının zemin stabilizasyonunda kullanılmasının değişen çevre koşullarında da etkin olduğunu göstermiştir.
- ✓ Serbest şişme deneyi sonuçlarına göre doğal zemine %6 oranında kireç katılmasıyla birlikte şişme davranışının ortadan kalktığı gözlemlenmiştir. ZKY, ZKS ve ZKB numunelerinde görülen aynı sonuçlar ZK karışımı verilerini destekler niteliktedir.
- ✓ Şişme basıncı deneyinden elde edilen verilere göre doğal zeminin şişme basıncı 269.8 kPa bulunurken, en düşük şişme basıncı değeri ZB20 karışımlarından elde edilmiştir. Şişme basıncı ve serbest şişme yüzdesi değerleri birbine benzer davranışta azalma eğilimi göstermişlerdir. Kirecsiz karışımların serbest şişme

deneyi ve şişme basıncı deneyi sonuçlarına göre artan BT atıklarıyla birlikte, zeminin şişme davranışında azalmalar meydana gelmiştir.

- ✓ 500, 2500, 5000 ve 10000 kat büyütme işlemleri gerçekleştirilerek ayrı ayrı elde edilen taramalı elektron mikroskobu görüntülerine göre, doğal zemin ile ZB20 karışımlarının morfolojik yapısında büyük değişimler gözlemlenmemiştir. Mikroskobik yapısı incelenen ZK ve ZKB10 karışımlarının 28 günlük kür süresi sonucunda ve DÇÇ sonrasında iç yapısında ise farklılıklar meydana gelmiştir. 28 günlük kür süresinin ardından bu karışımlarda daha sıkı bir dizilim ortaya çıkarken, DÇÇ sonrası özellikle ZK karışımlarında makro boşlukların oluştuğu tespit edilmiştir.
- ✓ Bilgisayarlı tomografi tekniği ile elde edilen tomografi değerleri (HU) ile serbest basınç dayanımları (SBD) arasında yapılan istatistiksel analizin sonucunda bu değerler arasında anlamlı bir ilişkinin olduğu ve tomografi değerlerinin serbest basınç değeri için anlamlı bir yordayıcı olduğu tespit edilmiştir.
- ✓ Bilgisayarlı tomografi tekniği ile elde edilen diğer bir parametre hazırlanan karışımların hacimlerinde meydana gelen değişimlerdir. Hacimsel analiz verilerine göre, özellikle kireçli karışımların hacimsel değerleri 28 günlük kür süresi sonucunda artış göstermiştir. Yani karışımlar daha kararlı bir yapıya dönüşmüştür. Kirecsiz doğal zemin ve ZB20 karışımlarında ise kayda değer bir hacimsel değişim meydana gelmemiştir. Kireçli karışımların dolu hacminde 28 günlük kür süresi sonucunda meydana gelen artış, puzolanik reaksiyonların meydana geldiğini ve dayanım değerlerinin arttığını doğrular niteliktedir.
- ✓ Bilgisayarlı tomografi tekniği kullanılarak yapılan HU değerleri tespiti ve hacimsel analizler neticesinde, bu yöntemin zemin stabilizasyonu için hazırlanan karışım içinde zamanla veya DÇÇ gibi farklı etkenlerle meydana gelen değişimleri yorumlamada kullanılabilir olduğunu göstermiştir.

Bu konuda yapılabilecek yüksek lisans ve doktora çalışmalarına ışık tutması amacıyla verilebilecek öneriler şunlardır:

- ✓ Çalışma kapsamında kullanılan doğal malzeme USCS sınıflandırma sistemine göre CH sınıfında yer almaktadır. Farklı tip doğal malzemelerde BT atıklarının kireçli ve kirecsiz stabilizasyon davranışları incelenebilir.
- ✓ BT atıkları ile kirecin zemin stabilizasyonunda kullanılabilirliğini inceleyen bu çalışmadan farklı olarak, BT atıkları ve çimento veya BT atıkları ve uçucu külün

zemin stabilizasyonunda beraber kullanılmasının mühendislik özellikleri zayıf bir zeminde göstereceği iyileştirmeler incelenebilir.

- ✓ Laboratuvar koşullarında yapılan deneylerin saha deneyleri ile desteklenmesi sağlanabilir.
- ✓ Farklı tür doğal/yapay puzolanlar ile BT atığı kombinasyonlarının kireçli-kireçsiz stabilizasyon davranışları araştırılabilir.

5. KAYNAKLAR

- Abd El-Aziz, M., A., Abo-Heshema, M., A. ve El-Shourbagy, M., 2004. The Effect of Lime-Silica Fume Stabilizer on Engineering Properties of Clayey Subgrade, Paper No. 96, Engineering Conference of Mansoura University Faculty, April, Sharm.
- Adailer, K., 1996. Mitigation of Earthquake-Induced Liquefaction Hazards, PhD Thesis, Rensselaer Polytechnic Institute, New York.
- Ahmed, A., 2015. Compressive Strength and Microstructure of Soft Clay Soil Stabilized with Recycled Bassanite, Applied Clay Science, 104, 27-35.
- Akcanca, F. ve Aytekin, M., 2014. Impact of Wetting-Drying Cycles on the Hydraulic Conductivity of Liners Made of Lime-Stabilized Sand-Bentonite Mixtures for Sanitary Landfills, Environmental Earth Science, 72, 59-66.
- Akın, S., Demiral, B. ve Okandan, E., 1996. A Novel Method of Porosity Measurement Utilizing Computerized Tomography, In Situ, 20, 4, 347-365.
- Akpınar, A., 2011. Tomografi Görüntülerinden Üç Boyutlu Kemik Modelinin Elde Edilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- Aksoy, İ., H., 1992. Uçucu Küllerin Geoteknikte Kullanımı, Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Dördüncü Ulusal Kongresi, Ekim, İstanbul, Bildiriler Kitabı, 248-259.
- Al-Amoudi, O., S., B., 2002. Attack on Plain and Blended Cement Exposed to Aggressive Sulfate Environments, Cement and Concrete Composites, 24, 305-316.
- Aldaood, A., Bouasker, M. ve Al-Mukhtar, M., 2014. Geotechnical Properties of Lime-Treated Gypseous Soils, Applied Clay Science, 88-89, 39-48.
- Aldaood, A., Bouasker, M. ve Al-Mukhtar, M., 2015. Effect of Long-Term Soaking and Leaching on the Behaviour of Lime-Stabilised Gypseous Soil, International Journal of Pavement Engineering, 16, 1, 11-26.
- Al-Mukhtar, M., Khattab, S. ve Alcover, J. F., 2012. Microstructure and Geotechnical Properties of Lime-treated Expansive Clayey Soil, Engineering Geology, 139, 140, 17-27.
- Al-Mukhtar, M., Lasledj, A. ve Alcover, J., F., 2010. Behaviour and Minerology Changes in Lime-Treated Expansive Soil at 50 °C, Applied Clay Science, 50, 199-203.

- Al-Rawas, A. A., Hago, A. W. ve Al-Sarmi, H., 2005. Effect of Lime, Cement and Sarooj (Artificial Pozzolan) on the Swelling Potential of an Expansive Soil from Oman, Building and Environment, 40, 681-687.
- Al-Rawas, A., A., Taha, R., Nelson, J., D., Al-Shab, T., B. ve Al-Siyabi, H., 2002. A Comparative Evaluation of Various Additives Used in the Stabilization of Expansive Soils, Geotechnical Testing Journal, 25, 2, 199-209.
- Anday, M., C., 1962. Accelerated Curing for Lime Stabilized Soils, HRB Bulletin No. 304, National Research Council, Washington DC, 1-13.
- Ansary, M., A., Noor, M., A. ve Islam, M., 2006. Effect of Fly Ash Stabilization on Geotechnical Properties of Chittagong Coastal Soil, Geotechnical Symposium, Mart, Roma, 443-454.
- Arabani, M., A., Noor, M., A. ve Islam, M., 2006. Effect of Fly Ash Stabilization on Geotechnical Properties of Chittagong Coastal Soil, Geotechnical Symposium, March, Roma, 443-454.
- Arman, A. ve Moonfish, G., A., 1972. Lime Stabilization of Organic Soils, Research Record No. 381, Highway Research Record, Washington, 37-45.
- Aruntas, H., Y., Tekin, İ. ve Birgül, R., 2010. Determining Hounsfield Unit Values of Mortar Constituents by Computerized Tomography, Measurement, 43, 410-414.
- ASTM C 1723, 2010. Standard Guide for Examination of Hardened Concrete Using Scanning Electron Microscopy, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM C 215, 2014. Standard Test Method for Fundamental Transverse, Longitudinal and Torsional Resonant Frequencies of Concrete Specimens, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM C 618, 2002. Annual Book of ASTM Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Concrete, American Society for Testing and Materials, PA.
- ASTM C 666, 2015. Standard Test Method for Resistance of Concrete to Rapid Freezing and Thawing, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM D 2166, 2006. Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil, ASTM, Pennsylvania.
- ASTM D 2487, 2011. Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System), ASTM, Pennsylvania.
- ASTM D 2974, 2007. Standard Test Methods for Moisture, Ash, and Organic Matter of Peat and Other Organic Soils, ASTM, Pennsylvania.

- ASTM D 422, 2007. Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils, ASTM, Pennsylvania.
- ASTM D 4318, 2010. Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils, ASTM, Pennsylvania.
- ASTM D 4546, 2008. Standard Test Methods for One-Dimensional Swell or Collapse of Cohesive Soils, ASTM, Pennsylvania.
- ASTM D 5381, 2014. Standard Guide for X-Ray Fluorescence (XRF) Spectroscopy of Pigments and Extenders, ASTM, Pennsylvania.
- ASTM D 560, 1996. Standard Test Methods for Freezing and Thawing Compacted Soil-Cement Mixtures, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, Pennsylvania.
- ASTM D 6276, 2006. Standard Test Methods for Using pH to Estimate the Soil-Lime Proportion Requirement for Soil Stabilization, ASTM, Pennsylvania.
- ASTM D 698, 2007. Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort, ASTM, Pennsylvania.
- ASTM D 854, 2010. Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer, ASTM, Pennsylvania.
- ASTM D 934, 2003. Standard Practices for Identification of Crystalline Compounds in Water-Formed Deposits, ASTM, Pennsylvania.
- Atanur, A., 1973. Kireç Stabilizasyonu ve Yol Yapımındaki Tahkikatı, Karayolları Genel Müdürlüğü Matbaası, Ankara, 11-17.
- Atterberg, A., 1911. The Behaviour of Clays with Water, Their Limits of Plasticity and Their Degrees of Plasticity, Kungliga Lantbruksakademiens Handlingar Och Tidskrift, 50, 2, 132-158.
- Attom, M., F. ve Al-Sharif, M., M., 1998. Soil Stabilization with Burned Olive Waste, Applied Clay Science, 113, 219-230.
- Aytekin, M., 2004. Deneysel Zemin Mekaniği, Teknik Yayınevi, Mühendislik&Mimarlık Yayınları, Ankara, 624 s.
- Balta, İ., 1984. Doğu Karadeniz Bölgesi Topraklarının Çimento ve Kireçle Stabilizasyonu, Doktora Tezi, K.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Bell, F. G., 1996. Lime Stabilization of Clay Minerals and Soils, Engineering Geology, 42, 223-237.
- Bhattacharjee, U. ve Kandpal, T., C., 2002. Potential Fly Ash Utilisation in India, Energy, 27, 2, 151-166.

- Bin-Shafique, S., Rahman, K., Yaykiran, M. ve Azfar, I., 2010. The Long-Term Performance of Two Fly Ash Stabilized Fine-Grained Soil Subbases, Resources, Conservation and Recycling, 54, 666-672.
- Blanco-Varela, M., T., Aguilera, J. ve Martínez-Ramírez, S., 2006. Effect of Cement C₃A Content, Temperature and Storage Medium on Thaumassite Formation in Carbonated Mortars, Cement and Concrete Research, 36, 4, 707-715.
- Boel, V., Cnudde, V., Schutter, G., D. ve Jacobs, P., 2006. Exploring the Potential of X-Ray Tomography in Micro Structural Studies of Cementitious Systems, Second International RILEM Symposium on Advances in Concrete through Science and Engineering, USA.
- Bozbey, I. ve Garaisayev, S., 2010. Effects of Soil Pulverization Quality on Lime Stabilization of an Expansive Clay, Environmental Earth Science, 60, 1137-1151.
- Brooks, R., M., 2009. Soil Stabilization with Flyash and Rice Husk Ash, International Journal of Research and Reviews in Applied Sciences, 1, 3, 209-217.
- Buhler, R., L. ve Cerato, A., B., 2007. Stabilization of Oklahoma Expansive Soils Using Lime and Class C Fly Ash, GeoDenver Congress: New Peaks in Geotechnics, 1-10.
- Cai, Y., Shi, B., Charles, W., W. ve Tang, C., 2006. Effect of Polypropylene Fibre and Lime Admixture on Engineerin Properties of Clayey Soil, Engineering Geology, 87, 230-240.
- Calik, U. ve Sadoglu, E., 2014. Classification, Shear Strength, and Durability of Expansive Clayey Soil Stabilized with Lime and Perlite, Natural Hazards, 71,3, 1289-1303.
- Calik, U. ve Sadoglu, E., 2014. Engineering Properties of Expansive Clayey Soil Stabilized with Lime and Perlite, Geomechanics and Engineering, 6, 4, 403-418.
- Casagrande, A., 1932. Research on the Atterberg Limits of Soils, Public Roads, 13, 8, 121-136.
- Chotard, T., J., Bonceur-Martel, M., P., Smith, A., Dupuy, J., P. ve Gault, C., 2003. Application of X-ray Computed Tomography to Characterize the Early Hydration of Calcium Aluminate Cement, Cement and Concrete Composites, 25, 145-152.
- Ciancio, D., Beckett, C., T., S. ve Carraro, J., A., H., 2014. Optimum Lime Content Identification for Lime-Stabilised Rammed Earth, Construction and Building Materials, 53, 59-65.
- Clare, K., E., Crunchley, A., E., 1957. Laboratory Experiments in the Stabilization of Clays with Hydrated Lime, Geotechnique, 5, 97-111.

- Cook, D., J., 1986. Natural Pozzolans, Concrete Technology and Design, Vol 3, Cement Replacement Materials, Surrey University Press, California, 259 s.
- Cuisinier, O., Auriol, J.C., Borgne, T.L. ve Deneele, D., 2011. Microstructure and hydraulic conductivity of a Compacted Lime-Treated Soil, Engineering Geology, 123, 187-193.
- Çakıroğlu, İ., 2007. Yüksek Plastisitesi Killerin Stabilizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- Çalık, Ü., 2012. Perlitin Puzolanik Katkı Olarak Kireç İle Birlikte Zemin Stabilizasyonunda Kullanımı, Doktora Tezi, K.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Çelik, E. ve Nalbantoğlu, Z., 2013. Effects of Ground Granulated Blastfurnace Slag (GGBS) on the Swelling Properties of Lime-Stabilized Sulfate-Bearing Soils, Engineering Geology, 163, 20-25.
- Çimen, Ö., 2005. Pomzanın Mühendislik Karakteristikleri ve Yüksek Plastisiteli Bir Kilin Stabilizasyonda Kullanılması, Türkiye Pomza Sempozyumu, Eylül, Isparta, Bildiriler Kitabı: 251-257.
- ÇŞB, 2011. T.C. Bayburt Valiliği Çevre ve Şehircilik İl Müdürlüğü İl Çevre Durum Raporu, T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, Ankara.
- Dallas, N., L., 1995. Handbook for Stabilization of Pavement Subgrades and Base Courses with Lime, Kendall/Hunt, 29-43, USA
- Dawson, R., F., 1956. Special Factors in Lime Stabilization, Highway Research Board Bulletin No. 19, National Research Council, Washington, 103-110.
- Degirmenci, N., Okucu, A. ve Turabi, A., 2007. Application of Phosphogypsum in Soil Stabilization, Building and Environment, 42, 3393-3398.
- Demir, M., 2000. Effect of Pore Size Distribution on Porosity Measurement by Computerized Tomography, Yüksek Lisans Tezi, The Graduate School of Natural and Applied Sciences of the Middle East Technical University, Ankara.
- Demiröz, A. ve Karaduman, M., 2009. Zemin İyileştirme Metotları, Selçuk Üniversitesi Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu Teknik-Online Dergi, 8, 3, 176-192.
- Dermatas, D. ve Meng, X., 2003. Utilization of Fly Ash for Stabilization/Solidification of Heavy Metal Contaminated Soils, Engineering Geology, 70, 377-394.
- Dong, Q., Huang. V. ve Huang. B., 2014. Laboratory Evaluation of Utilizing Waste Heavy Clay and Foundry Sand Blends as Construction Materials, Journal of Materials in Civil Engineering, 26, 9.
- Dunn, C., S., 1966. Stability of Aggregates Used in Road Subbases, Road and Road Construction, 17, 253-259.

