



**T.C.
İSKENDERUN TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**İSDEMİR ÇELİKHANE (BOF) CURUFUNUN ZEMİNLERİN DONMA
ÇÖZÜNME DAVRANIŞINA ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI**

Kemal Tahir ÖNGÜ

**İLERİ METALURJİ VE MALZEME TEKNOLOJİLERİ MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**HATAY
EYLÜL-2017**

T.C.
İSKENDERUN TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İSDEMİR ÇELİKHANE (BOF) CURUFUNUN ZEMİNLERİN DONMA
ÇÖZÜNME DAVRANIŞINA ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI

Kemal Tahir ÖNGÜ

İLERİ METALURJİ VE MALZEME TEKNOLOJİLERİ MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

HATAY
NİSAN-2017

T.C.
İSKENDERUN TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İLERİ METALURJİ VE MALZEME TEKNOLOJİLERİ MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİMDALI

Tezin Adı: İsdemir Çelikhane (BOF) Curufunun Zeminlerin Donma Çözünme Davranışına Etkisinin Araştırılması

Öğrencinin, Adı Soyadı: Kemal Tahir ÖNGÜ

Tez Savunma Tarihi: 15.09.2017

Fen Bilimleri Enstitüsü onayı

Kod No: 70

Doç. Dr. Mustafa DEMİRCİ

Enstitü Müdürü

Bu tezin Yüksek Lisans/Doktora tezi olarak gerekli şartları sağladığını onaylarım.

Doç. Dr. Mustafa DEMİRCİ

Enstitü ABD Başkanı

Bu tez tarafımda (tarafımızca) okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir Yüksek Lisans/Doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

(Unvanı, Adı ve SOYAD)

Yrd. Doç. Dr. Ömer Saltuk BÖLÜKBAŞI

İkinci Tez Danışmanı (varsa)

Tez Danışmanı

Bu tez tarafımızca okunmuş, kapsam ve niteliği açısından bir Yüksek Lisans/Doktora tezi olarak oy birliği/oy çokluğu ile kabul edilmiştir.

Yrd. Doç. Dr. Ömer Saltuk BÖLÜKBAŞI

.....

Prof. Dr. Cafer KAYADELEN

.....

Doç. Dr. Murat ÖRNEK

.....

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu. Tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını ve tez üzerinde Yükseköğretim Kurulu tarafından hiçbir değişiklik yapılamayacağı için tezin bilgisayar ekranında görüntülendiğinde asıl nüsha ile aynı olması sorumluluğunun tarafıma ait olduğunu beyan ederim.

Kemal Tahir ÖNGÜ

ÖZET

İSDEMİR ÇELİKHANE (BOF) CURUFUNUN ZEMİNLERİN DONMA ÇÖZÜNME DAVRANIŞINA ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI

Ülkemiz 52 milyon ton/yıl kurulu demir çelik üretim kapasitesine sahip olup, 2016 yılındaki 33.19 milyon tonluk üretimiyle dünya üretiminde yaklaşık %2.04 oranda paya sahip olmuştur. Türkiye, dünyada çelik üretimi yapan 64 ülke içerisinde 8. sırada yer alırken, Avrupa'da çelik üreten ülkeler arasında, 2. sırada yer almaktadır. Ülkemizde çelik üretimi sırasında demir çelik tesislerinden yan ürün olarak, yaklaşık her yıl 1.7 milyon ton Çelikhane (BOF) curufu oluşmaktadır. Stoklanan curuflar yeterli kullanım alanı bulamadığından büyük bir bölümü fabrika sahası içerisinde yıllardır stoklarda bekletilmekte ve fabrikalar için önemli yer ve çevre sorunu yaratmaktadır. Son yıllarda yeni açılan ve kapasitesi artırılan tesisler ile üretim miktarlarındaki artış ve stoklama alanlarının kısıtlı olması ve çözülme bekleyen stok curufu tepeleri oluşmaktadır. Üretim sırasında yan ürün olarak çıkan curufların, diğer alanlarda tekrar kazanılması ve tekrarda kullanımı konusu senelerdir gündemde yer almıştır.

Yıllık sıcaklık farkının fazla olduğu, soğuk iklimin egemen olduğu bölgelerde doğal olarak oluşan ve donma-çözünmenin görüldüğü iklim şartlarında yer alan bölgelerde özellikle; karayolu, demiryolu, sulama kanalı gibi mühendislik yapıları üzerinde taşıdıkları yüklerden dolayı, donma ve çözünmenin etkisi altında kalmakta ve deformasyona uğramaktadır. Bu tez çalışmasında; İskenderun Demir-Çelik Fabrikaları A.Ş. (İSDEMİR A.Ş) fabrikasından alınan çelikhane (BOF) curufu, killi zemin numunelerine %3, %6, %9, %12, %15 ve %20 oranlarında ilave edilerek testler yapılmıştır. Donma ve çözünmenin zemin numuneler üzerine etkilerini araştırmak için; Zeminlerin Donma ve Çözünme deneyi (ASTM D-5918), Donma ve Çözünmeye Karşı Direncin Tayini (TS EN 1367-1) ve Magnezyum Sülfat (TS EN 1367-2) deney çalışmaları uygulanmıştır.

Bu 3 (üç) kategorideki testlerden elde edilen deney sonuçlarından grafik ve tablolar elde edilmiş olup, kapsamlı bir şekilde yorumlanmıştır. İSDEMİR Çelikhane (BOF) Curufunun killi zeminlerin iyileştirilmesi üzerine özellikle % 9 ve üzeri karışımlarda bariz bir şekilde olumlu etkisinin olacağı görülmüştür.

2017, 155 sayfa

Anahtar Kelimeler: Bazik Oksijen Fırın (BOF) Curufu, Donma Çözünme, Killi Zemin.

ABSTRACT

İSDEMİR STEEL MILL (BOF) SLAG INVESTING OF EFFECTS OF ARGILLACEOUS SOIL FREEZE-THAW BEHAVIOR

Our country has an installed capacity of 52 million tons/year of iron and steel production, and with a production of 33.19 million tons in 2016, it has a share of approximately 2,04% in world production. Turkey ranks 8th among the 64 countries that produce steel in the world, while it ranks 2nd among the countries producing steel in Europe. As a by-product of iron and steel mills during our steel production in our country, approximately 1.7 million tons per year of steel mill (BOF) slag is formed. Because the stock slags cannot find sufficient usage area, most of them are kept in stocks for years in the factory area and cause important environmental and environmental problems for the factories. With the newly opened facilities with increased capacities in recent years, the increase in production quantities and stocking areas are limited and stock slump peaks are waiting to be solved. It has been on the agenda for years to recycle slags emerging as by-products during production and to use them again in other areas.

The seasonal freeze-thaw appears in cold climate zone, the shallow foundation soils belonging to civil engineering constructions such as highways, railways and irrigation channels are subject to freezing-thawing under these loads. In this thesis study, Iskenderun Iron and Steel Works Co. (İSDEMİR A.Ş.) steel works co. slags are %3, %6, %9, %12, %15 and %20 percent rate to Planned mixing with argillaceous soil sample in Hatay in İskenderun. For investigating the effects of freezing-thawing of the argillaceous soil samples; ASTM D 5918, Freezing of aggregates-Solving the test, Determination of resistance to freezing and thawing TS EN 1367-1 and magnesium sulfate test TS EN 1367-2.

Graphs and tables have been taken from the test results obtained from these three (three) categories and they have been interpreted extensively. İSDEMİR Steelworks (BOF) was seen that the improvement of the clayey soils, in particular, will have a positive effect especially on the mixture of 9% and above of it.

2017, 155 pages

Key words: Basic Oxide Furnace Slag, Freezing-Thawing, Steel Mill Slags, Argillaceous Soil Sample.

TEŞEKKÜR

Yüksek Lisans Tez çalışması süresince bana her türlü imkân sağlayan, makale ve yayınlarda yol gösteren gece ve gündüz zaman ayıran yardımlarını hiçbir zaman esirgemeyen danışman hocam Yrd. Doç. Dr. Sayın Ömer Saltuk BÖLÜKBAŞI'na sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca çalışmanın tüm aşamalarında, bilgi ve tecrübelerini benden esirgemeyen, çalışmanın sistematik bir yapıyla yürütölüp tamamlanmasına katkı sağlayan tez jüri üyesi Doç. Dr. Sayın Murat ÖRNEK'e ve Prof. Dr. Sayın Cafer KAYADELEN'e çok teşekkür ederim.

Bitirme tezim boyunca malzeme tedariginde bulunan İskenderun Demir ve Çelik A.Ő. (İSDEMİR A.Ő)'ye kurumsal olarak teşekkür ederim.

Bununla birlikte çalışmanın başından itibaren yardımlarını esirgemeyen ArŐ. Gör. Sayın Yakup TÜREDİ ve İnşaat teknisyeni Sayın Selahattin KEVKİR'e yardımlarından dolayı teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca bütün Eğitim ve Öğretim hayatım boyunca beni destekleyen Annem AyŐe ÖNGÜ'ye ve aileme benim başarıma olan inançlarından dolayı teşekkür ederim.