- Durmuş, B., Yurtkoru, E., S. ve Çinko, M., 2013. Sosyal Bilimlerde SPSS'le Veri Analizi, Beta Basım Yayım Dağıtım A.Ş., 5. Baskı, İstanbul.
- Eades, J., L. ve Grim, R., E., 1960. The Reaction of Hydrated Lime with Pure Clay Minerals in Soil Stabilization, Bulletin No. 262, Highway Research Board, 51-63.
- Eades, J., L. ve Grim, R., E., 1966. A Quick Test to Determine Lime Requirements for Soil Stabilization, Bulletin No. 139, Highway Research Board, 61-72.
- Edil, T., B., Acosta, H., A. ve Benson, C., H., 2006. Stabilizing Soft Fine Grained Soils with Fly Ash, Journal of Materials in Civil Engineering, 18, 2, 283-294.
- Edil, T., B., Benson, C., H., Bin-Shafique, M., S., Kim, W., Tanyu, B., F. ve Senol, A., 2002. Field Evaluation of Construction Alternatives for Roadway over Soft Subgrade, Record No. 1786, Transportation Research Board, Washington, 36-48.
- Elaqra, H., Godin, N., Peix, G., Mili, M., R. ve Fantozzi, G., 2007. Damage Evolution Analysis in Mortar, During Compressive Loading Using Acoustic Emission and X-Ray Tomography: Effects of the Sand/Cement Ratio, Cement and Concrete Research, 37, 703-713.
- Ene, E. ve Okagbue, C., 2009. Some Basic Geotechnical Properties of Expansive Soil Modified Using Pyroclastic Dust, Engineering Geology, 107, 61-65.
- Erdoğan, T., Y., 1997. Admixtures for Concrete, The Middle East Technical University Press, Ankara, 77-78.
- Eren, S. ve Filiz, M., 2009. Comparing the Conventional Soil Stabilization Methods to the Consolid System Used as an Alternative Admixture Matter in Isparta Daridere Material, Construction and Building Materials, 23, 2473-2480.
- Evans, G., L. ve Bell, D., H., 1981. Chemical Stabilization Odloes, New Zealand, 10th ICSMFE, Stockholm, 3, 649-658.
- Faluyi, S. O. ve 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.
- Fang, H., Y., 1991. Foundation Engineering Handbook 2nd Edition, Van Nostrang Reinhold Publishing, London.
- FHWA, 1998. Ground Improvement Technical Summaries Final Draft, FHWA Demonstration Project No.116 Contact No. DTFH61-93-R-00145 by Elias V., Welsh J., Warren J., Lukas R., USA.
- Field, A., 2009. Discovering Statistics Using SPSS, Sage Publication, 3rd Edition, London, 179-237.

- Ghosh, A. ve 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.
- Goldberg, I. ve Klein, A., 1952. Some Effects of Treating Expansive Clays with Calcium Hydroxide, ASTM Special Publication 142, Symp. on Exchange Phenomenon in Soils, 112-128.
- Goodary, R., Lecomte-Nana, G., L., Petit, C. ve Smith, D., S., 2012. Investigation of the Strength Development in Cement-Stabilised Soils of Volcanic Origin, Construction and Building Materials, 28, 592-598.
- Gullu, H. ve Hazirbaba, K., 2010. Unconfined compressive strength and Post-Freeze-Thaw Behavior of Fine-Grained Soils Treated with Geofiber and Synthetic Fluid, Cold Regions Science and Technology, 62, 142-150.
- Guney, Y., Sari, D., Cetin, M. ve Tuncan, M., 2007. Impact of Cyclic Wetting-Drying on Swelling Behavior of Lime-Stabilized Soil, Building and Environment, 42, 681-688.
- Harichane, K. ve Ghrici, M., 2009. Effect of Combination of Lime and Natural Pozzolana on the Plasticity of Soft Clayey Soils, Near East University Second International Conference on New Developments in Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, May, North Cyprus, 574-581.
- Harichane, K., Ghrici, M., Khebizi, W. ve Missoum, H., 2010. Effect of Combination of Lime and Natural Pozzolana on the Durability of Clayey Soils, The Electronic Journal of Geotechnical Engineering, 15, 1194-1210.
- Hausmann, M., R., 1990. Engineering Principles of Ground Modification, McGraw-Hill, New York, 632 s.
- Hayward, B., 1996. Ground Modification Seminar Notes, Odenton.
- Hazirbaba, K. ve Gullu, H., 2010. California Bearing Ratio Improvement and Freeze-Thaw Performance of Fine-Grained Soils Treated with Geofiber and Synthetic Fluid, Cold Regions Science and Technology, 63, 50-60.
- Helfen, L., Dehn, F., Mikulik, P. ve Baumbach, T., 2005. Three-Dimensional Imaging of Cement Microstructure Evolution During Hydration, Advances in Cement Research, 17, 3, 103-111.
- Holtz, R., D. ve Kovacs, W., D., 1981. An Introduction to Geotechnical Engineering, Prentice Hall, New Jersey, 96-102.
- Hove, A., O., Ringen, J., K. ve Read, P., A., 1987. Visualization of Laboratory Coreflows with the Aid of Computerized Tomography, SPE Research Engineering, 148-154.
- Howell, D., C., 2010. Statistical Methods for Psychology, Belmont, 7th Edition, Wadsworth.

- Huat, B., B., K., Maail, S. ve 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.
- Hunt, P., K., Engier, P. ve Basjarowicz, C., 1988. Computed Tomography As a Core Analysis Tool: Application, Instrument Evaluation and Image Improvement Techniques, Journal of Petroleum Technology, 1203-1210.
- Hunt, R., E., 1986. Geotechnical Engineering Techniques and Practices, McGraw Hill, USA.
- Hunt, R., E., 1994. Geotechnical Engineering Investigation Manual, McGraw Hill, USA.
- Hunter, O., K., 2004. Characterization of Pore Structure and Crack Propagation in Concrete Using X-Ray Computed Tomography, Yüksek Lisans Tezi, Faculty of the Graduate of the University of Maryland, USA.
- Ingles, O., G. ve Metcalf, J., B. 1973. Soil Stabilization, John Wiley&Sons, New York.
- Işık, F. ve Özden, G., 2013. İnce Dane Oranının Zeminlerin Kompaksiyon Davranışına Etkisi, 5. Geoteknik Sempozyumu, Aralık, Adana, Bildiriler Özet Kitabı, 52.
- Jafari, M. ve Esna-ashari, M., 2012. Effect of Waste Tire Cord Reinforcement on Unconfined Compressive Strength of Lime Stabilized Clayey Soil Under Freeze-Thaw Condition, Cold Regions Science and Technology, 82, 21-29.
- Jauberthie, R., Rendell, F., Rengeard, D. ve Molez, L., 2010. Stabilisation of Estuarine Silt With Lime and/or Cement, Applied Clay Science, 50, 395-400.
- Jha, J., N. ve Gill, K., S., 2006. Effect of Rice Hush Ash on Lime Stabilization, Journal of the Institution of Engineers, 87, 33-39.
- Kalkan, E. ve Akbulut, S., 2004. The Positive Effects of Silica Fume on the Permeability, Swelling Pressure and Compressive Strength of Natural Clay Liners, Engineering Geology, 73, 145-156.
- Kalkan, E., 2009. Effects of Silica Fume on the Geotechnical Properties of Fine-Grained Soils Exposed to Freeze and Thaw, Cold Regions Science and Technology, 58, 130-135.
- Kassim, K. U. ve Chern, K. K., 2004. Lime Stabilized Malaysian Cohesive Soils, Jurnal Kejuruteraan Awam, 16, 1, 13-23.
- Katebi, H., 2009. Lime Stabilisation of Calcareous Soil, Journal of Institution of Engineers, 90, 3-6.
- Kavak, A., 1996. The Behavior of Lime Stabilized Clays Under Cyclic Loading, PhD Thesis, Boğaziçi University, İstanbul.

- Kavak, A., Güngör, A., G., Avşar, C. ve Atbaş, B., 2008. Kireç ile Zemin Stabilizasyonu, Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Onikinci Ulusal Kongresi, Selçuk Üniversitesi, Ekim, Konya.
- Kayabalı, K., 2010. Geoteknik Mühendisliğine Giriş, Gazi Kitapevi, Ankara, 636 s.
- KB, 2013. T.C. Kalkınma Bakanlığı Doğu Karadeniz Projesi Bölge Kalkınma İdaresi Başkanlığı Bayburt İl Raporu, Giresun.
- Khatab, S., A., A., Al-Juari, K., A., K. ve Al-Kiki, I., M., A., 2008. Strength, Durability and Hydraulic Properties of Clayey Soil Stabilized with Lime and Industrial Waste Lime, Al-Rafidain Engineering, 3, 2, 79-83.
- Kota, P., B., V., Hazlett, D. ve Perrin, L., 1996. Sulfate-Bearing Soils: Problems with Calcium Based Stabilizers, Record No. 1546, Transportation Research Board, Washington.
- Kudaka, 2014. T. C. Kuzeydoğu Anadolu Kalkınma Ajansı TRA1 Düzey 2 Bölgesi Doğaltaş ve Maden Potansiyeli Raporu, Ankara.
- Kukko, H., 2000. Stabilization of Clay with Inorganic Products, Journal of Materials in Civil Engineering, 12, 4, 307-309.
- Kumar, A., Walia, B. S. ve Bajaj, A., 2007. Influence of Fly Ash, Lime and Polyester Fibers on Compaction and Strength Properties of Expansive Soils, Journal of Materials in Civil Engineering, 19, 3, 242-248.
- Kumar, B., R., P. ve Sharma, R., S., 2004. Effect of Fly Ash on Engineering Properties of Expansive Soils, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 130, 7, 764-767.
- Ladd, C., C., Moh, Z., C. ve Lambe, T., W., 1960. Recent Soil-Lime Research at the Massachusetts Institute of Technology, Bull. Highw. Res., 262, 64-85.
- Laguros, J., G., Davidson, D., T., Handy, R., L. ve Chu, T., Y., 1956. Evaluation of Lime for Stabilization of Loess, ASTM, 56, 1301-1315.
- Lambe, P., C., Khosla, N., P. ve Jayaratne, N., N., 1990. Soil Stabilization in Pavement Structures, Report No. 232411-88-1, Transportation Studies Research, North Carolina.
- Landis, E., N. ve Corr, D., J., 2007. Three Dimensional Analysis of Air Void Systems in Concrete, Measuring, Monitoring and Modelling Concrete Properties, Springer, USA.
- Landis, E., N., Nagy, E., N. ve Keane, D., T., 2003. Microstructure and Fracture in Three Dimensions, Engineering Fracture Mechanics, 70, 911-925.
- Landis, E., N., Zhang, T., Nagy, E., N., Nagy, G. ve Franklin, W., R., 2006. Cracking, Damage and Fracture in Four Dimensions, Materials and Structures, 13, 357-364.

- Leckebush, R., 1984. Türkiye'deki Doğal Puzolanların Çimento Katkı Maddesi Olarak Kullanımı, Çimento Araştırma ve Geliştirme Merkezi, Ankara, 1-10.
- Ledbetter, R., H., 1985. Improvement of Liquefiable Foundation Conditions Beneath Existing Structures, Technical Report No. REMR-GT-2, Dept. of the Army, USA.
- Lees, G., Abdelkader, M., P. ve Hamdani, S., K., 1982. Effect of the Clay Fraction on Some Mechanical Properties of Lime-Soil Mixtures, Journal of Highway Engineering, 29, 11, 2-9.
- Lemaire, K., Deneele, D., Bonnet, S. ve Legret, M., 2013. Effects of Lime and Cement Treatment on the Physicochemical, Microstructural and Mechanical Characteristics of a Plastic Silt, Engineering Geology, 166, 255-261.
- Li, M., Chai, S.X., Zhang, H.Y., Du, H.P. ve Wei, L., 2012. Feasibility of Saline Soil Reinforced With Treated Wheat Straw and Lime, Soils and Foundations, 52, 2, 228-238.
- Lin, D., F., Lin, K., L. ve 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.
- Little, N., D., 1987. Fundamentals of the Stabilization of Soil with Lime, Bulletin No. 232, National Lime Association, Arlington, 19-20.
- Liu, J., Wang, T. ve Tian, Y., 2010. Experimental Study of the Dynamic Properties of Cement- and Lime-Modified Clay Soils Subjected to Freeze-Thaw Cycles, Cold Regions Science and Technology, 61, 29-33.
- Liu, P. ve Shang, J. Q., 2014. Improvement of Marine Sediment by Combined Elektrokinetic and Chemical Treatment, International Journal of Offshore and Polar Engineering, 24, 3, 232-240.
- Lucena, L. C. F. L., 2012. Estudo da Aplicação da Mistura Solo-lodo em Base e Subbase de Pavimentos, Doktora Tezi, Universidade Federal de Pernambuco, Recife.
- Lucena, L. C. F. L., Juca, J. F. T., Soares, J. B. ve Portela, M. G., 2014. Potential Uses of Sewage Sludge in Highway Construction, Journal of Materials in Civil Engineering, 26, 9.
- Manasseh, J. ve Olufemi, A., I., 2008. Effect of Lime on Some Geotechnical Properties of Igumale Shale, Electronic Journal of Geotechnical Engineering, 13, 1-12.
- Manso, J. M., Ortega-López, V., Polanco, J.A. ve Setién, J., 2013. The Use of Ladle Furnace Slag in Soil Stabilization, Construction and Building Materials, 40, 126-134.

- Martz, H., E., Roberson, G., P., Skeate, M., F., Schneberk, D., J. ve Azevedo, S., G., 1991. Computerized Tomography Studies of Concrete Samples, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, 2, 216-226.
- Massazza, F., 1989. Puzolanlı Çimentolar ve Kullanım Alanları, Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği, Mayıs, Ankara.
- Mathew, P., K. ve Rao, S., N., 1997. Effect of Lime Cation Exchange Capacity of Marine Clay, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 123, 2, 183-185.
- McCallister, L., D. ve Petry, T., M., 1990. Property Changes in Lime Treated Expansive Clays under Continious Leaching, Report No. DACA 39-88-M-0550, US Army Corps of Engineers, Washington.
- McCave, I., N., Bryant, R., J., Cook, H., F. ve Coughanowr, C., A., 1986. Evaluation of Laser Diffraction Size Analyser for Use with Natural Sediments, Journal of Sedimentary Petrology, 56, 561-564.
- Miller, G. ve Azad, S., 2000. Influence of Soil Type on Stabilization with Cement Kiln Dust, Construction and Building Materials, 14, 2, 89-97.
- Mishra, J., Yadav R., K. ve 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.
- Mitchell, J., K. ve Gallagher, P., M., 1998. Guidelines for Ground Improvement of Civil Works and Military Structures and Facilities, Publication No. ETL 1110-1-185, U.S. Army of Corps. Of Engineers, Washington, 109 p.
- Mitchell, J., K., 1976. Stabilization of Soils for Foundations of Structures, University of California-Department of Civil Engineering Press, Berkeley.
- Mitchell, J., K., 1993. Fundamentals of Soil Behavior, Wiley, New York.
- Morgan, I., L., Ellinger, H., Klinksiek, R. ve Thompson, J., N., 1980. Examination of Concrete by Computerized Tomography, ACI Journal Proceedings, 77, 1, 23-27.
- Nalbantoğlu, Z., 2004. Effectiveness of Class C Fly Ash as an Expansive Soil Stabilizer, Construction and Building Materials, 18, 377-381.
- Nalbantoğlu, Z., 2006. Lime Stabilization of Expansine Clay, Expansive Soils: Recent Advances in Characterization and Treatment, Taylor-Francis/Belkema, London, 341-348.
- Nelson, J., D. ve Debora, J., M., 1992. Expansive Soils-Problems and Practice in Foundation and Pavement Engineering, John Willey&Sons Inc., London, 259-261.

- Okafor, F., O. ve Okonkwo, U., N., 2009. Effects of Rice Hush on Some Geotechnical Properties of Lateritic Soil, Leonardo Electronic Journal of Practices and Technologies, 15, 67-74.
- Okucu, A., 1998. Bigadiç ve Turnatepe (Balıkesir) Yörelerindeki Zeolitik ve Perlitik Tüflerin Puzolanik Özellikleri, Doktora Tezi, Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir.
- Okyay, U., S. ve Dias, D., 2010. Use of Lime and Cement Treated Soils as Pile Supported Load Transfer Platform, Engineering Geology, 114, 34-44.
- Ola, S., A., 1978. The Geology and Geotechnical Properties of the Black Cotton Soils of North-Eastern Nigeria, A. A. Balkema, Rotterdam, 131-144.
- Olgun, M., 2013. The Effects and Optimization of Additives for Expansive Clays Under Freeze-Thaw Conditions, Cold Regions Science and Technology, 93, 36-46.
- Oza, J., B. ve Gundaliya, P., J., 2013. Study of Black Cotton Soil Characteristics with Cement Waste Dust and Lime, Procedia Engineering, 51, 110-118.
- Önal, O., 2015. Lime Stabilization of Soils Underlying a Salt Evaporation Pond: A Laboratory Study, Marine Georesources&Geotechnology, 33, 5, 391-402.
- Önalp, A., 1983. İnşaat Mühendislerine Geoteknik Bilgisi Cilt 2, KTÜ Yayın No:3, Trabzon, 1225 s.
- Özaydın, K., 1995. Zemin Mekaniği, Birsen Yayınevi, İstanbul, 261 s.
- Özer, M. ve Orhan, M., 2007. Zeminlerin Tane Büyüklüğü Dağılımının Lazer Kırınım Yöntemiyle Belirlenmesi, Politeknik Dergisi, 3, 331-337.
- Özer, M., Işık, N., S. ve Orhan, M., 2009. Lazer Kırınım ve Hidrometre Yöntemleriyle Belirlenen Kil Yüzdelerinin İstatistiksel Yöntemlerle Karşılaştırılması, 5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu, Mayıs, Karabük, Bildiriler Kitabı, 1-7.
- Palabıyık, H. ve Altunbaş, D., 2004. Kentsel Katı Atıklar ve Yönetimi, Çevre Sorunlarına Çağdaş Yaklaşımlar: Ekolojik, Ekonomik, Politik ve Yönetimsel Perspektifler, Marin, C. ve Yıldırım, U., Beta, İstanbul, 103-124.
- Pektaş, C., 2012. Muhtelif Katkı Maddeleri ve/veya Donatı Kullanımı ile Yapılan Zemin İyileştirme (Stabilizasyon) Yöntemlerinin Teorik ve Deneysel Olarak Ayrıntılı Bir İrdeleme ve Değerlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- Prakabar, J., Dendorkar, N. ve Morchhale, R., K., 2004. Influence of Fly Ash on Strength Behavior of Typical Soils, Construction and Building Materials, 18, 263-267.

- Puppala, A., J. ve Hanchanloet, S., 1999. Evaluation of a New Chemical Treatment Method on Strength and Resilient Properties of a Cohesive Soil, Record No. 990389, Transportation Research Board, Washington.
- Rahman, M., A., 1986. The Potentials of Some Stabilizers for Use of Laterite Soil in Construction, Journal of Building and Environment, 21, 1, 57-61.
- Rahmat, M.N. ve Kinuthia, J.M., 2011. Effects of Mellowing Sulfate-Bearing Clay Soil Stabilized with Wastepaper Sludge Ash for Road Construction, Engineering Geology, 117, 170-179.
- Rajasekaran, G. ve Rao, S., N., 2002. Permeability Characteristics of Lime Treated Marine Clay, Ocean Engineering, 29, 113-127.
- Rodriguez, A., R., Castillo, H. ve Sowers, G., F., 1973. Soil Mechanics in Highway Engineering, Trans Tech Publications, Germany.
- Runigo, B. L., Ferber, V., Cui, Y. J., Cuisinier, O. ve Deneele, D., 2011. Performance of Lime-Treated Silty Soil Under Long-Term Hydraulic Conditions, Engineering Geology, 118, 20-28.
- Sabat, A.K. ve Das, S.K., 2009. Design of Low Volume Rural Roads Using Lime Stabilized Expansive Soil-Quarry Dust Mixes Subgrade, Indian Highways, 37, 21-27.
- Sabat, A.K., 2012. A Study on Some Geotechnical Properties of Lime Stabilised Expansive Soil-Quarry Dust Mixes, International Journal of Emerging Trends in Engineering and Development, 2, 1, 42-49.
- Sakr, M., A., Shahin, M., A. ve Yasser, M., M., 2009. Utilization of Lime for Stabilizing Soft Clay Soil of High Organic Content, Geotechnical and Geological Engineering, 27, 1, 105-113.
- Saleh, H., 2004. The Use of X-Ray Computed Tomography (CT) Techniques to Study the Internal Structures of Concrete, Second MENDT Proceedings, 9, 6.
- Sante, M., D., Fratolocchi, E., Mazzieri, F. ve Pasqualini, E., 2014. Time of Reactions in a Lime Treated Clayey Soil and Influence of Curing Conditions on its Microstructure and Behaviour, Applied Clay Science, 99, 100-109.
- Saussaye, L., Boutouil, M., Baraud, F. ve Leleyter, L., 2014. Influence of Anions on the Geotechnical Properties of Soils Treated with Hydraulic Binders: Individual and Coupling Effects, Construction and Building Materials, 65, 303-309.
- Seco, A., Ramírez, F., Miqueleiz, L. ve García, B., 2011. Stabilization of Expansive Soils for Use in Construction, Applied Clay Science, 51, 348-352.
- Seçer, İ., 2013. SPSS ve LISREL ile Pratik Veri Analizi: Analiz ve Raporlaştırma, Anı Yayıncılık, Ankara.

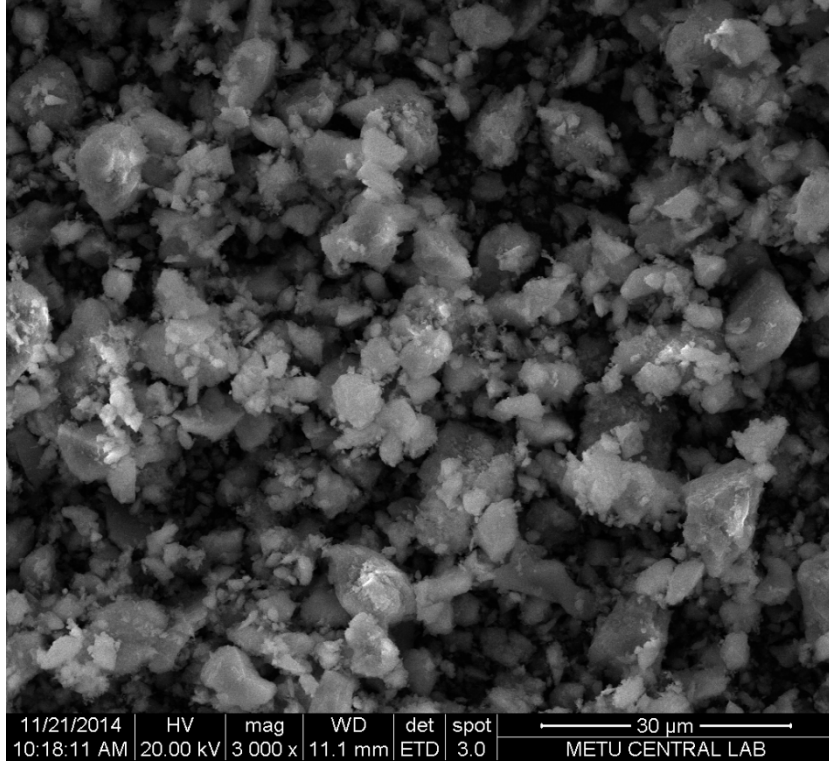
- Sezer, A., İnan, G., Yılmaz, H. R. ve Ramyar, K., 2006. Utilization of a Very High Lime Fly Ash for Improvement of Izmir Clay, Building and Environment, 41, 150-155.
- Silitonga, E., Levacher, D. ve Mezazigh, S., 2009. Effect of the Use of Fly Ash as a Binder on the Mechanical Behaviour of Treated Dredged Sediments, Environmental Technology, 30, 8, 799-807.
- Sivapullaiah, P., V. ve Lakshmikantha, H., 2005. Lime Stabilized Illite as a Liner, Ground Improvement, 9, 1, 39-45.
- Şenol, A. ve Edil, T., B., 2004. Uçucu Kül ile Stabilize Edilen Yumuşak Zeminlerin CBR Sonuçlarının Değerlendirilmesi, Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Onuncu Ulusal Kongresi, Eylül, İstanbul, Bildiriler Kitabı, 275-280.
- Tekin, İ., 2005. Çimento Harçlarının Porozitesinin Bilgisayarlı Tomografi ile Belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Tekin, İ., 2010. Sülfat Etkisine Maruz Farklı Çimento Harçlarındaki Makro Boşluk Yapısı Gelişiminin Bilgisayarlı Tomografi Yöntemi ile İncelenmesi, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Tekin, İ., Birgül, R. ve Aruntaş, H., Y., 2007. Bilgisayarlı Tomografi Cihazının Çimento Harcındaki Boşlukların Gelişiminin Belirlenmesinde Kullanılması, Third International Symposium of Sustainability in Cement and Concrete, İstanbul, 553-562.
- Terrel, R., L., Epps, A., Barenberg, J., E., Mitchell, J., K. ve Thompson, M., R., 1979. Soil Stabilization, FHWA, U.S. Department of Transportation.
- Tokay, M., 2002. Cürufklar ve Cürufllu Çimentolar, TÇMB Ar-Ge Enstitüsü, Ankara.
- Tonoz, M., C., Ulusay, R. ve Gökçeoğlu, C., 2004. Effect of Lime Stabilization on Engineering Properties of Expansive Ankara Clay, Earth and Environmental Science, 104, 466-474.
- TRB, 1987. State of the Art Report, Transportation Research Board, Washington, D.C., 5.
- Tumluer, G., 2006. Çimento Katkılı Kumlu Zeminlerin Mukavemeti, Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.
- Tuncel, E., 2002. Klinik Radyoloji, Nobel&Güneş, İstanbul, 230-352.
- Tunç, A., 2001. Yol Malzemeleri ve Uygulamaları, Atlas Yayın Dağıtım, İstanbul, 840 s.
- Tunç, A., 2002. Yol Mühendisliğinde Geoteknik ve Uygulamaları, Atlas Yayın Dağıtım, İstanbul, 912 s.
- Türköz, M., 2006. Şişen Killerin Kireç Katkısı ile Stabilizasyonu ve Eskişehir-Meşelik Killerine Uygulanması, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Müh. Mim. Fak. Dergisi, 19, 2, 75-88.

- U.S. Army Corps. of Eng., 2003. Guidelines on Ground Improvement for Structures and Facilities, Research No. 20314-1000, Department of the Army, Washington.
- URL-1, www.bayburttasi.com. 06 Nisan 2014.
- Uzuner, B., A., 2013. Temel Mühendisliğine Giriş, Derya Kitabevi, Trabzon, 342-359.
- Van Impe, W., F., 1989. Soil Improvement Techniques and Their Evolution, A.A. Balkema, Rotterdam, 125 s.
- Vinegar, H., J., 1986. X-Ray CT and NMR Imaging of Rocks, Journal of Petroleum Technology, 257-259.
- Wang, D., Ma, W., Niu, Y., Chang, X. ve Wen, Z., 2007. Effects of Cycling Freezing and Thawing on Mechanical Properties of Qinghai-Tibet Clay, Cold Regions Science and Technology, 48, 34-43.
- Wellington, S., L. ve Vinegar, H., J., 1990. X-Ray Computerized Tomography, Journal of Petroleum Technology, 885-898.
- Winterkorn, H., F. ve Fang, H., Y., 1975. Foundation Engineering Handbook, Van Nostrand Reinhold Publication, London, 176 s.
- Wong, L., S., Hashim, R. ve Ali, F., H., 2008. Strength and Permeability of Stabilized Peat Soil, Journal of Applied Sciences, 8, 21, 3986-3990.
- Wong, R., C., K. ve Chau, K., T., 2005. Estimation of Air Void and Aggregate Spatial Distributions in Concrete Under Uniaxial Compression Using Computer Tomography Scanning, Cement and Concrete Research, 35, 1566-1576.
- Yarbaşı, N., Kalkan, E. ve 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, 44-54.
- Yıldırım, S., 2002. Zeminlerin İncelenmesi ve Temel Tasarımı, Birsen Yayınevi, İstanbul, 466 s.
- Yıldız, M. ve Soğancı, A. S., 2012. Effect of Freezing and Thawing on Strength and Permeability of Lime-Stabilized Soils, Scientia Iranica Transactions A: Civil Engineering, 19, 4, 1013-1017.
- Yıldız, M., 1998. Katı Atık Depolarında Taban Malzemesinin Hidrolik ve Mukavemet Özelliklerinin İyileştirilmesi, Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- Yılmaz, A., O., Alp, İ., Demir, C., Arslan, M. ve Kolaylı, H., 2005. Doğu ve Güneydoğu Maden Kaynaklarının Değerlendirilmesi Sempozyumu, Nisan, Diyarbakır, Bildiriler Kitabı, 153-157.
- Yılmaz, I. ve Civelekoglu, B., 2009. Gypsum: An Additive for Stabilization of Swelling Clay Soils, Applied Clay Science, 44, 166-172.

- Zaimoğlu, A., S., 2010. Freezing-Thawing Behavior of Fine-Grained Soils Reinforced with Polypropylene Fibers, Cold Regions Science and Technology, 60, 63-65.
- Zha, F., Liu, S., Du, Y. ve Cui, K., 2008. Behavior of Expansive Soils Stabilized with Fly Ash, Natural Hazards, 47, 3, 509-523.
- Zhang, W., Xi, W., Wang, B. ve Hong, B., Test Study of High Liquid Limit Clay Modified by Quick Lime Used as Sub-grade Material, Journal of Central South University of Technology, 15, 2, 126-130.
- Zukri, A., 2013. Pekan Soft Clay Treated with Hydrated Lime As a Method of Soil Stabilizer, Procedia Engineering, 53, 37-41.