Kemal Tahir ÖNGÜ

Maden Mühendisi

Eylöl 2017

İÇİNDEKİLER

ÖZET	I
ABSTRACT	II
TEŞEKKÜR	III
İÇİNDEKİLER	IV
ÇİZELGELER	V
ŞEKİLLER	VII
1. GİRİŞ	1
1.1. Amaç.....	5
1.2. Kapsam.....	5
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR	9
3. MATERYAL VE METOT	16
3.1. Materyal.....	16
3.1.1. Çelikhane Curufu (BOF Curufu).....	19
3.1.2. İskenderun Kil Numunesi.....	24
3.2. Yöntem.....	29
3.2.1. Zeminlerde Donma Olayı.....	30
3.2.2. Zeminlerin Donma Hassaslığının Belirlenmesi.....	31
3.2.3. İklimlendirme Cihazı.....	35
3.2.4. Etüv Cihazı.....	37
3.2.5. Numune Kapları.....	37
3.2.6. Numune Alma (TS 707) ve Elek Analizi (TS EN 933-1).....	38
3.2.7. Donmaya ve Çözünmeye Karşı Direncin Tayini (TS EN 1367-1).....	46
3.2.8. Magnezyum Sülfat Deneyi (TS EN 1367-2).....	51
3.2.9. Zemin Numunelerinin Donma Kabarma Miktarları ASTM D 5918 (2006) 55	55
4. ARAŞTIRMA BULGULAR VE TARTIŞMA	69
4.1. Elek Analizi.....	69
4.2. Donmaya ve Çözünmeye Karşı Direncin Tayini (TS EN 1367-1).....	75
4.3. Magnezyum Sülfat Deneyi (TS EN 1367-2).....	81
4.4. Zemin Numunelerinin Donma Kabarma Miktarları ASTM D 5918 (2006) ...	89
4.4.1. Kompaksiyon (Proktor) Deneyi.....	91
4.4.2. CBR Deneyi.....	96
5. NUMUNELERİN MİNERALojİK ARAŞTIRMASI	111
5.1. Makro Yapı Araştırması:.....	111
5.2. Mikro Yapı Araştırması:.....	114
5.3. X-Işını Difraksiyon Analizi (XRD):.....	116
6. SONUÇ VE ÖNERİLER	120
KAYNAKLAR	123
EKLER	125
ÖZGEÇMİŞ	142

ÇİZELGELER

Çizelge 3.1. Çelikhane curufu tipik kimyasal analizi	21
Çizelge 3.2. Curufun içerdiği fazlar (Shi, 2004).....	22
Çizelge 3.3. Kil minerallerinin özellikleri (Angın 2005).....	27
Çizelge 3.4. Zeminlerin donmaya karşı hassaslık kriteri (Freitag ve McFadden, 1997).33	
Çizelge 3.5. Laboratuvar deneylerine göre donmaya karşı hassaslık sınıflandırılması (Freitag ve McFadden, 1997).....	34
Çizelge 3.6. Agrega tane sınıfların belirtilmesinde kullanılan elek göz açıklıkları (TS 706)	42
Çizelge 3.7. Tane büyüklüğü dağılım formu örneği.	43
Çizelge 3.8. BOF curufu elek analizi ve dane sınıflandırmasına göre kimyasal kompozisyonu.	46
Çizelge 3.9. Hatay-İskenderun ilçesinde bulunan kil numunesinin elek analizi çizelgesi.	47
Çizelge 3.10. Donma-çözünme döngüsü deneyi için gereken deney numunesi kısımlarının miktarı.....	48
Çizelge 3.11. Donma-çözünme işlem adımları.....	49
Çizelge 3.12. En yüksek donma-çözünme direnç değerlerine göre kategoriler.....	49
Çizelge 3.13. İklim şartlarına ve çevre şartlarına göre örnek agrega talebi.....	50
Çizelge 3.14. Magnezyum sülfat kullanılarak elde edilen en yüksek don dayanıklılığı değerlerine göre kategoriler.....	54
Çizelge 3.15. İklim şartlarına ve çevre şartlarına göre örnek agrega talebi.....	54
Çizelge 4.1. Tane büyüklüğü fraksiyonu tablosu.....	71
Çizelge 4.2. Tane büyüklüğü fraksiyonu tablosu.....	73
Çizelge 4.3. Donma-çözünme işlem adımları.....	76
Çizelge 4.4. En yüksek donma ve çözünme direnç değerlerine göre kategoriler.....	78
Çizelge 4.5. Numunelerin M_1 ve M_2 değerleri dağılımı.....	79
Çizelge 4.6. İklim ve çevre şartlarına göre numune talebi kategorileri.....	81
Çizelge 4.7. MgSO ₄ Deney sonuçları.....	86
Çizelge 4.8. Magnezyum sülfat kullanılarak elde edilen M_s (%) Kategorileri.....	87
Çizelge 4.9. Çevre ve iklim şartlarına göre numune talebi kategorileri.....	88
Çizelge 4.10. Kompaksiyon deneyi değerleri (%100 Killi zemin numunesi %0 BOF curufu).....	93
Çizelge 4.11. Yük-Penetrasyon tablosu örneği.....	99
Çizelge 4.12. Standart Yük-Penetrasyon değeri.....	99
Çizelge 4.13. Donma-çözünme öncesi ve sonrası CBR değerleri.....	101
Çizelge 4.14. Δ CBR Değerinin mutlak değer tablosu.....	106
Çizelge 4.15. Numunelerin donmaya karşı hassaslığı (Freitag ve McFadden, 1997)...108	

Çizelge Ek 1. %100 Killi zemin numunesi CBR değerleri.....	125
Çizelge Ek 2. %97 Killi zemin numunesi+%3 BOF curufu	126
Çizelge Ek 3. %94 Killi zemin numunesi+%6 BOF curufu	127
Çizelge Ek 4. %91 Killi Zemin numunesi+%9 BOF curufu.....	128
Çizelge Ek 5. %88 Killi zemin numunesi+%12 BOF curufu	129
Çizelge Ek 6. %85 Killi zemin numunesi+%15 BOF curufu	130
Çizelge Ek 7. %80 Killi zemin numunesi+%20 BOF curufu	131
Çizelge Ek 8. %100 BOF curufu CBR değeri.....	132
Çizelge Ek 9. %100 Killi zemin numunesi CBR değerleri.....	133
Çizelge Ek 10. %97 Killi zemin numunesi+%3 BOF curufu	134
Çizelge Ek 11. %94 Killi zemin numunesi+%6 BOF curufu	135
Çizelge Ek 12. %91 Killi zemin numunesi+%9 BOF curufu	136
Çizelge Ek 13. %88 Killi zemin numunesi+%12 BOF curufu	137
Çizelge Ek 14. %85 Killi zemin numunesi+%15 BOF curufu	138
Çizelge Ek 15. %80 Killi zemin numunesi+%20 BOF curufu	139
Çizelge Ek 16. %100 BOF curufu Donma-çözünme sonrası CBR değerleri	139
Çizelge Ek 17. Donma-çözünme öncesi ve sonrası CBR% oranları değeri tablosu.....	141

ŞEKİLLER

Şekil 1.1. Curuf manipülasyonu işlem adımları.....	2
Şekil 1.2. Curuf ayrıştırma tesisi.....	2
Şekil 3.1. Tipik bir entegre demir çelik fabrikası üretim akım şeması	16
Şekil 3.2. Çelikhane sıvı ham demir şarjı ve curuf tumba tesisi	17
Şekil 3.3. BOF curuf üretim yeri (Google Earth, 15.06.2017).....	17
Şekil 3.4. BOF curuf stok sahasının görünümü (Google Earth, 15.06.2017)	18
Şekil 3.5. BOF curuf saha numune araştırması.....	18
Şekil 3.6. İsdemir A.Ş Çelikhane curuf numune yağınları	19
Şekil 3.7. Pota içindeki çelikhane curufu [16].	20
Şekil 3.8. BOF Curufu ve içindeki demir parçaları (skal)	21
Şekil 3.9. Çelikhane curufu numune alma.	23
Şekil 3.10. Curuf eleme akım şeması [18].	23
Şekil 3.11. Deneyde kullanılan kil numunesi	24
Şekil 3.12. Hatay/İskenderun bölgesi kil numunesi.....	25
Şekil 3.13. Tetrahedron tabakası a) tetrahedron yapıtaşı b) silika tabakası c) silika tabakasının temsili gösterimi [26].	26
Şekil 3.14. Oktahedron tabakası a) oktahedron yapıtaşı b) alümina tabakası c) alümina tabakasının temsili gösterimi [26].	26
Şekil 3.15. Şişen zeminlerin oluşturduğu ve donma-çözünmenin verdiği zararlar.....	28
Şekil 3.16. Beton malzemenin zamanla donma-çözünmeye sonucu tahribatı	28
Şekil 3.17. Donma-çözünme işlem adımları	30
Şekil 3.18. Donma kabarmasının şematik olarak gösterimi (Mitchell, 1976).	31
Şekil 3.19. Dane dağılımına göre donma hassaslığının belirlenmesi (Beskow, 1935). ..	33
Şekil 3.20. Donma kabarma hızlarına göre hassaslık sınıflandırılması (Kaplara, 1974). ..	35
Şekil 3.21. İD 300 Klimatik test kabini [11].	36
Şekil 3.22. Etüv cihazı (İSTE Geoteknik laboratuvarı)	37
Şekil 3.23. Numune kapları.....	38
Şekil 3.24. Kareleme dörtleme yöntemi ile numune azaltma	39
Şekil 3.25. İSTE Geoteknik laboratuvarı elek serisi	40
Şekil 3.26. Islak elek analizi yöntemi	41
Şekil 3.27. Yaş kil numunesinin etüv sonrası ve öğütülerek (0.075 mm) kuru elek altı malzemesi (İSTE Geoteknik Lab.).....	41
Şekil 3.30. Kareleme dörtleme ve numune azaltma.....	45
Şekil 3.29. Numunelerin hazırlanması ve sınıflandırılması resmedilmiştir	47
Şekil 3.30. Dane çapı dağılım grafiği (Aritmetik ölçek).....	51
Şekil 3.31. Dane çapı dağılım grafiği (logaritmik ölçek).....	52
Şekil 3.32. Kil malzemesinin etüv sonrası görünümü ve Filtre kâğıdında sınıflandırılmış karışımı.....	53
Şekil 3.33. Donma-çözünme devrine maruz kalmış,100x100x100 mm boyutlarında küp beton numuneleri.....	55