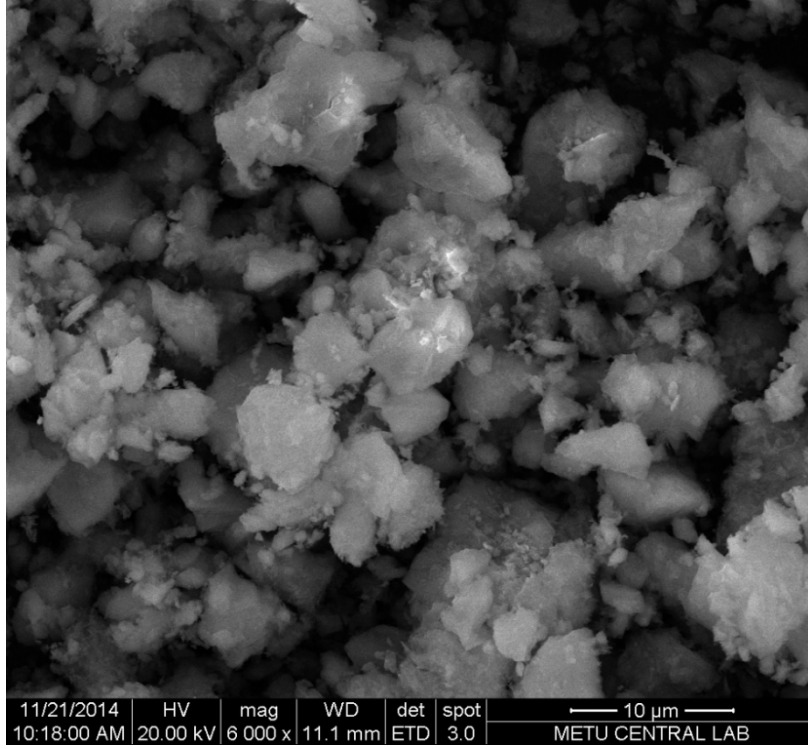
6. EKLER

Ek 1. BT Atıklarının SEM Görüntüleri

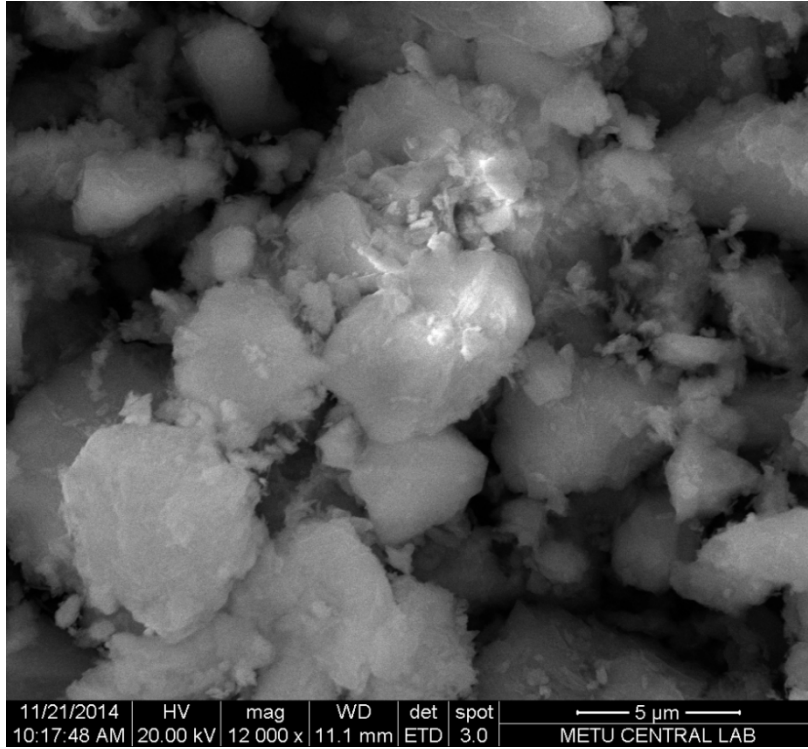


Ek Şekil 1.1. BYT atıklarının 3000 kat büyütülmüş SEM görüntüsü

Ek 1'in devamı

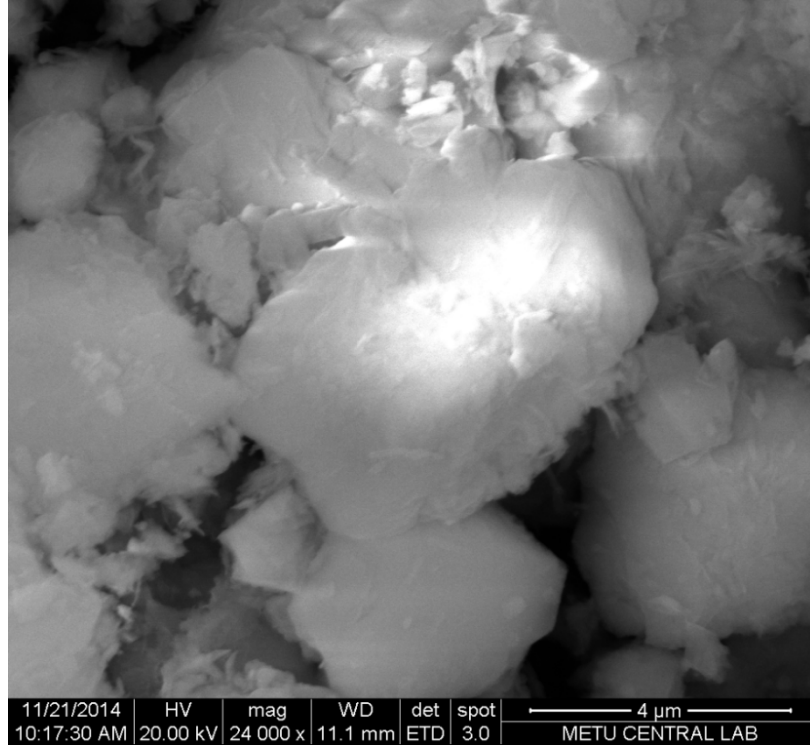


Ek Şekil 1.2. BYT atıklarının 6000 kat büyütülmüş SEM görüntüsü

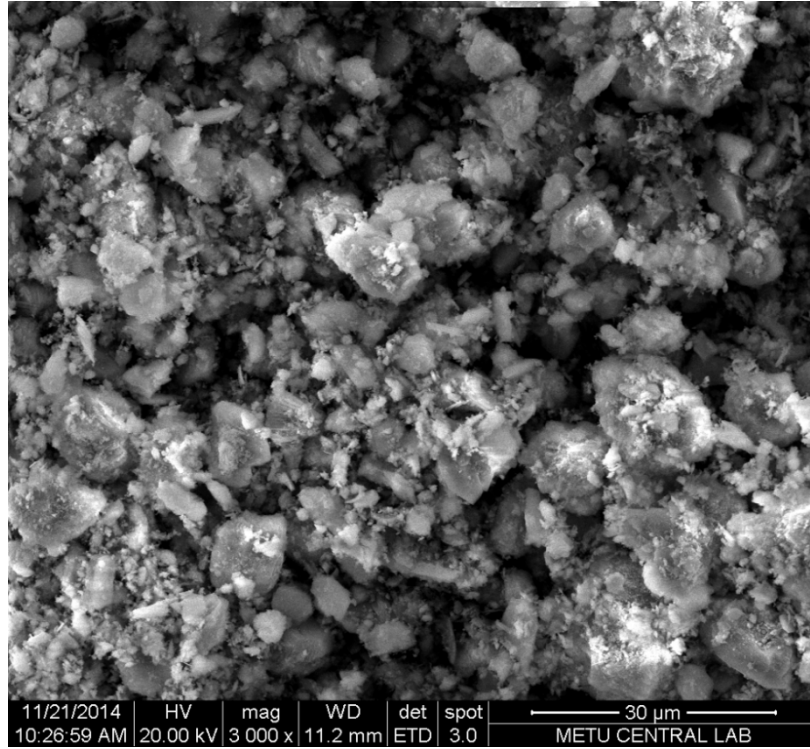


Ek Şekil 1.3. BYT atıklarının 12000 kat büyütülmüş SEM görüntüsü

Ek 1'in devamı

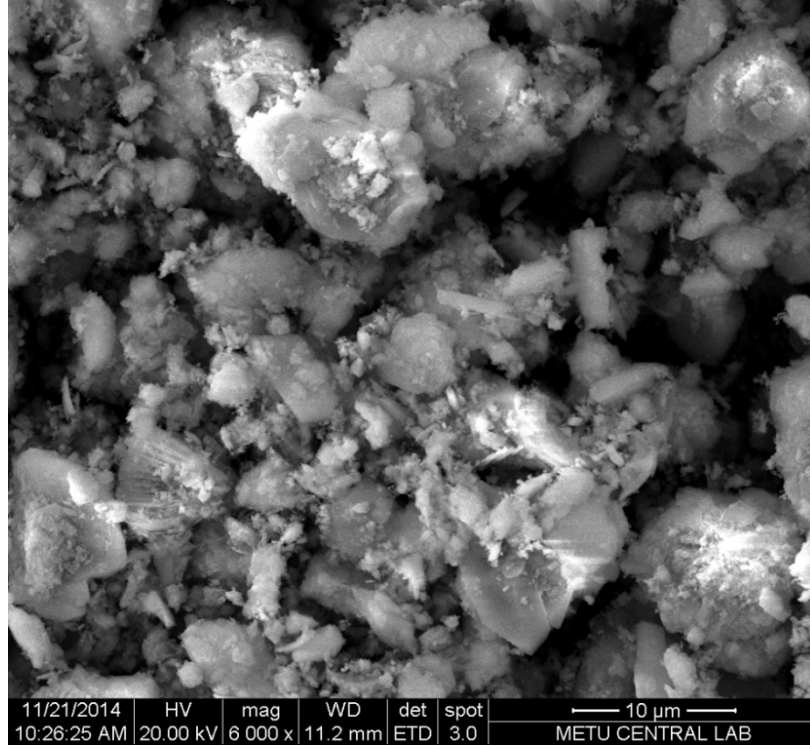


Ek Şekil 1.4. BYT atıklarının 24000 kat büyütülmüş SEM görüntüsü

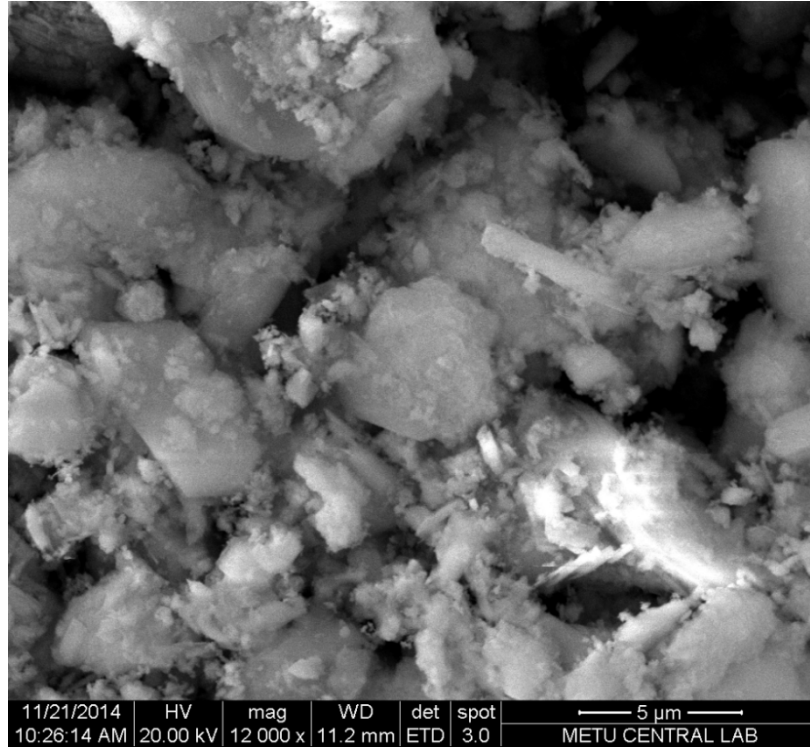


Ek Şekil 1.5. BST atıklarının 3000 kat büyütülmüş SEM görüntüsü

Ek 1'in devamı

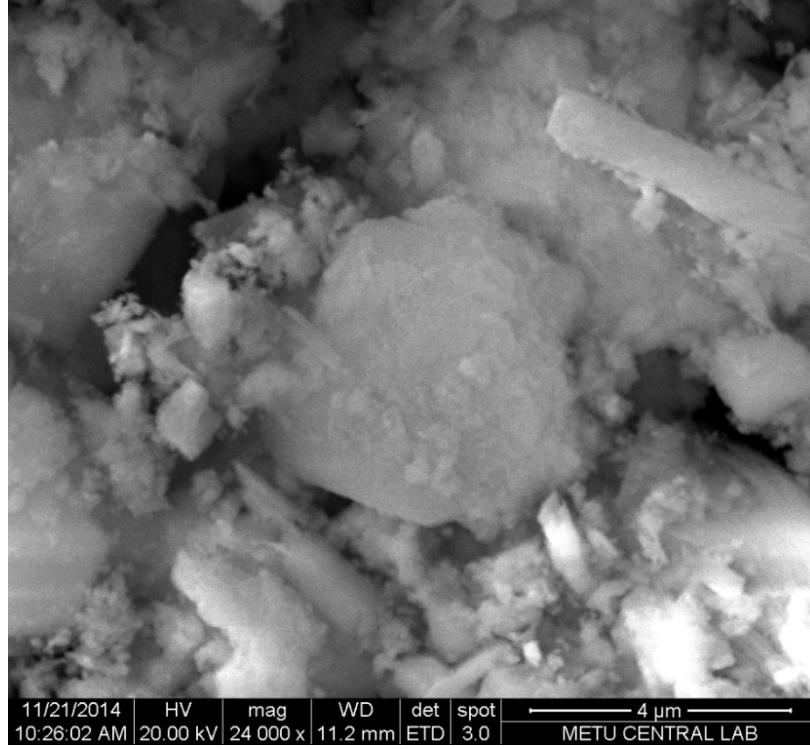


Ek Şekil 1.6. BST atıklarının 6000 kat büyütülmüş SEM görüntüsü

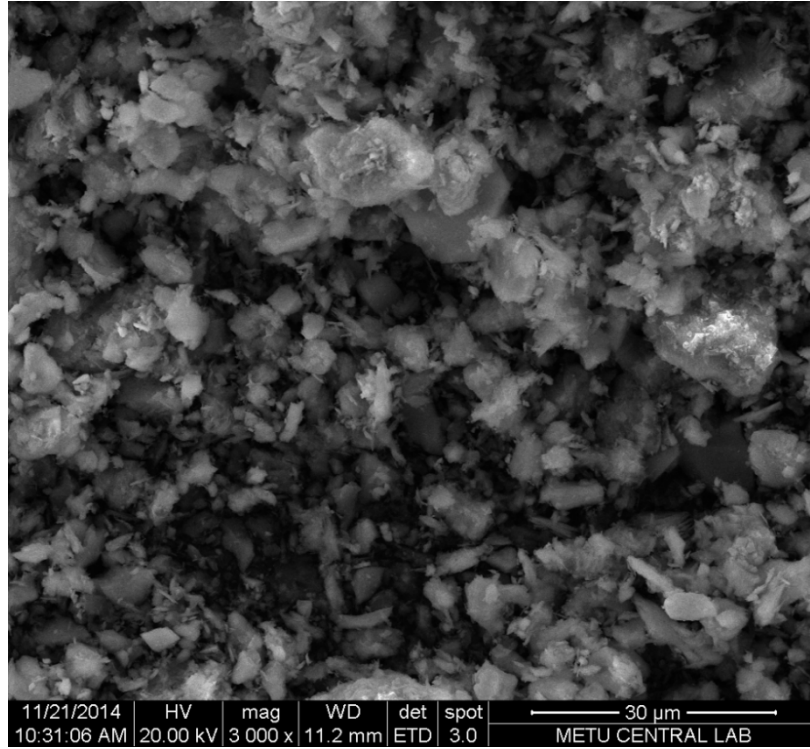


Ek Şekil 1.7. BST atıklarının 12000 kat büyütülmüş SEM görüntüsü

Ek 1'in devamı

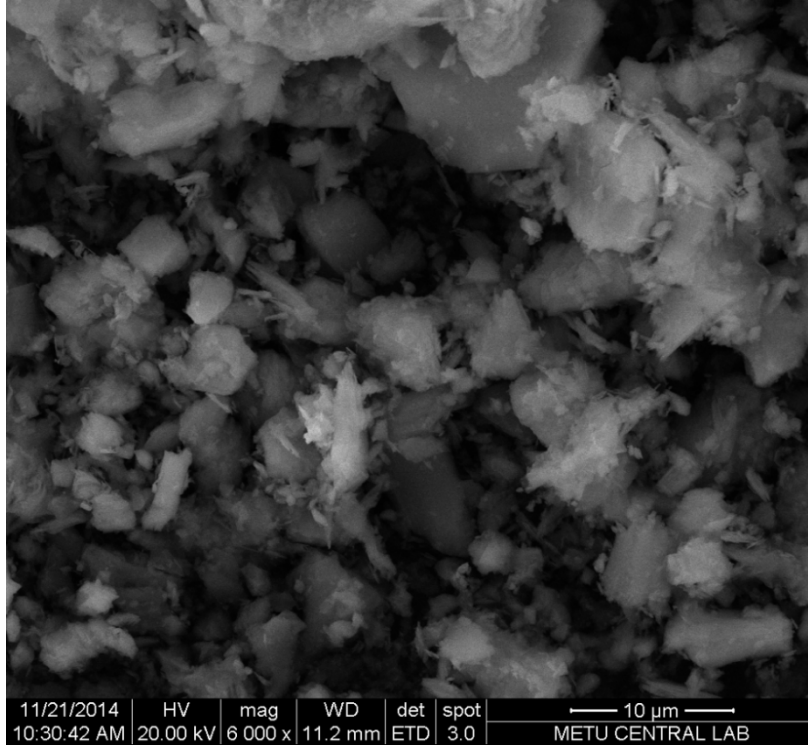


Ek Şekil 1.8. BST atıklarının 24000 kat büyütülmüş SEM görüntüsü

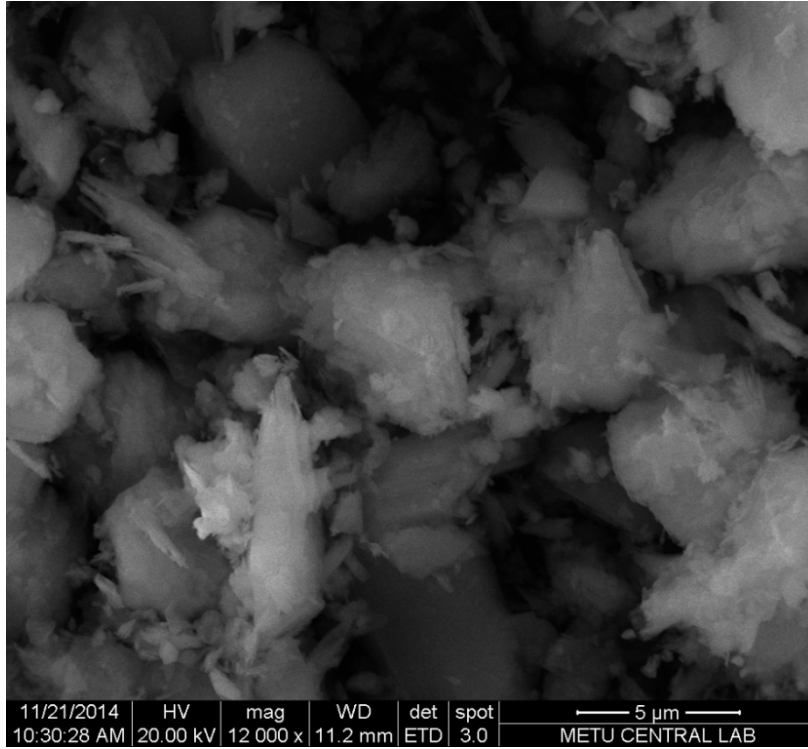