Şekil 3.34. Don etkisi nedeniyle zarar görmüş olan bir yol kaplaması ve otoyol bariyeri	56
Şekil 3.35. Donma çözünme deney şematığı (ASTM D 5918)[20].	58
Şekil 3.36. Numunelerin suya doymun hale getirilmesi (İSTE)	59
Şekil 3.37. Kapalı sistem donma-çözünme deneyi (İSTE)	61
Şekil 3.38. CBR deney aleti (İSTE Geoteknik laboratuvarı).	62
Şekil 3.39. Kompaksiyon etkisi (Zemin+Kompakte edilmiş zemin).....	63
Şekil 3.40. Standart proktor uygulaması.	64
Şekil 3.41. Kompaksiyon deney alet ve ekipmanları (İSTE Geoteknik laboratuvarı)....	65
Şekil 3.42. Kompaksiyon deneyi sıkıştırma metodu.....	66
Şekil 3.43. Kuru birim hacim yoğunluk grafiği[21].	67
Şekil 4.1. İSDEMİR A.Ş Curuf stok sahası ve örnek alınmış BOF curufu paketleri	69
Şekil 4.2. Kareleme dörtleme işlem adımları (İSTE).	70
Şekil 4.3. Tane çapı dağılımı grafiği (Aritmetik ölçek).....	71
Şekil 4.4. Tane çapı dağılım grafiği (Logaritmik ölçek).....	72
Şekil 4.5. Normal dağılım eğrisi (Noktasal)	74
Şekil 4.6. Kil numunesi normal dağılım eğrisi (Histogram).....	74
Şekil 4.7. Deneyde kullanılan cihazlar, numuneler ve ekipmanlar	76
Şekil 4.8. Numune kapları ve isimlendirilmesi.	77
Şekil 4.9. Donma-çözünme öncesi numunelerin yerleştirilmesi.....	77
Şekil 4.10. Donma-çözünme sonrası eleme işlemi	78
Şekil 4.11. Donma ve çözünme F değerleri sonucu.	80
Şekil 4.12. Magnezyum sülfat deneyi için kullanılan bazı materyaller.	82
Şekil 4.13. Filtre kâğıdı içerisine konulmuş killi zemin+BOF curufu karışım numuneleri.	83
Şekil 4.14. MgSO ₄ ve BrCl ₂ çözültisinin hazırlanması.	84
Şekil 4.15. MgSO ₄ Deneyi işlem adımları.	85
Şekil 4.16. Karışımın (BOF+kil) Ms (%) yüzde kayıp oranları.....	87
Şekil 4.17. ASTM D5918 işlem adımları.....	89
Şekil 4.18. Kompaksiyon (standart Proktor) deneyi işlem adımları	95
Şekil 4.19. Kil numunesi kuru birim hacim ağırlığı su muhtevası grafiği.	96
Şekil 4.20. Yük penetrasyon grafiği örneği.	100
Şekil 4.21. Donma-çözünme öncesi CBR ₁ değeri (yük-penetrasyon)	103
Şekil 4.22. Donma-çözünme öncesi CBR ₁ değeri (yük-BOF curufu (%))	104
Şekil 4.23. Donma-çözünme sonrası CBR ₂ değeri (yük-penetrasyon).....	105
Şekil 4.24. Donma-çözünme sonrası CBR ₂ değeri (yük-BOF curufu (%)).....	106
Şekil 4.25. ASTM D 5918 CBR deneyinde kabarma yüzde (%) miktarı arasındaki ilişki	107
Şekil 4.26. Kabarma miktarı arasındaki ilişki (Doğrusal Grafik)	107
Şekil 4.27. Numunelerin donma hassaslığı (Freitag ve McFadden, 1997).	109
Şekil 5.1. Numunelerin Au-Pd tabakası ile kaplanması.....	111
Şekil 5.2. JEOL JSM-5600LV marka SEM cihazı analiz çalışması	112
Şekil 5.3. Katkısız BOF curufu ve Kil numunelerin mikro yapıları (250X).....	112
Şekil 5.4. BOF curufu ve Kil katkılı numunelerin tane yapıları (250X).....	113

Şekil 5.5. Katkısız BOF curufu ve Kil numunelerin mikro yapıları, 2500X	114
Şekil 5.6. BOF curufu ve Kil katkılı numunelerin tane yapıları (2500X).....	115
Şekil 5.7. XRD Analiz çalışması.....	116
Şekil 5.8. Katkısız BOF Curuf numunesinin X-Işını Difraktogramı (çevrim sonrası). 117	
Şekil 5.9. Katkısız Kil numunesinin X-Işını Difraktogramı (çevrim sonrası).	117
Şekil 5.10. BOF Curufu katkılı Kil numunelerinin X-Işını Difraktogramı.....	118
Şekil Ek 1. %100 killi zemin numunesi.....	125
Şekil Ek 2. %97 Killi zemin numunesi+%3 BOF curufu	126
Şekil Ek 3. %94 Killi zemin numunesi+%6 BOF curufu	127
Şekil Ek 4. %91 Killi Zemin numunesi+%9 BOF curufu.....	128
Şekil Ek 5. %88Killi zemin numunesi+%12 BOF curufu	129
Şekil Ek 6. %85 Killi zemin numunesi+%15 BOF curufu	130
Şekil Ek 7. %80 Killi zemin numunesi+%20 BOF curufu	131
Şekil Ek 8. %100 BOF curufu CBR değeri.....	132
Şekil Ek 9. %100 Killi zemin numunesi CBR değerleri.....	133
Şekil Ek 10. %97 Killi zemin numunesi+%3 BOF curufu	134
Şekil Ek 11. %94 Killi zemin numunesi+%6 BOF curufu	135
Şekil Ek 12. %91 Killi zemin numunesi+%9 BOF curufu	136
Şekil Ek 13. %88 Killi zemin numunesi+%12 BOF curufu	137
Şekil Ek 14. %85 Killi zemin numunesi+%15 BOF curufu	138
Şekil Ek 15. %80 Killi zemin numunesi+%20 BOF curufu	139
Şekil Ek 16. %100 BOF curufu donma-çözünme sonrası CBR değerleri	140
Şekil Ek 17. Donma-çözünme öncesi ve sonrası CBR % değerleri.....	141

1. GİRİŞ

Çelikhane curufu, sıvı ham çelik üretimi sırasında pota içerisinde bulunan çelik ergiğindeki empüritelere oksidasyonu sonucu ortaya çıkan oksit ve silikatların oluşturduğu oksitli kompleks bir kimyasal yapıya sahip parametalik özellik gösteren, yoğunluğu içerisindeki çelik ergiğinin yoğunluğundan daha düşük koyu gri renkte, tane şekli köşeli ve yüzeyi pürüzlü bir görünüme sahip yan üründür. Yüksek fırın curufuna kıyasla çok sert ve dayanıklıdır. Ortalama özgül ağırlığı $3.0-3.2 \text{ gr/cm}^3$ aralığında olduğundan pota çelik ergiğinin üzerinde yer almaktadır.

Bazık Oksijen Fırınlarında (BOF, Konvertör) yapılan çelik üretiminde açığa çıkan curuflar BOF curufları, Elektrikli Ark Fırında da (EAF) yapılan üretimde açığa çıkan curuflar ise EAF curufları olarak adlandırılmaktadır.