Ek Şekil 1.9. BBT atıklarının 3000 kat büyütülmüş SEM görüntüsü

Ek 1'in devamı

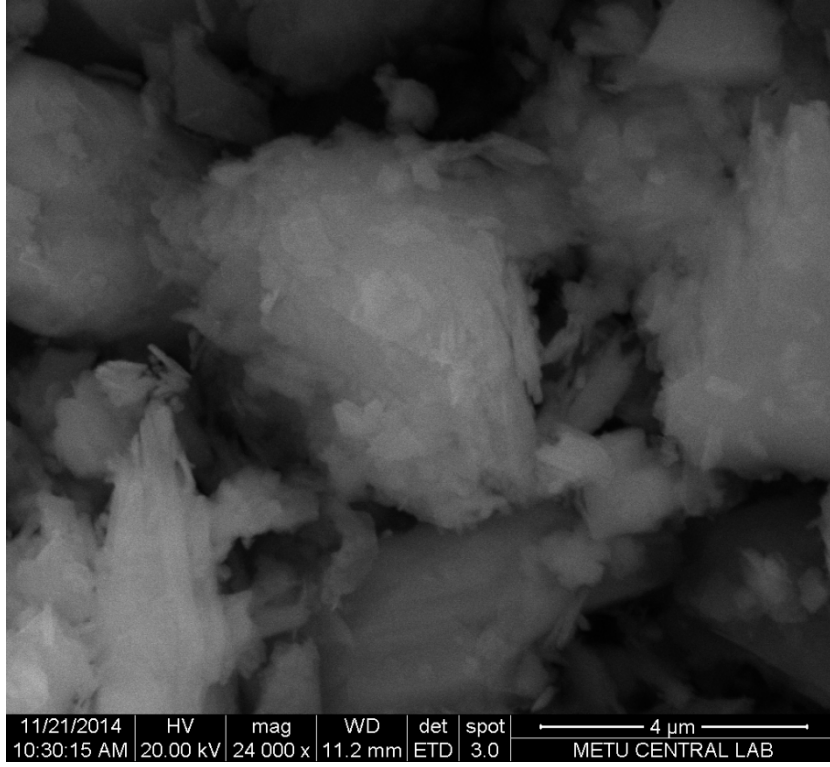


Ek Şekil 1.10. BBT atıklarının 6000 kat büyütülmüş SEM görüntüsü

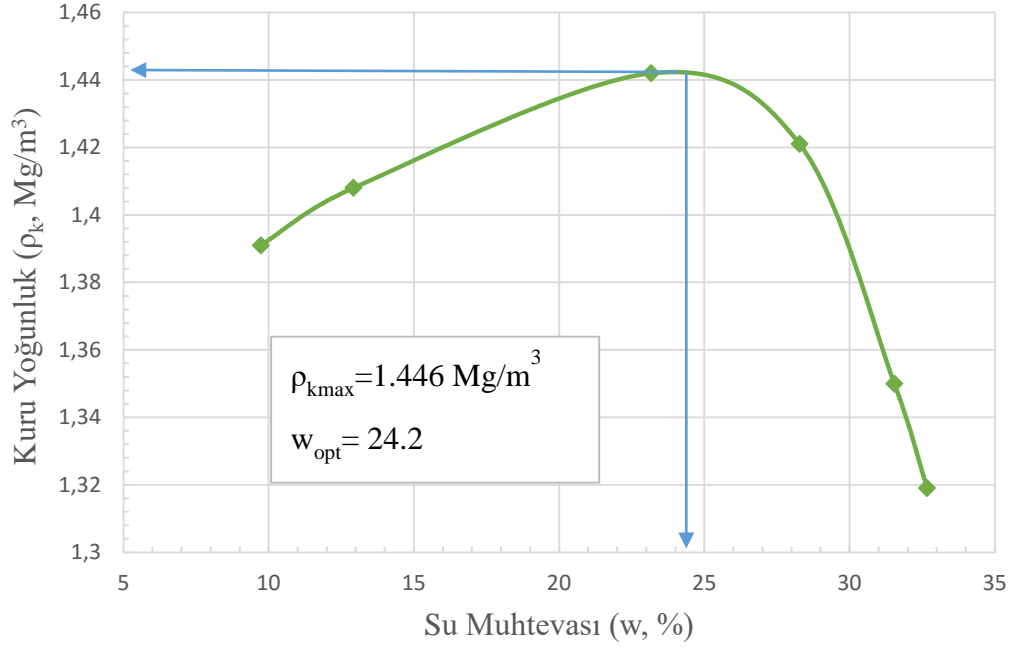


Ek Şekil 1.11. BBT atıklarının 12000 kat büyütülmüş SEM görüntüsü

Ek 1'in devamı

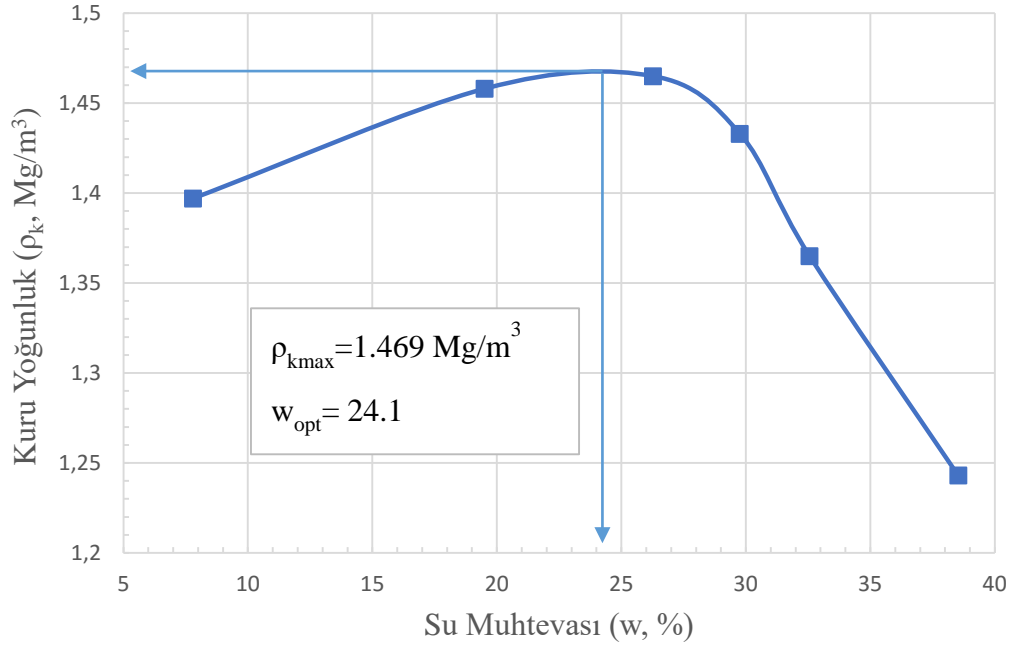


Ek Şekil 1.12. BBT atıklarının 24000 kat büyütülmüş SEM görüntüsü

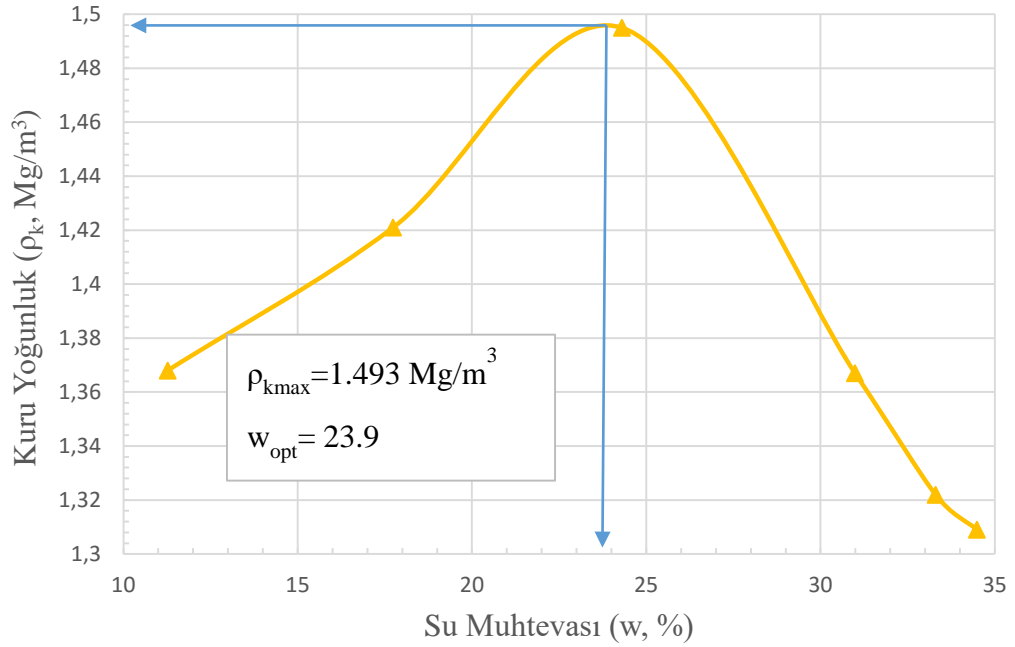
Ek 2. Kompaksiyon Deney Sonuçları

Ek Şekil 2.1. Doğal zemin numunesine ait kompaksiyon eğrisi

Ek 2'nin devamı

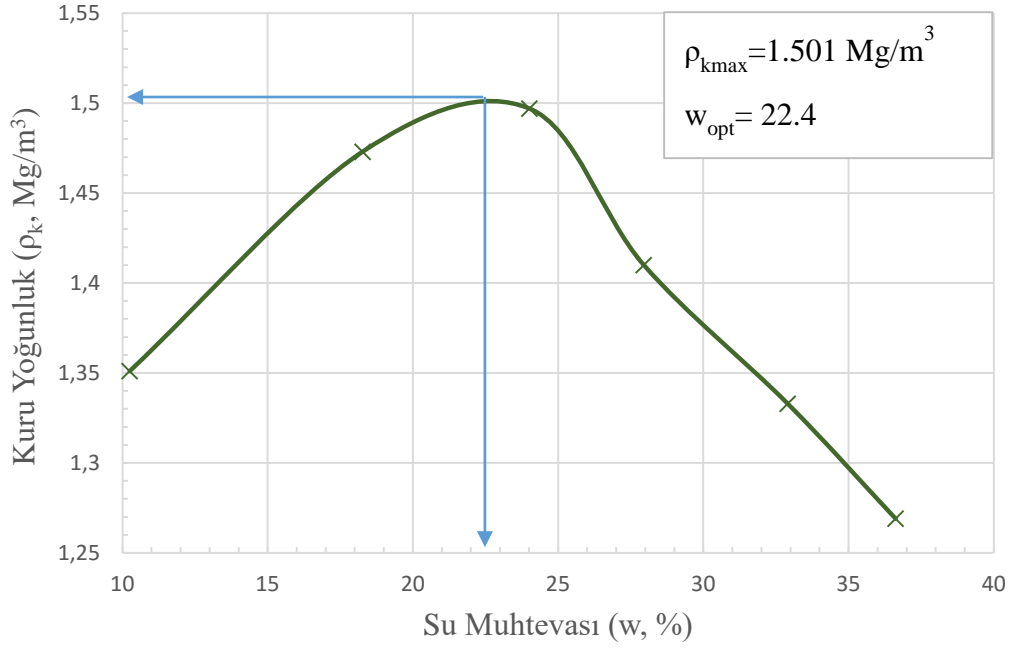


Ek Şekil 2.2. ZB5 karışımına ait kompaksiyon eğrisi

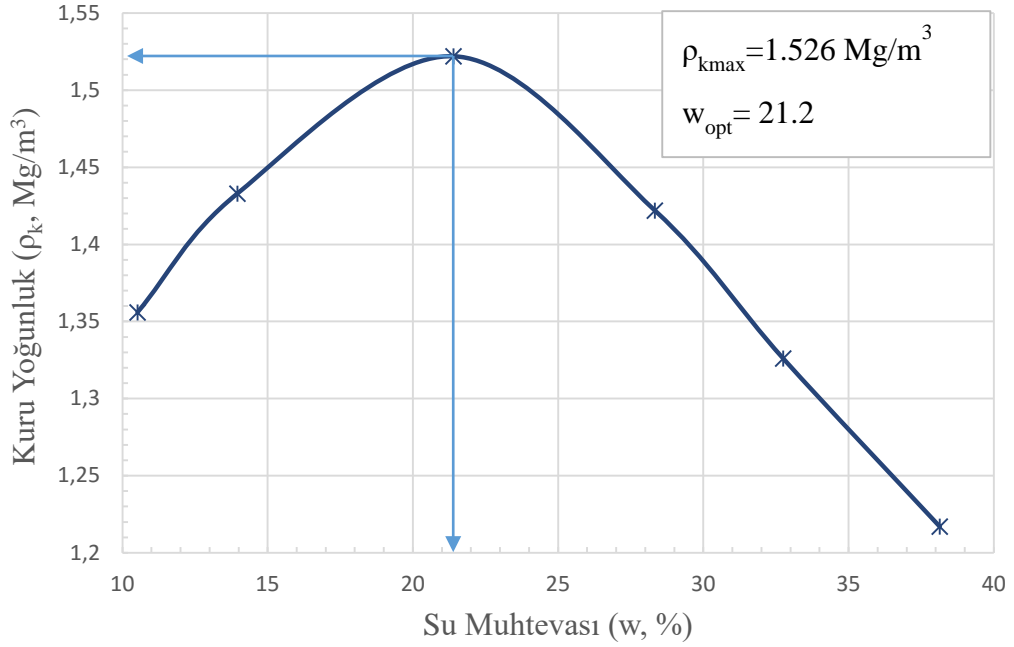


Ek Şekil 2.3. ZB10 karışımına ait kompaksiyon eğrisi

Ek 2'nin devamı

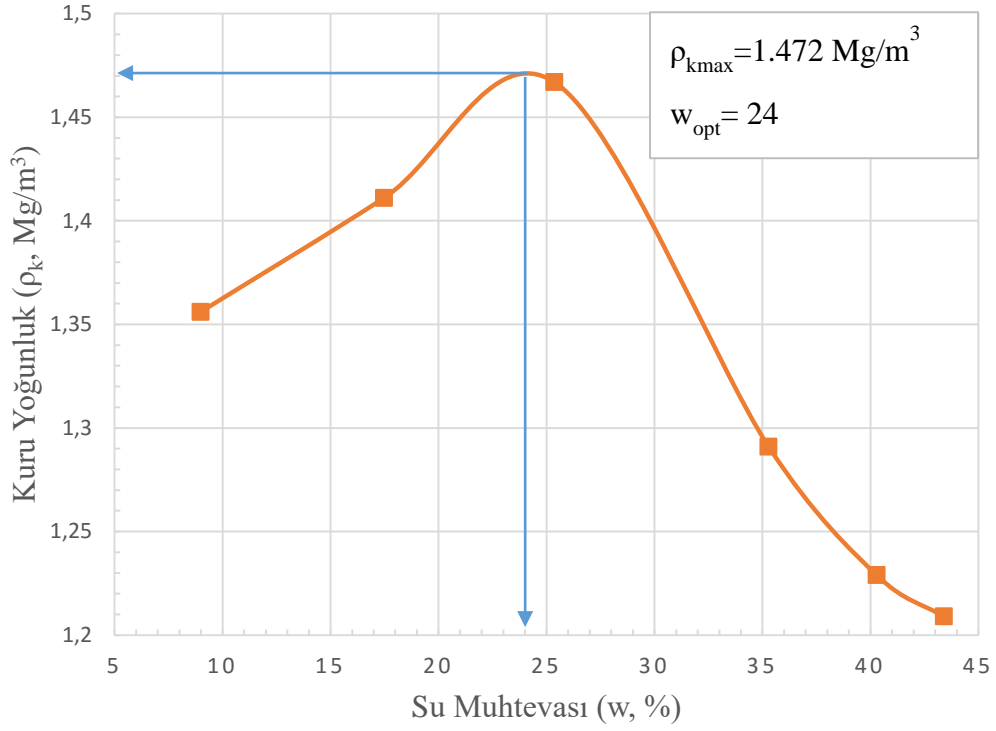


Ek Şekil 2.4. ZB15 karışımına ait kompaksiyon eğrisi

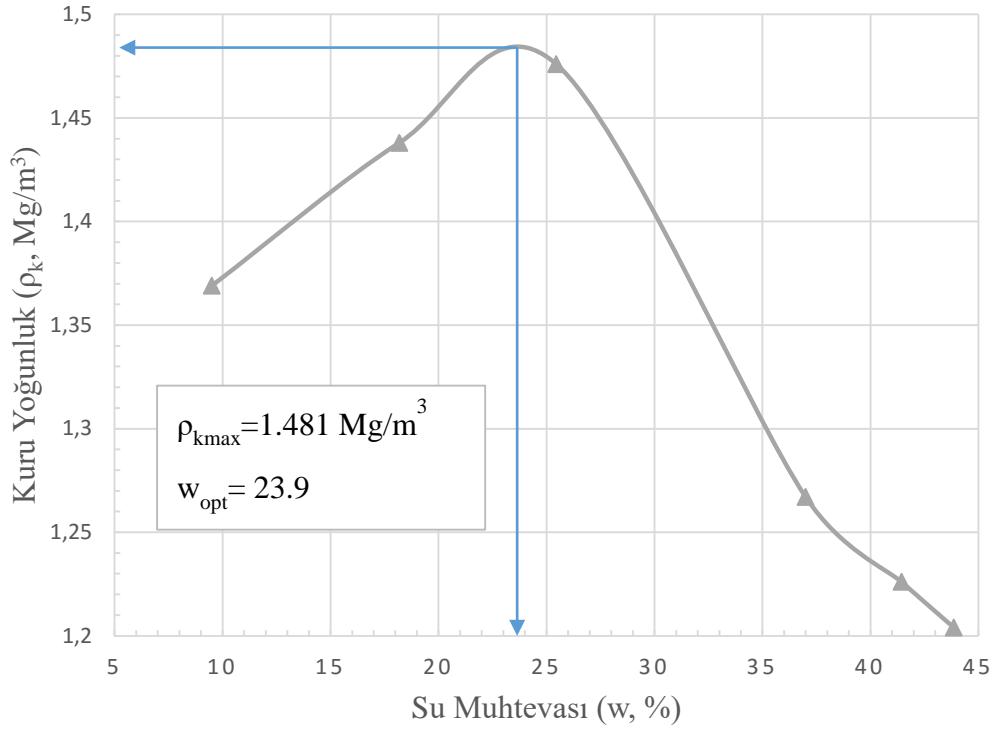


Ek Şekil 2.5. ZB20 karışımına ait kompaksiyon eğrisi

Ek 2'nin devamı

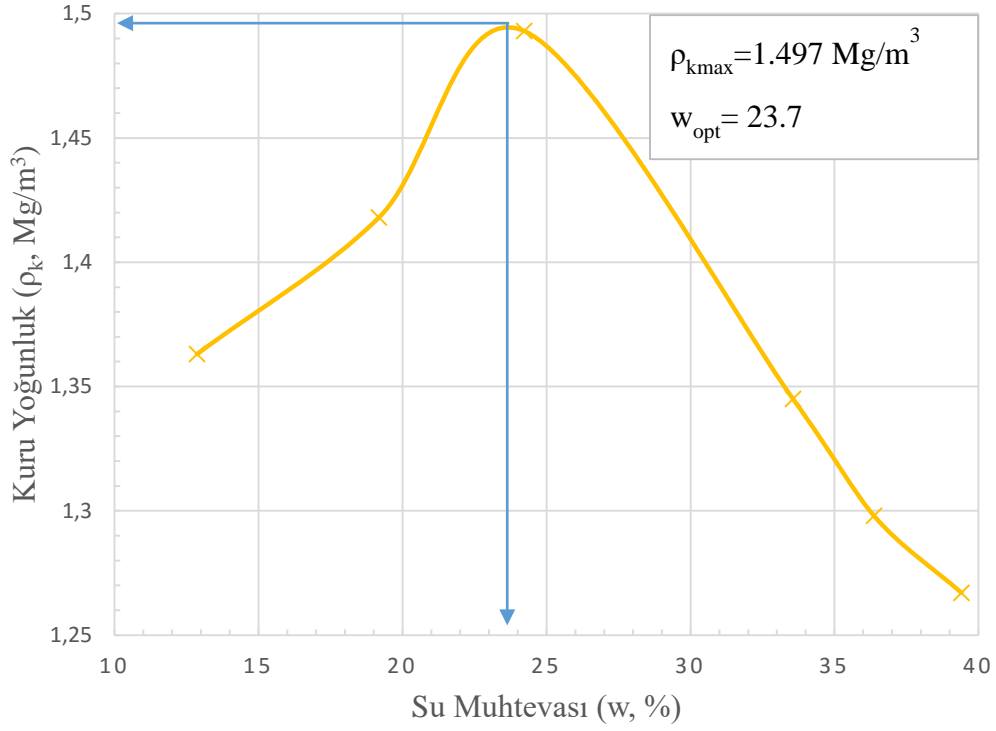


Ek Şekil 2.6. ZY5 karışımına ait kompaksiyon eğrisi

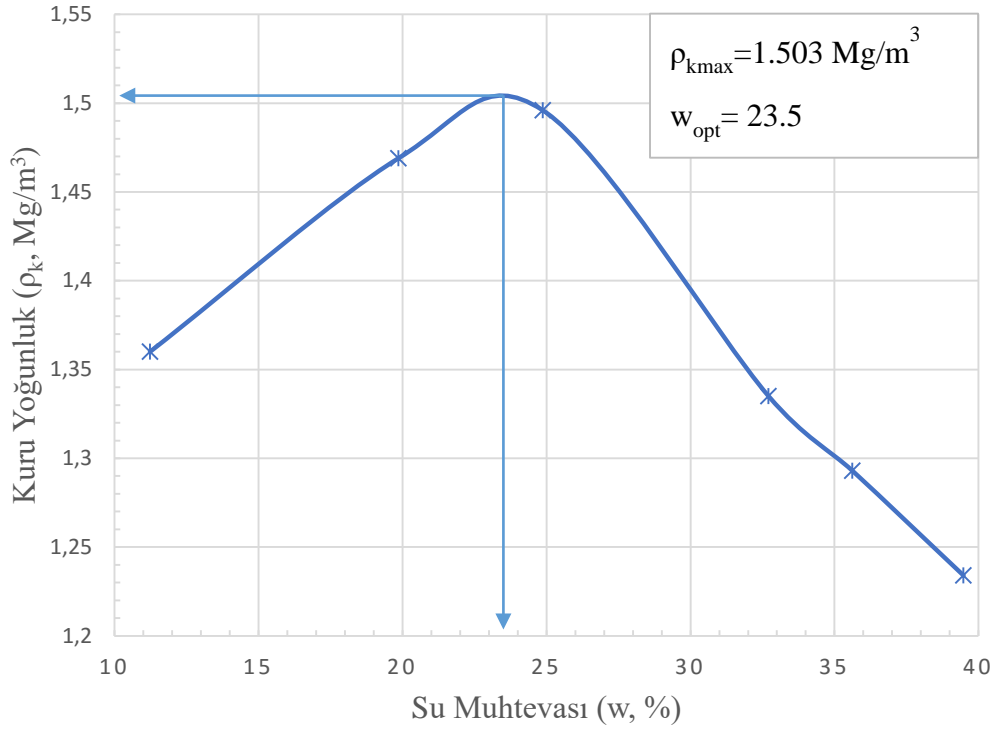


Ek Şekil 2.7. ZY10 karışımına ait kompaksiyon eğrisi

Ek 2'nin devamı

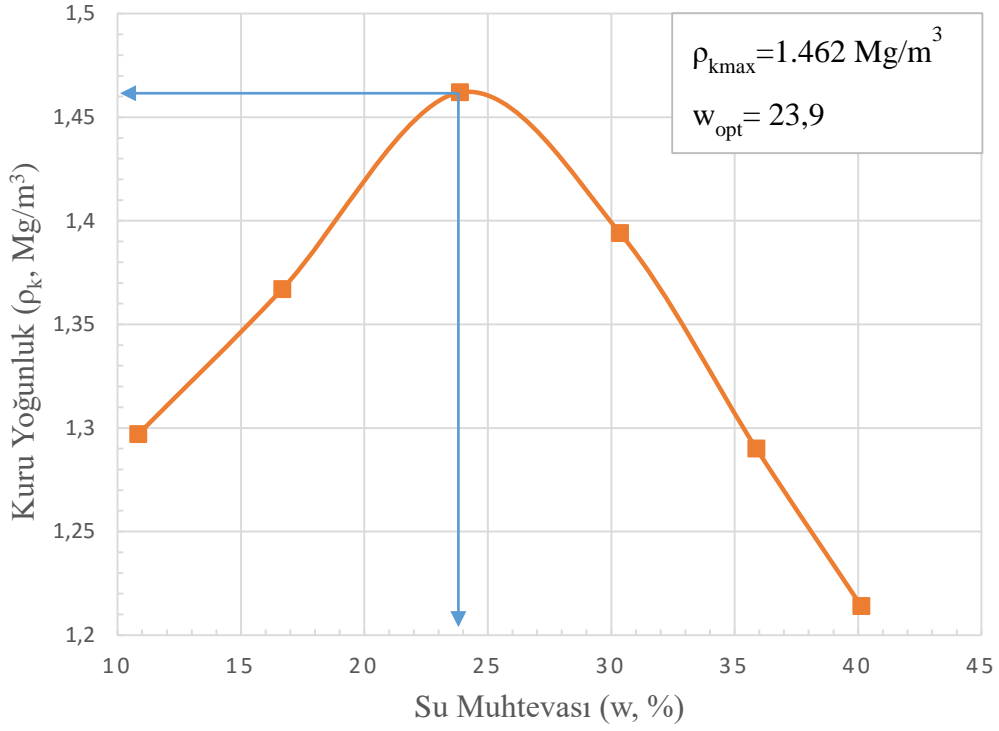


Ek Şekil 2.8. ZY15 karışımına ait kompaksiyon eğrisi

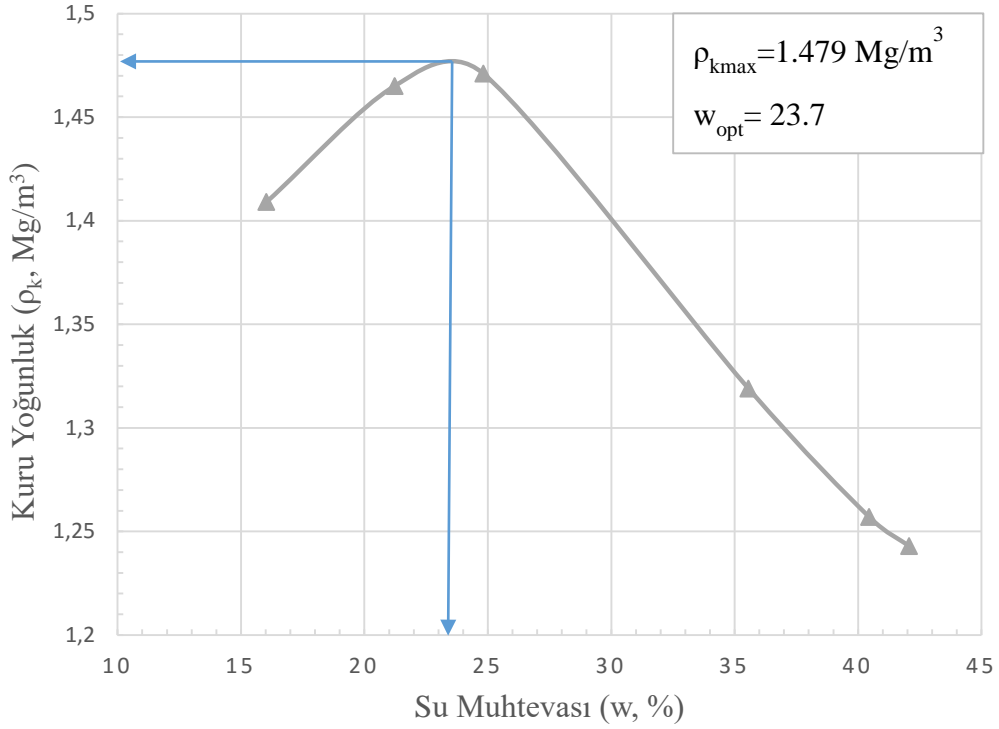


Ek Şekil 2.9. ZY20 karışımına ait kompaksiyon eğrisi

Ek 2'nin devamı

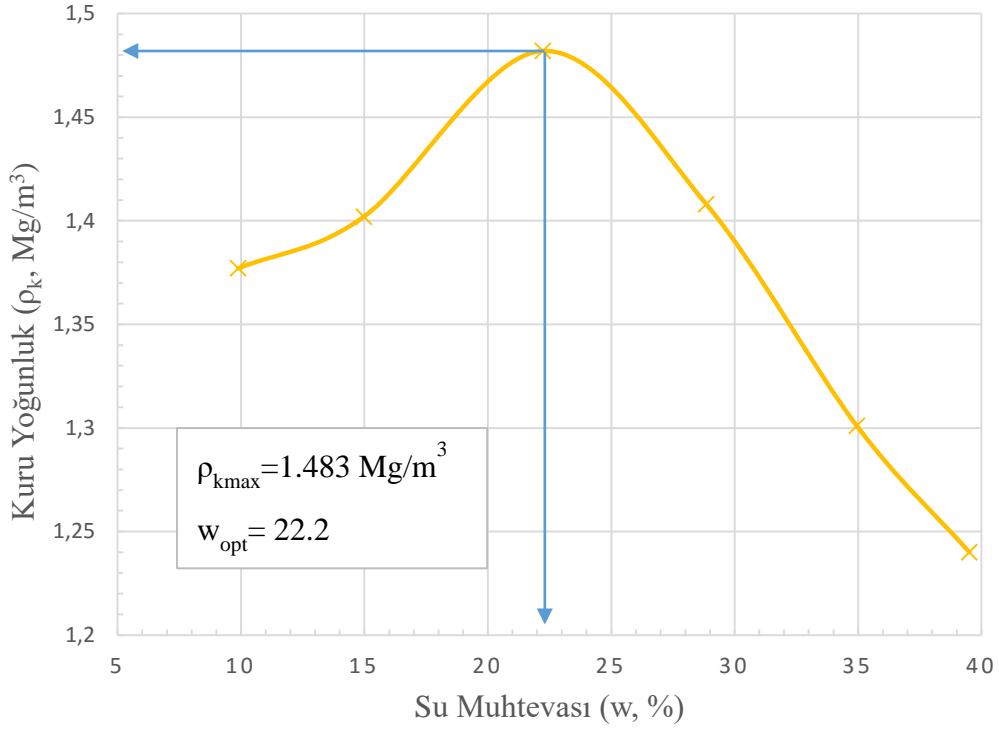


Ek Şekil 2.10. ZS5 karışımına ait kompaksiyon eğrisi

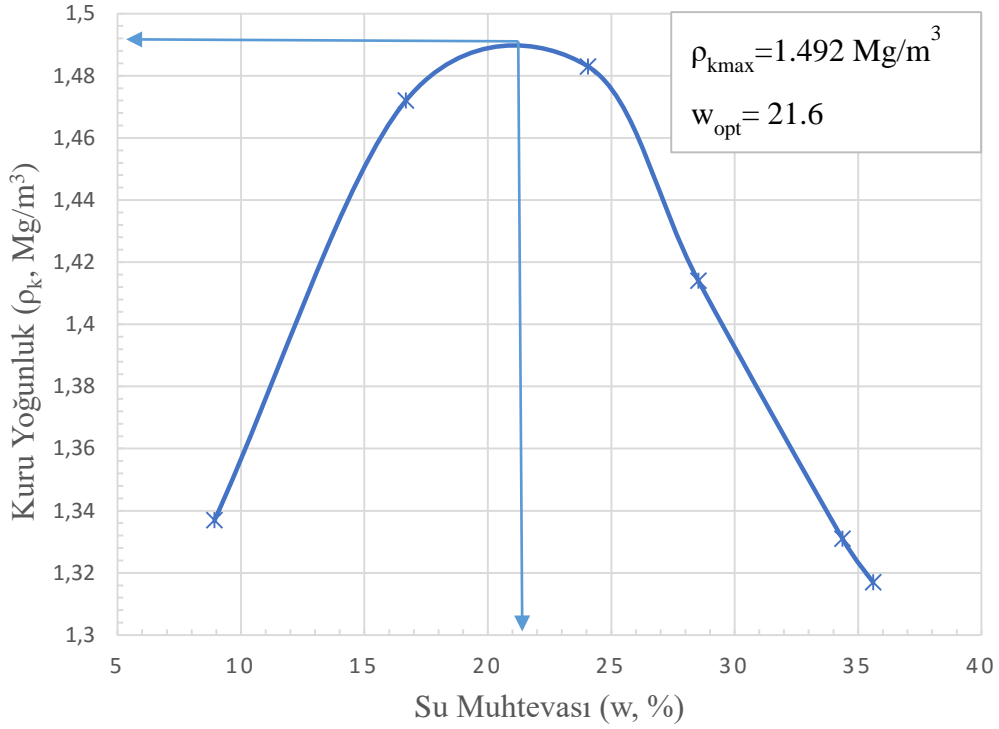


Ek Şekil 2.11. ZS10 karışımına ait kompaksiyon eğrisi

Ek 2'nin devamı

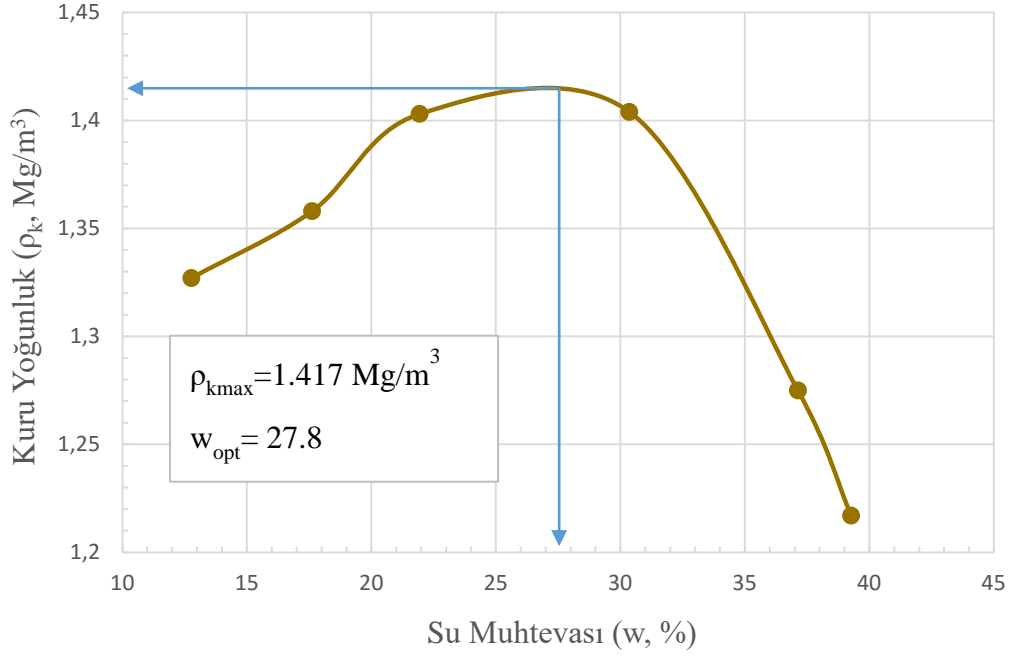


Ek Şekil 2.12. ZS15 karışımına ait kompaksiyon eğrisi

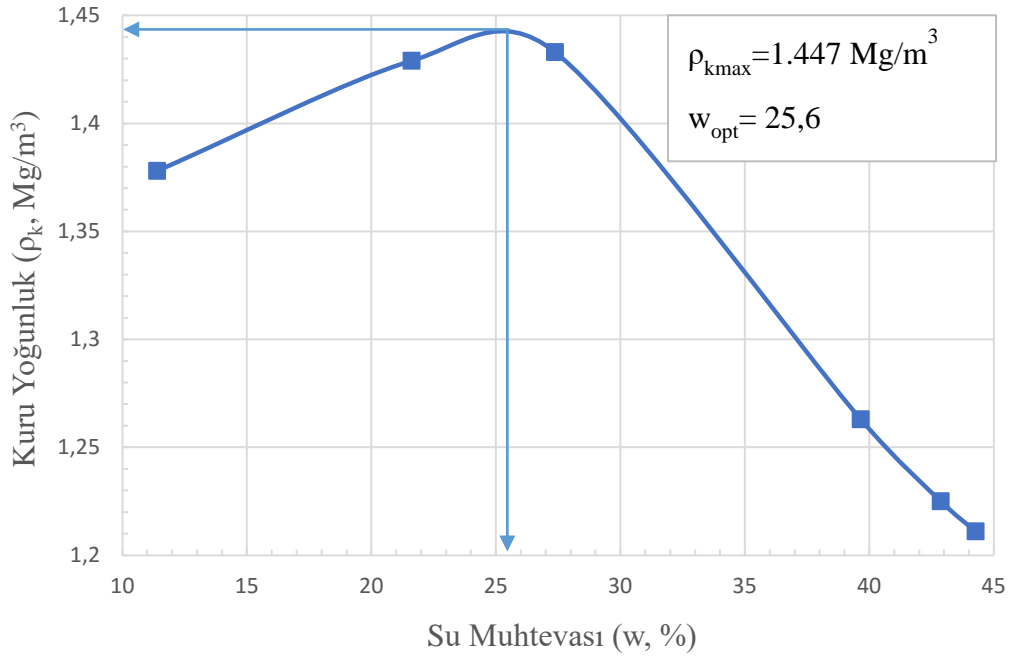


Ek Şekil 2.13. ZS20 karışımına ait kompaksiyon eğrisi

Ek 2'nin devamı

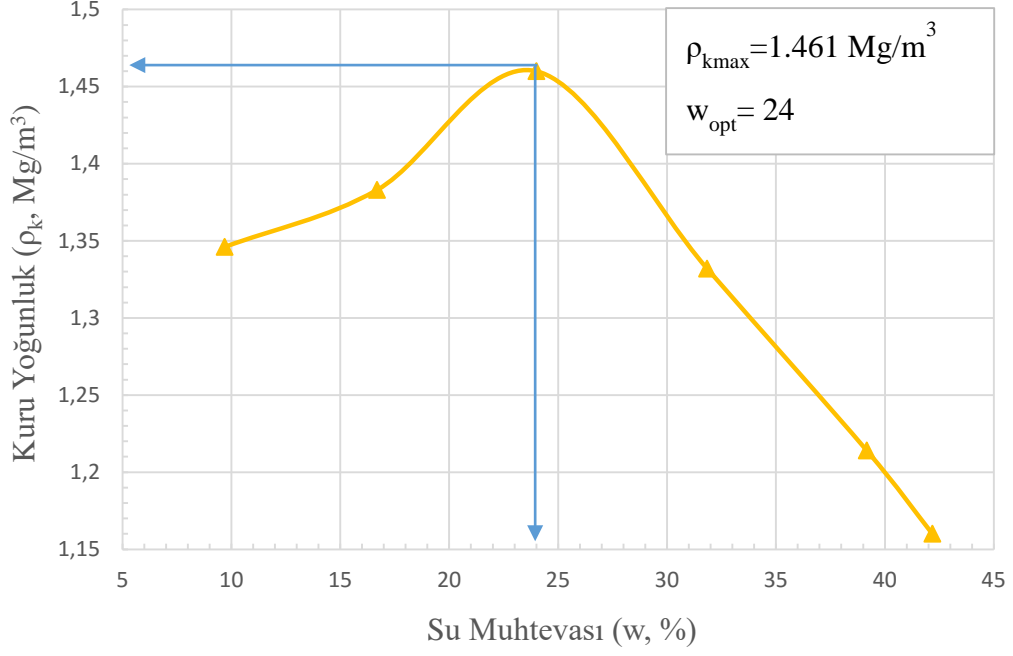


Ek Şekil 2.14. ZK karışımına ait kompaksiyon eğrisi

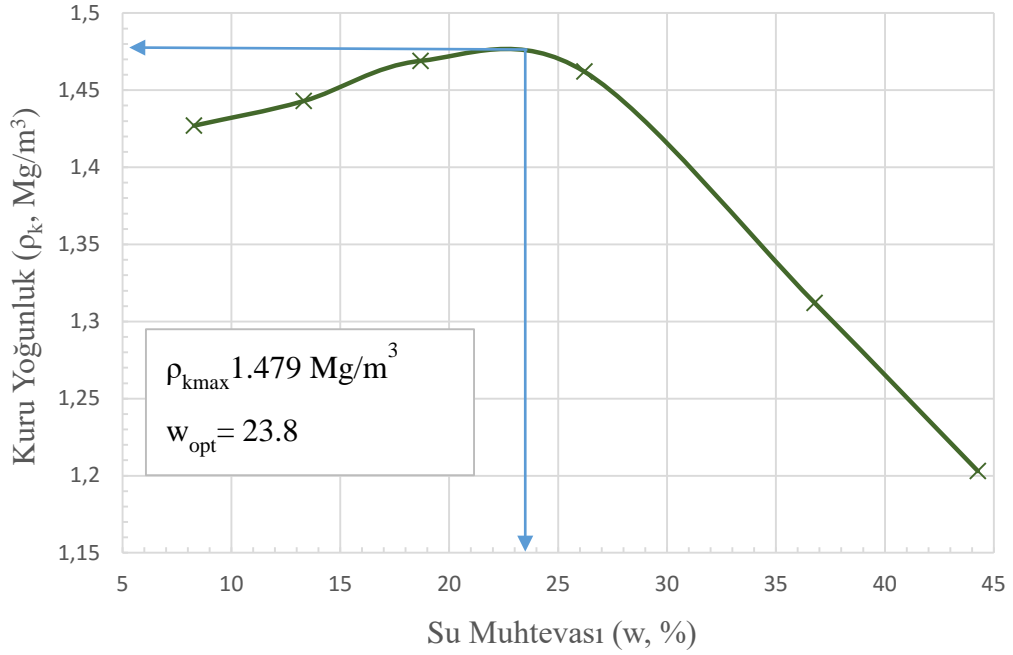


Ek Şekil 2.15. ZKB5 karışımına ait kompaksiyon eğrisi

Ek 2'nin devamı

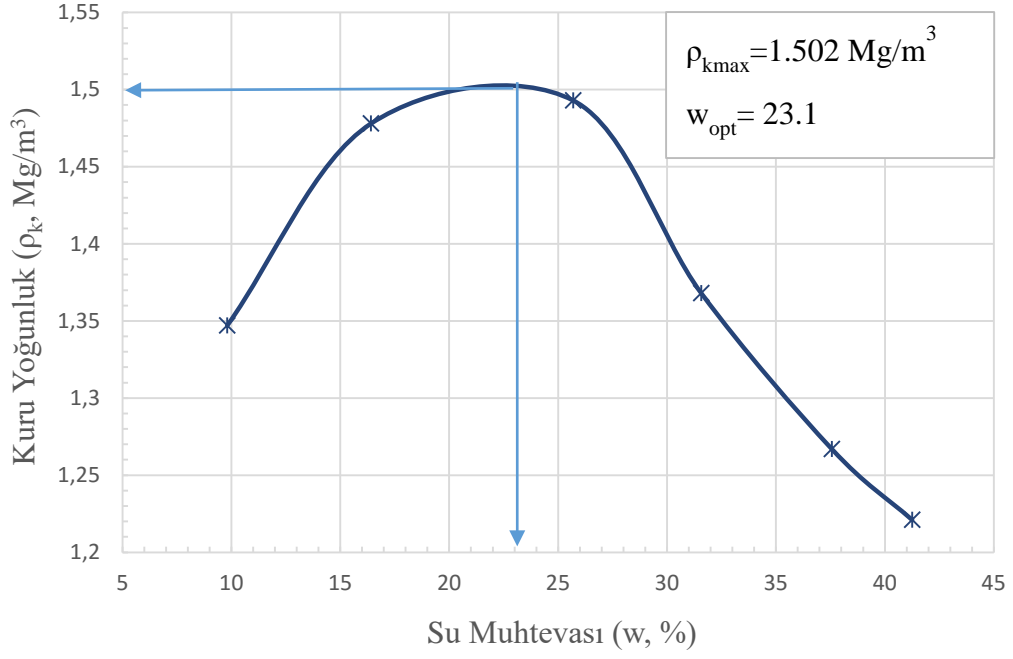


Ek Şekil 2.16. ZKB10 karışımına ait kompaksiyon eğrisi