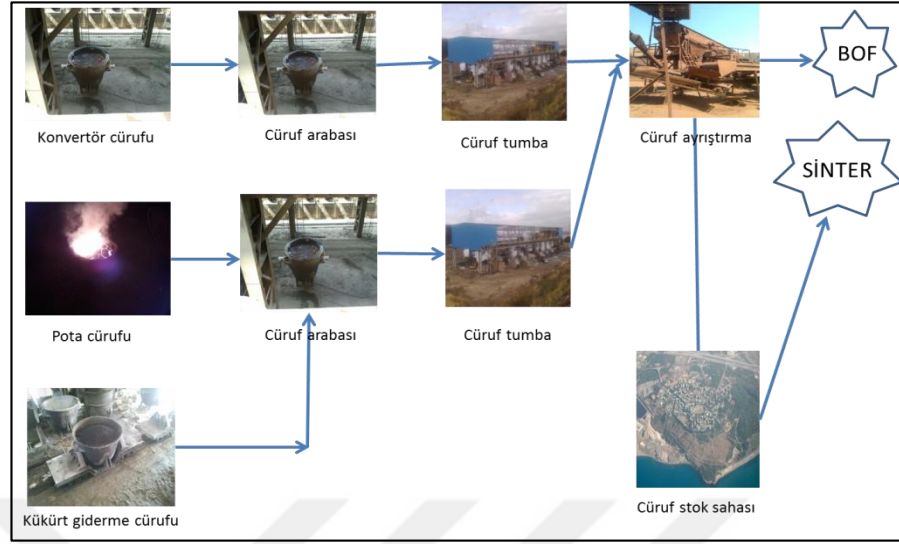
İSDEMİR'de çelik üretimi Bazık Oksijen fırınlarında yapılmaktadır. Bu nedenle çelikhane curuflarından BOF curufları kastedilmektedir.

Bazık oksijen çelik üretim sürecinde sıcak maden, hurda ve curuf yapıcılar (kireç, dolomitik kireç) konvertör şarj edilir. Çelik ergitme işlemlerini takiben konvertör içerisine daldırılan bir lans vasıtasıyla yüksek basınçta üflenen oksijen şarjdaki empüritelerle birleşir. Çelik ürün prosesinde istenilmeyen empüriteler karbon (CO gazı olarak), Si, Mn, P ve bir miktar Fe'dir (Sıvı oksitler halinde). Kimyasal tepkimeler sonucunda bu oksitlerden sıvı formda olanlar kireç ve dolomitik kireç ile birleşerek pota üzerindeki bazık curufu oluştururlar.

Konvertör içine oksijen üflenmesi sonucu çelik kompozisyonunda istenmeyen elementlerin oksitlenerek giderilmesi sağlanır. Meydana gelen oksitler flux malzemelerle birleşerek, ergimiş haldeki curufu oluştururlar ve yoğunluk farkından dolayı konvertör içindeki sıvı çeliğin üstünde yer alırlar. Curuf ergitme potalarından tumba tesisinde curuf döküm sahsına dökülür, sıvı haldeki curuf üzerine kontrollü olarak soğutma suyu verilerek katılaştır ve kristalleşir. Gri renkte ve az gözenekli bir malzeme haline dönüşür. BOF genellikle koyu gri renkte (şekil 3.8) tane şekli köşeli ve yüzeyi pürüzlü bir görünüme sahiptir.

BOF curufları genel olarak FeO, CaO, MgO ve SiO₂ içerirler. Düşük fosforlu çelik üretim proseslerinde bu oksitlerin sıvı curuf içindeki yoğunluğu miktarları %90 civarındadır. Bundan dolayı BOF curufları içerisinde FeO-MgO-CaO-SiO₂ dörtlü sistem olarak değerlendirilir. Curufun üzerinde her zaman ince dikalsiyum silikatla kaplı çözünmemiş kireç parçaları vardır.

Şekil 1.1 ve şekil 1.2’de üretim aşamaları kısaca açıklanmıştır.



Şekil 1.1. Curuf manipülasyonu işlem adımları

Şekil 1.1’de konverter curufu, pota curufu ve kükürt giderme curufu, curuf arabaları yardımıyla curuf tumba tesisine gönderilir. Curuf potaları, Curuf Tumba Tesisinde boşaltıldıktan sonra havuzdan skal hurdaları ayrılır ve skal kırma tesislerine gönderilir. Geri kalan curuf daha sonra elenmek üzere curuf stok sahalarında stoklanır.



Şekil 1.2. Curuf ayrıştırma tesisi

Şekil 1.2’de stoklanan curuf, curuf stok sahasından kamyonlarla eleme tesisine taşınır. Eleme tesisinde bulunan +55 mm’lik yatay eleğe boşaltılır. +55 mm’lik elekten geçen curufun; elek üstü, manyetik vinç ile elenerek ayrılır. Manyetik vincin alamadığı

demir dışı kısım kamyonlara yüklenip atık sahasına gönderilir. Manyetik seperatör ile ayrılan demirli malzeme “kalın seperatör” olarak adlandırılarak Çelikhane Hurda Hazırlama Tesisine gönderilir. Elek altı malzeme (-55 mm) bantlar vasıtasıyla +23 mm ve +11 mm’lik eleklerle taşınır. Burada elenen curufun elek altı (-11 mm) atık olarak stok sahasına gönderilir. Elek üstü malzeme (+11 mm) +23 mm’lik ayrı bir elekten daha geçirilir. Manyetik banttıan geçirilerek demir dışı curuf ayrılarık atık stok sahasına gönderilir. Manyetik bantın tuttuğu demirli malzeme (+11-23 mm) Yüksek Fırınlar Müdürlüğü tarafından kullanılmak üzere stoklanır. +23 mm’lik elek üzerinde kalan malzeme tekrar manyetik banttıan geçirilir. Manyetik bantın tuttuğu demirli malzeme (> +23 mm) “ince seperatör” olarak adlandırılır. İnce seperatör hırdası tozsuzlaştırılması amacıyla ikinci kez elendikten sonra stoklanır.

Demir-çelik tesislerinde ortaya çıkan ve bir atık olarak değerlendirilen curuf çelik içermesi nedeni ile değerlendirilebilir olması ve demir-çelik üretim aşamasında çok miktarda curuf açığa çıkmaktadır. Bu nedenle demir-çelik üreticisi ülkelerin curuf kazanımı ile ilgili araştırmalar yapılmıştır. Gerek teknolojik gelişmeler, gerekse atıkların sebep olduğu çevre kirliliğini önlemek ve aynı zamanda atıkların geri kazanımı (demir çelik curuflarının çeşitli alanlarda değerlendirilmesine yönelik olan çalışmalar) çalışmaları büyük bir hız ve önem kazanmıştır. Curuf stoklarının tekrardan kazanılabilmesi için geniş kapsamlı çalışmalar yapılmış ve çevresel etkisinin de önemli olması nedeni ile ülkemizde ve dünyada yasalarla da (Katı Atık Kontrol Yönetmeliği) desteklenmektedir. Bu kapsamda, çelikhane curuflarının yeniden tanımlanması, fiziksel ve kimyasal özelliklerin belirlenmesi ve ürün olarak değerlendirilebilmesi için üretim yöntemlerinin saptanması önemli bir konu halini almıştır. Curuf stok oluşumunu azaltarak curuf stok kaynaklarının dikkatli bir şekilde yönetimini sağlamak, curuf stok yönetimini sağlamak, etkin bir curuf stok yönetiminin amacıdır. Çevre ve ekonomik yüklerin azaltılabilmesi için gerekli yönetimin sistem içerisinde bulunması gerekmektedir. Atıkların en uygun kullanımını sağlamak, geri dönüşüm oranını artırmak, geri dönüşümü olmayan kaynakları geliştirmek ve yeni ürünler üretebilme amacıyla birçok araştırma ve geliştirme yapılmaktadır (İsdemir Sistem Geliştirme Müdürlüğü, 2004) [1].

Atıkların geri kazanımı ve bertarafı bütün gelişmiş ülkelerde ve İngiltere’de de yasal izinler ve düzenlemeler ile gerçekleştirilmektedir. Bununla birlikte bazı atıkların ve bazı stoklanmış ürünlerin kullanımı ve geri dönüşüm işlemleri ilgili yasal mevzuatlar ve izinlerden muaf tutulmaktadır (UK Environment Agency (2010), Frequently asked questions about the new waste exemptions system, Waste). 1994 yılında İngiltere’de

başlayan Atık Muafiyetleri (Waste Exemptions) uygulamasıyla birlikte mevzuata uygun olarak belirlenmiş atıkların belirli süre içinde, farklı üretim prosesleri için belirli ölçülerde kullanımı bütün izin ve yasal prosedürlerden muaf tutulmaktadır. Çevre, Gıda ve Köy işleri Bakanlığı (DEFRA) ile işbirliği içerisinde uygulayıcı bir kamu kurumu (executive non-departmental public body) olan İngiltere Çevre Ajansı (Environment Agency) tarafından yürütülen “atık muafiyetleri” programının kapsamı Nisan ayı 2010 yılında genişletilmiştir. 1994 yılından bu yana atık yönetiminin gelişimi ile pek çok atığın ve endüstriyel açıdan ürün olarak kullanım alanı ve pazar bulması bu konu ile ilgili gelinen noktanın önemini arz etmektedir [2].

Bu düzenlemeler ile kayıt dışı atık kullanımı ve atık bertarafının önüne geçmiş, olası kirlilik ve sağlık problemlerinin de önüne geçmiştir.

Entegre Demir-çelik endüstrisi stok sahasında bulunan yüksek fırın curufları yukarıda listelenen U8–Atıkların spesifik amaçlı kullanımı sınıfı kapsamında değerlendirilmektedir. İngiltere Atık Listesi Yönetmeliği ve Avrupa Atık Kataloğu kapsamında 10.02.01 kod numaralı “Curuf İşleme Atıkları” ve 10.02.02 kod numaralı “İşlenmemiş Curuf” sınıfına giren bu atıkların farklı alanlarda belirli miktarlarda kullanımı, atık mevzuatlarında belirtilen mevzuat uygulamalarından ve izinlerden muaf tutulmaktadır.

İngiltere’de 2006 yılından itibaren ulusal kapsamda başlatılan, sektörde ve farklı alanlardaki Atık/Kaynakların kullanımını ve geri kazanımını kolaylaştıran düzenlemelerden birisi (Waste Protocols Project) Atık Protokolleri projesidir. İngiltere çevre ve ajansı atık/kaynak eylem programı (Waste and Resources Action Programme-WRAP) ortaklığı ile projenin finansmanı İngiltere Çevre, gıda ve Köy işleri Bakanlığı, Galler Hükümeti (Welsh Assembly Government) ve Kuzey İrlanda Çevre Ajansı (Northern Ireland Environment Agency) tarafından sağlanmıştır [3].

Demir-çelik üretim tesislerinde oluşan curufların aşağıda listelenen alanlarda kullanımı için önemli bir fırsat yaratılmıştır [4].

- yol, köprü, depolama alanı, drenaj kanalları vb. yapımında dolgu malzemesi, bağlayıcı ve agrega olarak İnşaat mühendisliği uygulamalarında kullanılabilir.
- Gübre olarak (temel oksijen ocağı curufu için)
- Diğer mühendislik uygulamalarında; deniz dolgusu olarak, arazi ıslahında, demir yolu vb. alanlarda [4].

1.1. Amaç

Ülkemizde mevsimsel sıcaklık farklılıklarının fazla olduğu ve soğuk iklim koşullarının yaşandığı bölgelerde donma ve çözünme olayının olumsuz etkileri sıkça yaşanmaktadır. Bu bölgelerdeki zeminler donma ve çözünme çevrimi ile yapısal olarak değişime uğradıkları için zeminlerde hem mekanik hem de fiziksel özellikler açısından olumsuz değişimler meydana gelebilmektedir. Bu çalışmada killi zemin numunesine farklı oranlarda, İSDEMİR A.Ş'den temin edilen BOF curufunun direk karıştırılması ile kuru iklim şartlarındaki ufalanma durumu, kimyasalların karıştırılması ile sıvı ve tuzlu iklim şartlarındaki ufalanma durumu, CBR ve kompaksiyon deneyleri ile zeminin taşıma gücü (duraylılık) ve bünyesinde bulunması gereken optimum su miktarı (maksimum sıkıştırılabilirlik derecesi) tespit edilmiştir. CBR ve kompaksiyon testleri sonucunda elde edilen değerlere göre Nüve ID 300 iklimatik test kabini içinde donma-çözünme işlemi uygulanarak, kabarma miktarının da bulunması sağlanmıştır.

1.2. Kapsam

Bu çalışmada, İskenderun Demir ve Çelik Fabrikaları (İSDEMİR) A.Ş curuf stok sahasından sondajlama yapılarak alınan BOF curufları ve Hatay'ın İskenderun İlçesinden tedarik edilen kil numuneleri bu tez çalışmasında yapılan deneylerde kullanılmıştır. Kil numunesi $-75 \mu\text{m}$ 'a kadar öğütüldü, kullanılacak kimyasallar (MgSO_4 , BaCl_2) hazırlandı ve laboratuvar ortamında deney şartları oluşturularak testlere başlandı. Laboratuvar testleri aşağıda görüldüğü gibi üç aşamada yürütüldü.

□ Killi zemin numuneleri üzerine %3, %6, %9, %12, %15 ve %20 oranlarında BOF curufu ilave edilerek donma-çözünmeden kaynaklanan aşınma durumu tespit edildi. Testler, TS EN 1367-1 standardına göre uygulandı. Her test için, standart da belirtilen 5 farklı sıcaklık şartları uygulanarak (çizelge 3.11) 24 Saat'te 1 periyodu tamamlandı ve her test için 10 defa bu işlem tekrarlandı. Bu şekilde killi zeminlerin aşınma (ufalanma) durumu karakterize edilerek hangi iklim ve çevre şartlarında (çizelge 4.6) uygulanabileceği araştırılmıştır. Bu deneyin amacı hava ortamında donma-çözünmeden kaynaklanan killi zeminlerdeki korozyon etkisinin giderilmesidir.

□ Killi Zemin numuneleri üzerine %3, %6, %9, %12, %15 ve %20 oranlarında BOF curufu ilave edilerek donma-çözünmeden kaynaklanan aşınma durumu tespit edildi. Testler, TS EN 1367-2 standardına göre uygulandı. Bu test için, 1 litre çeşme suyu

içerisine 1.5 kg magnezyum sülfat ($MgSO_4$) katı olarak ilave edilerek tamamen çözüldürüldü, belli oranda BOF curufu ilaveli killi zemin özel filtre kâğıtları içerisine konarak (şekil 3.32) bu magnezyum sülfat ($MgSO_4$) çözeltisi içerisinde standarda göre bekletildi (şekil 4.14). Burada belirtilen oranlarda BOF curufu karıştırılmış killi zemin numunelerin, magnezyum sülfat ($MgSO_4$) çözeltisi içerisinde 17.5 saat süre bekletilmesi, 2.5 saat sürede magnezyum sülfattan temizlenmesi, 4 saat süre ile numunelerin suyunun süzülmesi ve etüvde (110 ± 5) °C sıcaklıkta 24 saat süre kurutulması işlemlerinden oluşan bir peryotluk test işlemi toplam 48 saat'de tamamlanmaktadır. Bu işlem bir periyottur ve 5 kez tekrarlanarak toplam 10 günde bitirildi. Belli oranlarda BOF curufu karıştırılmış killi zemin numunelerinin magnezyum sülfat çözeltisi içerisinde bekletilmesi aşamasında, gözenek boşluklarının magnezyum sülfat tarafından doldurulması ile oda şartlarında tekrar kristalize olmakta ve bulunduğu ortamın gözenek iç çeperlerine dışa doğru bir basınç yaparak çatlamalara neden olmakta ve akabinde killi zemin ufalanmaktadır. BOF curuf karışımı killi zemin numunelerinin gözenek boşluklarının magnezyum sülfat tarafından doldurulması ile oluşan korozif etkilerden dolayı filtre kâğıdı içerisindeki killi zemin malzemesi filtre kâğıdı aralıklarından geçebilen çok ince tane boyutunda ufalanmaya neden olmakta ve bu ufalanmış malzemenin filtre kâğıdı dışarısına çıkması ile filtre kâğıdı içerisinde bulunan malzemenin ilk ağırlığına (M_1) göre kütle kaybı (M_2) olmaktadır. Bu kütle kaybı, formülasyon ($M_s\%$) ile hesaplama yapılarak BOF curuf karışımı killi zemin kütlelerinin yüzde (%) olarak kütle kaybı ve M_s kategorisi (çizelge 3.14) bulunur. Burada bulunan $M_s\%$ değeri ile çizelge 3.15'de belirtilen çevre ve iklim koşullarına göre hangi şartlarda kullanılabileceği tahmin yapılabilir. Bu deneyin amacı sıvı ortamında donma-çözünmeden kaynaklanan killi zeminlerdeki korozif etkisinin giderilmesidir.

□ Bu deney yöntemi ile yine %3, %6, %9, %12, %15 ve %20 oranlarında BOF curufu karıştırılan killi zemin numunelerinin donma-kabarma miktarlarının incelenmesi ASTM D 5918 standardı takip edilerek yapılmıştır. Agregaların TS EN 1367-1 standardına göre yapılan mevsimsel donma-çözünme deneyi ve TS EN 1367-2 standardına göre yapılan magnezyum sülfat deneylerinden farklı olarak bu standardın uygulama çalışmasında; mevsimsel donma-çözünme döngüsüne bağlı killi zeminlerdeki kabarma ve şişme miktarı araştırılarak, killi zeminin üzerindeki yapıyı taşıma kabiliyeti ve bu zeminlere ilave edilecek optimum BOF curufunun kullanım oranı (şekil 3.29) belirlenmiştir.

Bu deneyin sağlıklı bir şekilde hesaplanıp tahminler yapabilmek için bir dizi bağlı deneylerde yapılmıştır. Bu aşamalardan birincisi kompaksiyon deneyidir. Bu yöntemde zemin numunelerinin maksimum sıkıştırılabilmesi için; %3, %6, %9, %12, %15 ve %20 oranlarındaki BOF curufu ilave edilmiş killi zemin numunelerinin her bir BOF curufu karışım oranı için ayrı ayrı %3, %6, %9, %12, %15, %18 ve %21 oranlarında çeşme suyu ilave edilip, kuru birim hacim ağırlığının (gr/cm^3) su içeriğine bağlı olarak oluşturulan grafiğin maksimum tepe noktasındaki değer temel alınarak en uygun değerdeki su karışım oranı (kompaksiyon değeri) belirlenmiştir.

Optimum su muhtevasını belirledikten sonra zeminlerin taşıma gücü oranı belirleme (CBR-California Bearing Ratio Test) deneyi yapılmıştır.