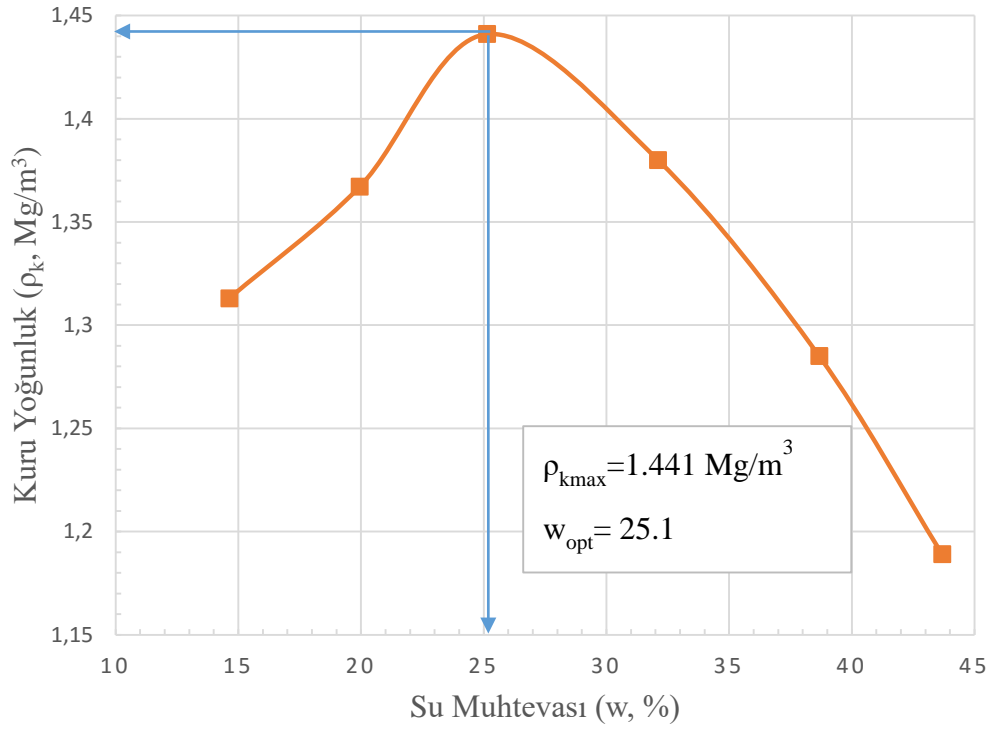


Ek Şekil 2.17. ZKB15 karışımına ait kompaksiyon eğrisi

Ek 2'nin devamı

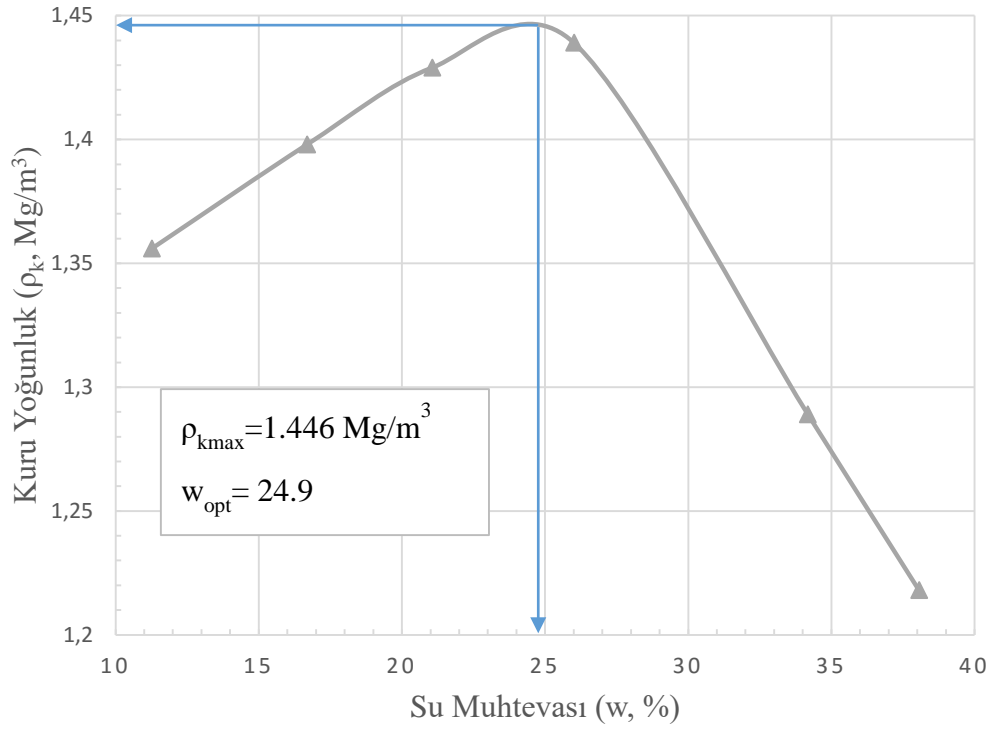


Ek Şekil 2.18. ZKB20 karışımına ait kompaksiyon eğrisi

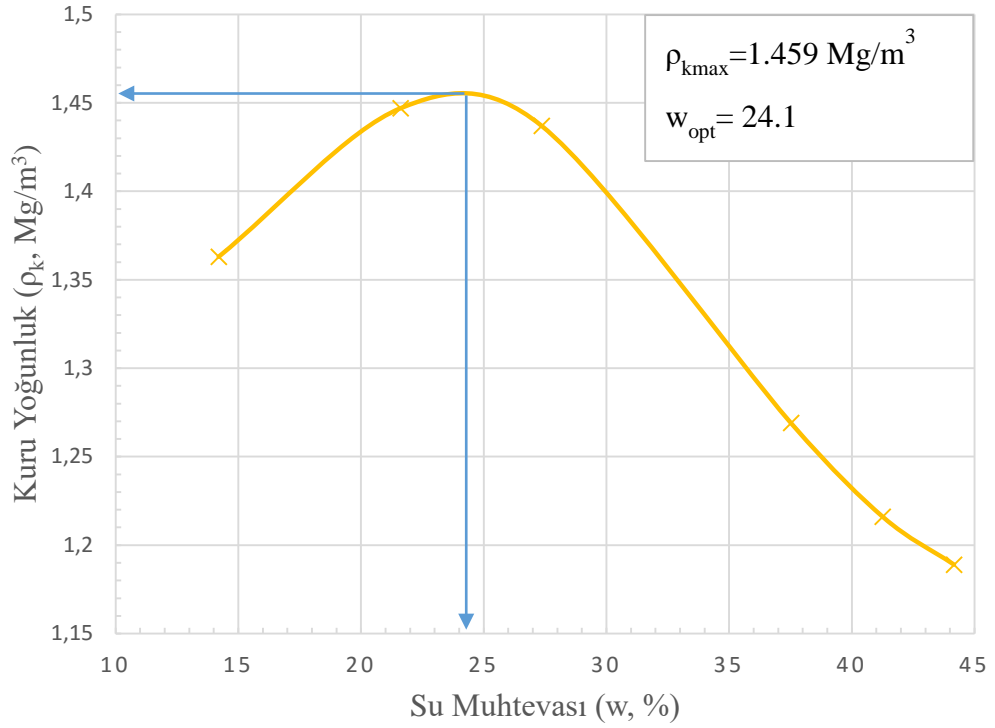


Ek Şekil 2.19. ZKY5 karışımına ait kompaksiyon eğrisi

Ek 2'nin devamı

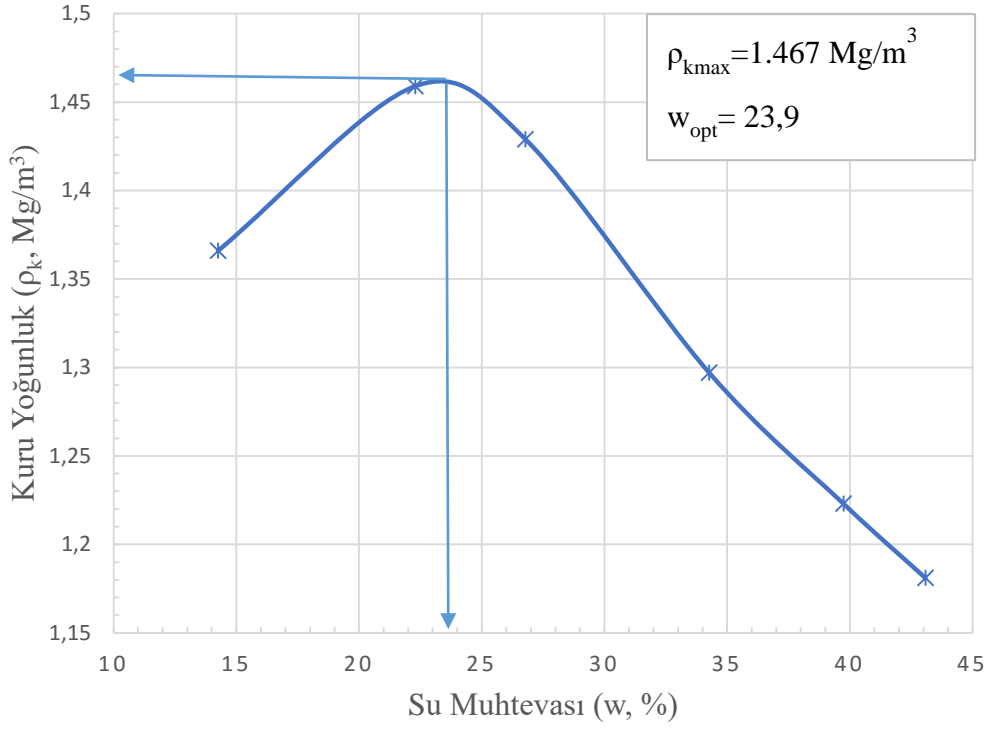


Ek Şekil 2.20. ZKY10 karışımına ait kompaksiyon eğrisi

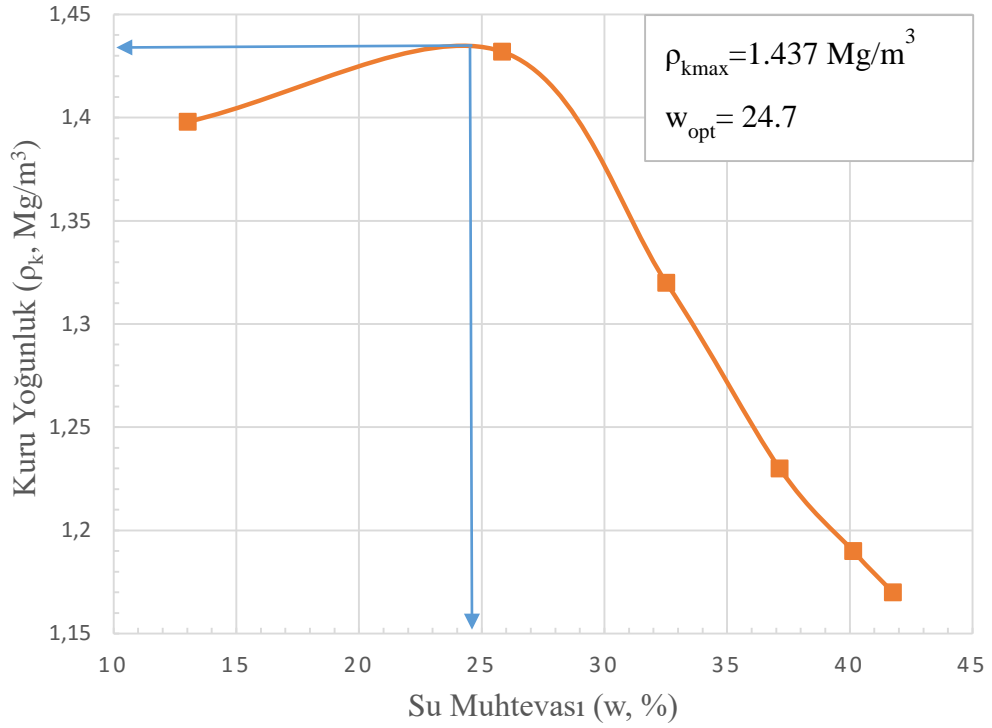


Ek Şekil 2.21. ZKY15 karışımına ait kompaksiyon eğrisi

Ek 2'nin devamı

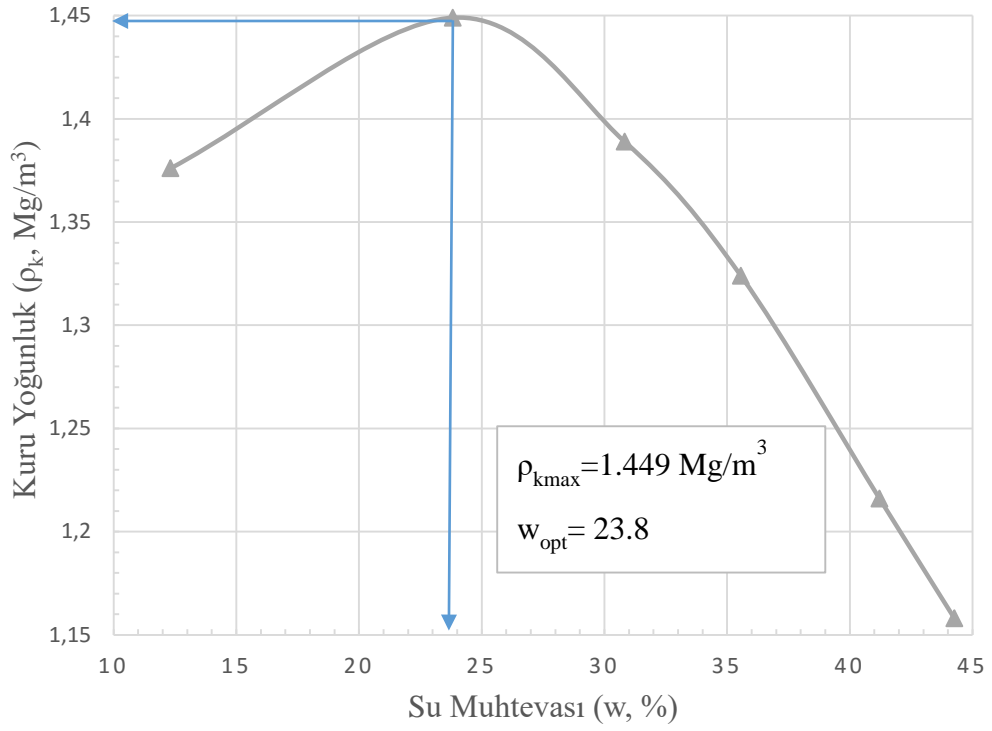


Ek Şekil 2.22. ZKY20 karışımına ait kompaksiyon eğrisi

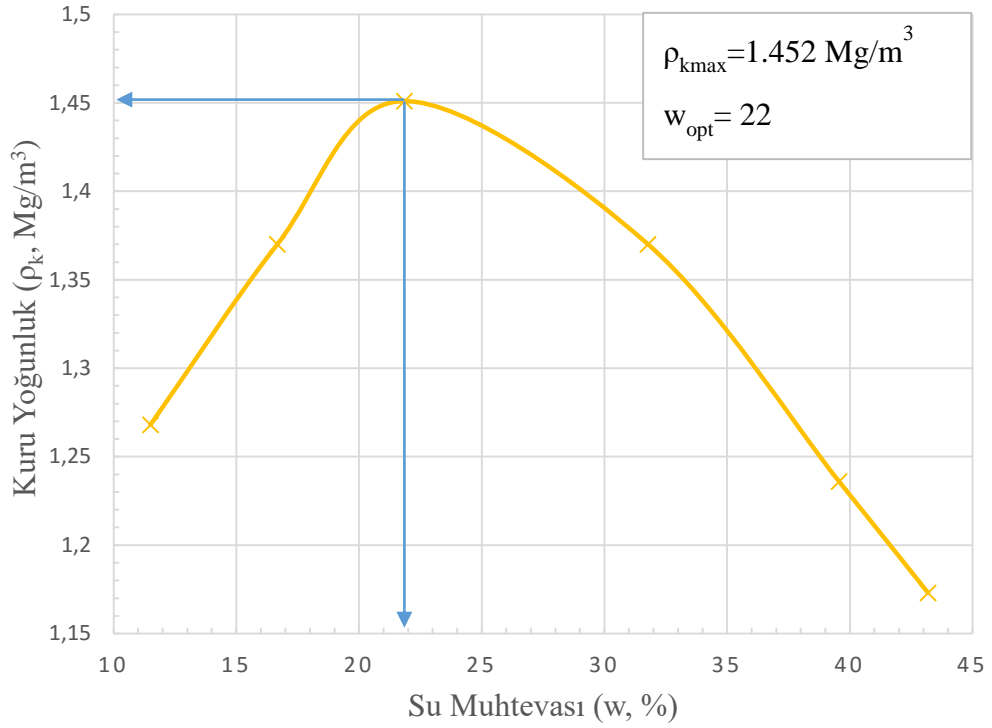


Ek Şekil 2.23. ZKS5 karışımına ait kompaksiyon eğrisi

Ek 2'nin devamı

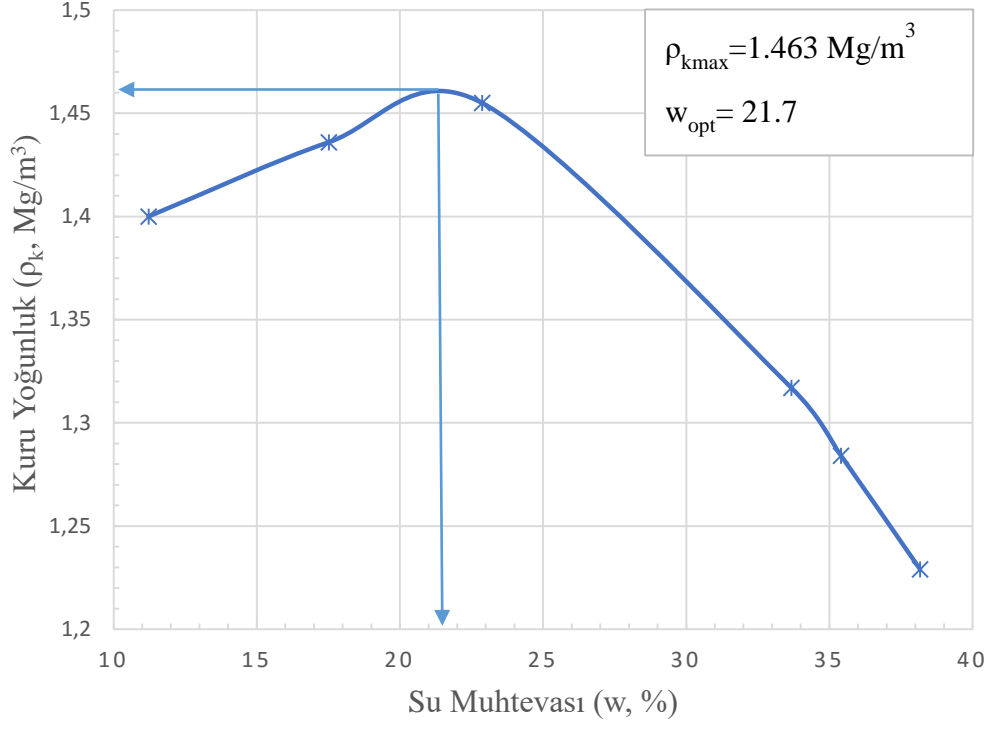


Ek Şekil 2.24. ZKS10 karışımına ait kompaksiyon eğrisi



Ek Şekil 2.25. ZKS15 karışımına ait kompaksiyon eğrisi

Ek 2'nin devamı



Ek Şekil 2.26. ZKS20 karışımına ait kompaksiyon eğrisi

ÖZGEÇMİŞ

Fatih YILMAZ, 1985 yılında Trabzon'da doğdu. İlköğrenimini Trabzon Fatih İlkokulu'nda, ortaokul ve lise öğrenimini ise Tefvık Serdar Anadolu Lisesi'nde tamamladı ve 2002 yılında mezun oldu.

2002 yılında Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nde başladığı lisans öğrenimini 2006 yılında tamamladı. Aynı yıl Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans eğitime başladı. Yüksek lisans eğitimi yaptığı sırada TOKİ Trabzon Akçaabat Yıldızlı 192 Konut, Ticaret Merkezi, İlköğretim Okulu ve Spor Salonu Projesi'nde saha mühendisi olarak görev yaptı. 2007-2008 akademik yılında Erasmus Programı çerçevesinde 1 yıl boyunca Ruhr Üniversitesi'nde eğitim gördü. Bir yıl daha çalışmalarını yurtdışında sürdürüp 2009 yılında aynı üniversiteden yüksek lisans derecesi aldı. 2010 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi'nde Türkiye'deki yüksek lisansını tamamlayan YILMAZ, 2011 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda doktora eğitime başladı. İyi derecede İngilizce bilmekte olup, halen Bayburt Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nde araştırma görevlisi olarak çalışmaktadır.