Bu deney, kesit alanı 19.35 cm^3 olan silindrsel bir pistonu belirli bir ivmeyle zemine iterek elde edilen yük-penetrasyon bağlantısının (Kaliforniya taşıma oranı) bulunmasını kapsamaktadır. Penetrasyonun herhangi bir değeri için ölçülen yükün standart bir yüke oranı olarak tanımlanan CBR genellikle 2.5 mm'lik penetrasyon için verilmiştir. 5 mm'lik bir penetrasyon miktarı için büyük olan değer alınır. Bu laboratuvar yönteminde belli oranlarda BOF curufu içeren killi zemin numuneleri her bir BOF curufu için kompaksiyon testlerinde elde ettiğimiz optimum su muhtevası (çizelge 4.10) içeriğini sağlayacak şekilde kil+BOF curufu+su karışımli malzeme 4 kg ağırlığında CBR kaplarına doldurulup CBR deney düzeneğine yerleştirildi. CBR cihazında, 0.5 mm'den 5 mm'ye kadar her 0.5 mm'de bir dikey yönünde kuvvet uygulanarak CBR kabı içerisinde killi malzemeye uygulanan basınç değeri (kg/cm^2) ile pistonun malzeme içerisinde ilerleme miktarı (penetrasyon) mm olarak bulundu (çizelge 4.11, şekil 3.41). Biz bu CBR testi ile killi zeminlerin taşıma gücü miktarını belirlemede her BOF curufu karışım oranı için 2.5 mm batması sonunda CBR kabı içindeki belli karışım oranındaki killi zemin numuneleri üzerine yapılan basınç değerlerini takip ettik. Referans basınç değeri olarak kullandığımız sadece killi zeminden elde edilen basınç değerine göre bu farklı karışımlarda elde ettiğimiz en yüksek basınç değeri bizim için optimum basınç değeri olarak değerlendirilmiştir.

Çalışma standardınca belirlenen oranlarda CBR kapları içerisine belirlenen oranlarda kili zemin numunesi+BOF curufu karışımı hazırlanarak her bir numune kalıbı CBR cihazına yerleştirilerek (şekil 3.38) zemin penetrasyon işlemi yapılarak basınç değerleri hesaplandı. Sonra bu zeminin numunesi içeren CBR kapları çeşme suyu doldurulmuş tankların içerisine konularak 3 gün suda bekletildi (şekil 3.36), içerisindeki malzemenin suya iyice doygun hale gelmesi sağlandı ve donma-çözünme döngüsü için

iklimlendirme cihazına belirlenen standartlarca 10 gün boyunca donma-çözünme işlemine tabi tutuldu. Cihaz içerisindeki numunelerin kabarma miktarları düzenekte bağlı olan (şekil 3.36 ve şekil 3.37) nanometrelerce kontrol edilerek kabarma miktarları kontrol edildi. Donma-çözünme döngüsü tamamlandıktan sonra her bir numune kabı tekrardan CBR cihazında konularak dikey yönlü zemin-penetrasyon (sıkıştırma) işlemi yapıldı. Cihazdan elde edilen sonuca göre her kabın değeri hesaplandı ve arasındaki ilişki çizelge 4.13'e yazılarak incelendi.



2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Her yüzyıl yeni soruları ve yeni yanıtları beraberinde getiriyor. 21. Yüzyılda ekonomik büyüme ile birlikte çevresel ve sosyal kaygıları ön plana çıkarırken, gelişen teknoloji ve iletişim olanakları sayesinde yenilikçi çözümleri mümkün kılıyor. Nüfusunun, meydana gelen atıkların azaltılması, mevcut atıkların potansiyel bir hammadde kaynağı olarak değerlendirilmesi, kullanılmış hammaddelerin yeniden kullanılması gibi atık yönetimi konuları giderek önem kazanmaya başlamıştır [5].

BOF curufu stokları tesisi stok alanının attırılmasının yanı sıra devam eden demir çelik üretimi nedeni ile depolama alanı zorluğundan dolayı ilave maliyet gerektirmektedir.

Atık yönetimine makul olmayan sanayi atıkları, çevre problemlerinin yanı sıra depolanma zorunluluğu gibi ilave külfetler getirmektedir. Bu nedenle, birçok atık içeriğine bakılmaksızın ortadan kaldırılmaya çalışılmaktadır. Buna bağlı olarak stoklanmış atık malzemelerin de bir katma değeri vardır. Makul bir geri kazanım tekniği ile atıklar içinde katma değeri yüksek mamuller elde edilmesinde kullanılabilir [6]. Yapılan Araştırmalar ışığında, Hatay'ın İskenderun İlçesinden alınan toprak numuneleri üzerine İsdemir Çelikhane Curufu katılarak donma-çözünme ve kabarma deneyleri yapılmıştır. Bu konular ile ilgili benzer çalışmalar şunlardır.

Mahmut BİLEN'in "çelikhane curuflarından liç-karbonatlaştırma prosesi ile kalsiyum karbonat kazanılması" adlı Yüksek Lisans tezi çalışmasıdır. Bu çalışmada, İsdemir A.Ş (İskenderun Demir ve Çelik Fabrikaları A.Ş) çelikhane curuflarının asetik asit (CH_3COOH) ile hidrometalurjik zenginleştirme yöntemi yapıldıktan sonra kalsiyumun selektif bir çözünme ile çözeltiliye alınması ve elde edilen bu çözeltiliye CO_2 ilave edilerek yüksek saflıkta kalsiyum karbonatın_(katı) (CaCO_3)_(k) kazanım koşulları araştırılmıştır [1].

Bu Çalışmada, A. ZAIMOĞLU, Yasin ÇELİK, R. Kağan AKBULUT ve Temel YETİMOĞLU Erzurum bölgesinden alınan killi zemin numunesine çeşitli çap ve boyutta polipropilen fiber ekleyerek donma-çözünme sonrası bir dizi deneyler yaparak sonuçlarını irdelemiştir. Bu sonuçlara göre; toprağın serbest basıncında önemli derecede artış, daha sünek davranış ve eksene gerilmelerde azalma gözlemlendiğinden bahsetmiştir[2].

Avrupa Birliği gibi gelişmiş ülkelerde farklı alanlarda yıllardır geri dönüşüm ile kazanılmakta olan demir-çelik curuflarının ekonomiye tekrardan kazandırılması yönündeki izinler ve yasal belgelendirme işlemindeki zorluklar son yıllarda

hafifletilmekte veya tamamen ortadan kaldırılmaktadır. Ülkemizde ise demir-çelik sektörü atıklarının farklı alanlarda yeniden işlenerek tekrardan ürün haline getirilerek kullanılması konusu yıllardır gündemde yer almaktadır. Ancak çimento fabrikalarında hammadde olarak kullanılabilen yüksek fırın curufları dışındaki curufların yaygın kullanımının yönünde çeşitli yasal engeller (teknik, idari, yasal vb.) bulunmaktadır. Bu yasal zorluklardan kaynaklanan geri kazanım yönündeki engeller için Avrupa Birliği ve gelişmiş ülkelerdeki süreçler de takip edilerek konunun her açıdan ele alınması ve ilgili çalışmaların önünü açacak uygulamaların (denemeler, pilot uygulamalar, mevzuat çalışmaları vb.) hayata geçirilmesi arz etmektedir.

Endüstriyel Simbiyoz Projesi adlı çalışmanın konusu; her yüzyıl yeni soruları ve yeni yanıtları beraberinde getiriyor. 21. Yüzyılda ekonomik büyüme ile birlikte çevresel ve sosyal kaygıları ön plana çıkarırken, gelişen teknoloji ve iletişim olanakları sayesinde yenilikçi çözümleri mümkün kılıyor. Ülkeleri ve sektörleri ayıran sınırların kalktığı yenedünyada iletişim ve iş birliğini öne çıkaran yenilikçi yaklaşımlarda kaçınılmaz. Çağın getirisi olan her sorun yeni bir sınav ama artık kimse bu sınavı yalnız vermek zorunda değil. İş birliği kültürünü geliştiren, her paydaşına katma değer sağladığı gibi çevreyi ve sosyal faydayı da gözeten yeni bir anlayış vizyon sahibi kuruluşları çok yönlü fırsatlar içeren dinamik bir ağda buluşturuyor. Bu yenilikçi anlayışın adı endüstriyel simbiyoz. Endüstriyel simbiyoz iki ya da daha fazla işletmenin birlikte düşünüp birlikte hareket ederek katma değer yaratmaları hem ekonomik hem de çevresel fayda sağlamaları anlamına gelir. Endüstriyel simbiyoz anlayışıyla bir işletmenin atığı diğerinin ham maddesi oluyor. Üstelik paylaşım atıklarla sınırlı değil enerji, iş gücü, lojistik, uzmanlık gibi her türlü kaynak bu sistemde etkin olarak değerlendirilebilir. İlk uygulamalarına 1970'li yıllarda Danimarka'da rastlanan endüstriyel simbiyoz bugün Avrupa ve kuzey Amerika ülkelerinin yanı sıra Güney Kore, Çin, Meksika, Brezilya ve Avustralya birçok ülke de uygulanmaktadır. 2005 yılından buyana İngiltere'de yürütülen ulusal endüstriyel simbiyoz programı dünyadaki en başarılı örneklerden. Program sayesinde işletmelerin tasarrufu yılda yaklaşık 250 milyon sterlin artarken depolanması gereken atıkları 9 milyon ton, karbon dioksit salınımları 8 milyon ton azaldı. Yeni iş olanakları ve istihdam alanları yaratıldı. Devletin bu program için yaptığı maddi 8 katı doğrudan vergi olarak hazineye döndü. Benzer bir başarı Türkiye içinde mümkün.

Endüstriyel simbiyoz ilk olarak 2009 yılında İskenderun körfezinde endüstriyel simbiyos projesi ile gündeme geldi. Bakü-Tiflis-Ceyhan boru hattı şirketinin kurumsal sosyal sorumluluk anlayışı ile başlattığı bu proje çeşitli fizibilite ve değerlendirme

çalışmaları sonrasında uygulamaya yönelik faaliyetlerle devam etti. Projenin 2011 yılında uygulama aşaması Türkiye Teknoloji Geliştirme Vakfı yürütücülüğünde Orta Doğu Teknik Üniversitesi ve İngiltere'deki programın uygulayıcısı International Synergies işbirliği ile gerçekleştirildi. Özel sektörü, kamu kuruluşlarını, üniversiteleri ve sivil toplum örgütlerini buluşturan bu öncü proje sayesinde endüstriyel simbiyozla yönelik iş birliği ağları her geçen gün daha da büyüyor demiştir [3, 12].

İngiltere Çevre ajansının (UK Environment Agency) yayınlamış olduğu bu makalede atık/kazanım yöntemimin demir-çelik tesislerinde uygulanabileceği hakkında değerlendirilebileceği hakkında yasal düzenlemeler Çevre ve Orman Bakanlığı tarafından 5 Temmuz 2008 tarihinde Atık Yönetim Genel Esaslarına İlişkin Yönetmelik ile 17 Haziran 2017 tarihinde yayınlanan Bazı Tehlikesiz Atıkların Geri Kazanımı Tebliği ile yürürlüğe girmiştir. Bu kapsamda demir-çelik atıklarının geri kazanımı ile ilgili yasal düzenlemeler yakından incelenmeli ve değerlendirilmelidir. Yasal mevzuat kapsamında İnşaat sektöründe kullanılmak üzere yol, köprü, depolama alanı, drenaj kanalları vb. yapılarda, bağlayıcı ve agrega olarak çalışmaların yapıldığından ve bölge hâkim olan tarım alanı için gübre olarak (temel oksijen ocağı curufu için) ve diğer mühendislik uygulamalarında kullanılabileceği hakkında hazırlanmış makaledir [4].

Hüseyin AKBULUT ve Cahit GÜRER'in hazırlamış olduğu bu makalede yol yapımında kullanılan temel bir malzeme olan agregaya alternatif bir ürün çalışması yapılmıştır. Çalışmada Afyon-İscehisar bölgesindeki mermer ocağı atıklarından agrega üretilmiş ve bu numuneyi karşılaştırmak için şehir içi asfalt karışımlarda kullanılan bir şahit agreganın agrega numuneleri üzerinde bir takım çalışmalar yapılmıştır [5].

Gülây KAYA ve Servet TURAN'ın ekonomik ve çevre sorunlarını göz önünde bulundurarak seramik sektöründeki Atık/Kaynakların endüstriye verimli bir şekilde kazandırılması hakkında yazmış olduğu makaledir. Çalışmanın amacı yüksek fırın curufunun içerdiği pahalı oksitlerin üretiminde gerek duyulan ve seramik endüstrisinde kullanılan firit üretiminin değerlendirilmesi hakkında çalışmalar yapılmıştır [6].

Tuğba BİLGE'nin hazırlamış olduğu Yüksek Fırın Curufu Katkısının Kil Zeminlerin Stabilizasyonuna Etkisinin araştırılması adlı Yüksek lisans çalışmasıdır. Bu çalışmada killi zeminlerin curuf, bentonit, kireç, uçucu kül ve zeolit katkılarını belirli oranlarda katarak zeminde iyileştirmeler olup olmadığı hakkında çalışmalar yapılmıştır. Deney kapsamında numuneleri homojen karıştırarak oluşan yeni karışımda özgül ağırlık kıvam limitleri kompaksiyon serbest basınç ve hidrometre deneyleri yaparak kili zeminde stabilizasyonun sağlanabilirliği hakkında çalışma yapılmıştır. Bu çalışma

kapsamında sonuç olarak kürede bekletilen numunelerde en yüksek mukavemeti %100 Kil+%15 YFC+%15 Zeolit göstermiştir demiştir [7].

Agregaların termal ve bozunma özellikleri için deney standardıdır. Donmaya ve çözünmeye karşı direncin tayini (TS EN 1367-1). Bu deney, agreganın arka arkaya donma ve çözünme etkisine maruz bırakılması halinde gösterdiği davranış biçimi hakkında bilgi verir. Atmosfer basıncında suya batırılarak su altında tutulan ve belirli tane büyüklüğüne sahip agregalardan oluşan numune, 10 defa donma ve çözünme döngüsüne tâbi tutulur. Burada, su altında -17.5 °C'a soğutma ve sonra da yaklaşık 20 °C'taki su banyosunda çözme işlemi gerçekleştirilir. Donma-çözünme döngülerinin tamamlanmasından sonra agregalar, çatlak oluşumu, kütle kaybı ve varsa mukavemet değişiklikleri gibi herhangi bir değişiklik olup olmadığı hususunda kontrol edilir [8].

Türk Standartlarınca (Ankara) hazırlanmış ve Ulaştırma Bakanlığınca da kullanılan agregaların termal bozunma davranışını tespit etmek için hazırlanmış deney standartlarından Magnezyum sülfat deneyi (TS EN 1367-2) yöntemidir. Bu standart uygulamada agrega numuneleri magnezyum sülfat çözeltisine daldırılıp etüvde kurtulmasıyla numunenin sıvı ortamda ki toleransını ölçmeye yarayan yöntemlerden bahsetmektedir [9].

A. Şahin ZAIMOĞLU, Fatih HATİPOĞLUNUN ve R. Kağan AKBULUT'un hazırlamış olduğu Yüke Maruz İnce Daneli Zeminleri Donma-Çözünme Davranışı adlı makaledir Bu makalede mevsimsel donma görülen soğuk iklim bölgelerinde karayolu, demiryolu, sulama kanalı gibi mühendislik yapılarına ait yüzeysel temel zeminleri bu yükler altında donma-çözünmeye maruz kalmaktadır. Yapılan deneyler sonucunda, Yüke maruz kalan numunelerin geleneksel yöntemdeki numunelere göre donma ve çözünme dayanıklılıkları önemli derecede azalım göstermiştir [10].

Deneylerimizi iklimlendirme cihazı olan, İD 300 Klimatik Test Kabini ile yapılmıştır. Elektronik, otomotiv ve otomotiv yan sanayi, havacılık, kimya, plastik, tekstil, ilaç, inşaat malzemeleri, gıda, ambalaj ve askeri ekipman üretimi gibi pek çok farklı sektörde ortaya çıkan iklimlendirme, kararlılık, yapay yaşlandırma ve depolama gibi değişik iklimlendirme koşullarına yönelik ihtiyacı karşılamak üzere üretilmiştir.

Sıcaklık ve nem kontrolü gerektiren araştırmalar için ileri teknoloji sıcaklık çalışma aralığı: -40°C/150°C. Nem çalışma aralığı: %15Rh-%98Rh (10°C ile 90°C arasında). Bulunulan bölgeye göre 0-2000 metre arası rakım ayarı. 0-999 saat 59 dakika ve süresiz çalışma imkânı. 1-99 arasında program tekrarlama özelliği ile yapılan deneyler çok büyük kolaylık sağlamaktadır [11].

Zemin numunelerinin doğal durumdaki özellikleri belirlendikten sonra aynı yerden alınan diğer numunelerde ise donma çözünme etkisini belirleyebilmek için TS EN 1367-1 agregaların donma-çözünmeye karşı direncinin tayini yöntemine göre, donma-çözünmeye maruz bırakılmışlardır.

Deney sonucuna göre; Koni penetrasyon tayini ile elde edilen likit limit değerleri DÇS 1 m'de % 5.78 azalmış ve DÇS 2 m'de % 1.23 azalmıştır. Zemin numunelerinde plastik limit değerleri DÇS hesaplanmış ve DÇS zemin plastiklik özelliğini yitirmiş ve non-plastik (NP) halini almıştır [13].

Ahmet Şahin ZAIMOĞLU ve Temel YETİMOĞLU bu çalışmalarında, Erzurum bölgesindeki zemin numunesine kar, buz ve buharın likit limit ve plastik limit deneyleri üzerine etkisini araştırmıştır. Sonuç olarak, plastik limit değerleri numuneler üzerinde saf su ile karşılaştırıldığında kar, buz ve buhar aşamalarına göre azaltıcı bir etki gösterdiğini ancak plastik limit azalması oranının buhar aşamasında daha belirgin gözlemlenmiştir [14].

Ömer Saltuk BÖLÜKBAŞI ve B. TUFAN tarafından yazılmış, "Demir çelik üretiminde curuf zenginleştirmenin manyetik ayırıcıların ve sinter kalitesine etkisi" adlı yazıdır. Bu yazıda bazik oksijen fırını (BOF) curufunun demir çelik sektöründe büyük bir problem olduğundan bahsetmektedir. Yaklaşık olarak yıllık 6 milyon ton BOF curufunun stok sahalarına atıldığından bahsetmektedir. Bu yazıda bu curufların kimyasal ve fiziksel yapısından ve manyetik seperatörlerden geçirildiğinden hangi boyutlara indirilebileceği, XRD sonuçları ve bunların nasıl değerlendirilmesi gerektiğinden ve nasıl sınıflandırılması gerektiğinden bahsetmektedir [15].

Çelikhane curuflarının değerlendirilmesi hakkında yapılmış sunudur. Bu çalışmada çelikhane curufların sektörde atık olarak depolandığından ve bu atıkların nasıl değerlendirilebileceğinden bahsetmektedir. Demir çelik fabrikalarında curufunun hangi aşamalarda ortada çıktığından da bahsetmektedir [16].

Ahmet BEYÇİOĞLU, Celalettin BAŞYİĞİT ve Serkan SUBAŞI'nın hazırlamış olduğu Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanımı ile Geri Kazanılması ve Çevresel Etkilerinin Azaltılması konulu makaledir. Yazılar bu makalede gelişmekte olan endüstrinin ile birlikte kullanılan hammadde ve atıklarına da artması nedeni ile bu atıkların inşaat sektöründe kullanımı hakkında araştırma yapılmıştır. Çalışma kapsamında endüstriyel atık olan araç lastikleri, uçucu küller, silis dumani, granüle yüksek fırın curufu ve mermer tozları inşaat sektöründe kullanılabilirliği araştırılmıştır [17].

Uçucu kül, termik santrallerden elde edilen bir atık malzeme olup son yıllarda özellikle inşaat sektöründe yaygın kullanım alanı bulmuştur. Puzolanik özelliğe sahip

olması ve ekonomik olması, uçucu külün geoteknik uygulamalarında kullanılmasını sağlamıştır. Bu çalışmada Turgutlu yöresinden temin edilen silt zeminin mekanik özelliklerinin uçucu kül ile iyileştirilmesi amaçlanmaktadır. Zemin karışımları farklı kür sürelerinde serbest basınç deneyine, farklı çevrimlerle donma-çözünme deneyine tabi tutulmuştur. Ayrıca deneysel çalışmalarda çimento da kullanılarak en iyi performans yakalanmaya çalışılmıştır. Bu çalışmadaki bazı değerlendirmeler; Kür süresinin artışıyla serbest basınç dayanımları çok büyük artışlar göstermiştir. Özellikle 28 günlük kürde dayanımlar çok büyük değerlere ulaşmıştır. Donma-çözünme çevrimlerine uğrayan zeminlerde çatlaklar oluşmuş, her çevrim sonrası büyüyerek dayanımların düşmesine yol açmıştır. Doğal zemin numunesi büyük dayanım kaybına uğrarken uçucu kül ve çimento katkılı zeminlerde bu kayıp daha düşük oranlarda olmuştur. Sonuç olarak uçucu külün silt zemine etkisi olumlu yönde olup zeminin serbest basınç dayanımını ve donma-çözünmeye direncini arttırmaktadır [18].

Bu çalışmada; teknolojik sinter üretiminde, sinter harmanına bazikliği sağlamak amacıyla BOF curufu ilave edilmesinin etkileri incelenmiştir. Sinter harmanına BOF curufunun ilave edilmesi sinter verimliliğini ve genel olarak sinter kalitesini arttırdığından bahsetmiştir [19].

Donma-çözünme deneyinde edilen donma kabarma hızı ile donma-çözünme sonrası oluşacak mukavemet kayıplarının zeminlerin endeks özellikleri arasındaki ilişkinin incelenmesi amaçlanmıştır [20].

Türk Standartlarınca (Ankara) ve Ulaştırma Bakanlığınca hazırlanmış zemin malzemelerinin yük taşıma kabiliyetlerinin tespiti yapmak ve zemin duraylılığını anlayabilmek ve yorumlayabilmek için hazırlanmış deney yöntemidir. Bu deney standardı çelik bir kalıp içerisine önceden belirlenmiş su miktarı ile karıştırılıp sıkıştırılması ile üzerine kesit alanı 19.35 cm^3 'lük silindirel bir metalin sabit bir ivme ile yük-penetrasyon uygulayarak taşıma gücünü tespiti için kullanılmıştır [21].

Saniye DEMİR ve Mustafa KILIÇ'ın Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Toprak bölümünde hazırlanmış olduğu bitime tezi. Bu tezde şişme problemi olan arı-kurak iklimlerde görülen montmorillonit kil minerali içeren zeminlerde meydana gelen veya oluşabilecek zararları önlemek için yaptığı araştırmayı anlatmaktadır [22].

Işık YILMAZ ve Ergun KARACAN'ın Cumhuriyet Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği bölümünde yazmış olduğu makale. Bu çalışmada zeminlerdeki killerin şişme özelliklerine, bağlı olarak, mühendislik, yapılarının ve şişme potansiyeli, yüksek,

zeminler üzerinde inşa edilen mühendislik yapılarının ve hafif yapıların zemin kabarmaları sonucunda oluşan deformasyonlarını ele alan makaledir [23].

Milli Eğitim Bakanlığı tarafından hazırlanan Talim ve Terbiye Kurulu Başkanlığının 02.06.2006 tarih ve 269 sayılı Kararı ile onaylanan, Mesleki ve Teknik Eğitim Okul ve Kurumlarında ders notlarında laboratuvar ortamında agrega deneylerini anlatmaktadır [24].

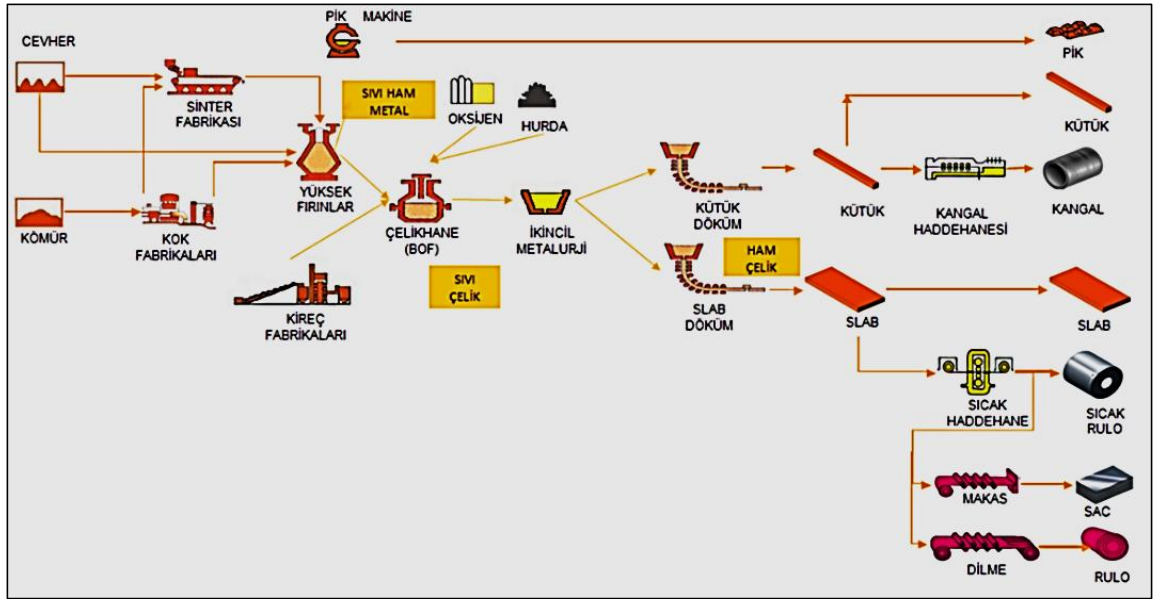
Abdullatif BATMAN'ın “Öğütülmüş Kuvars Kumunun Kilin Mukavemet Özelliklerine Etkisinin Araştırılması”, adlı yüksek lisans tezidir. Bu tezde Erzurum Oltu-Narman yöresinde bulunan iki farklı bölgeden yüzeyden 1 m derinlikte normal konsolide olmuş kırmızı ve yeşil kil tabakalardan numune alınmıştır. Bu iki kil numunesi kurutulup öğütüldükten sonra eleme işlemine tabi tutularak deneye hazır hale getirilmiştir. Bu numunelere belirlene oranlarda kuvars kumu konularak Öğütülmüş kuvars kumu katkısının genel olarak kil zeminlerin geoteknik açıdan bazı özelliklerinin iyileştirilmesinde kullanılabileceği söylenebileceğinden bahsetmiştir [25].

Emin ÜNVER'in “Problemlili Kil Zeminlerin Uçucu Kül İle İyileştirilmesi” adlı yüksek lisans tezi bu çalışmasında yazar problemlili zeminlerin kimyasal stabilizasyonu için düşük plastisiteli killi bir zemin Soma ve Çatalağzı uçucu külü ile stabilize edilmiştir. Bu amaçla katkısız ve %5, %10, %15, %20, %25, %30 uçucu kül katkı seviyelerindeki numuneler üzerinde serbest basınç, şişme ve dispersibilite deneyleri yapılmıştır. Yapılan çalışmalar sonucunda kil zeminin dayanım, şişme ve dispersibilite özelliklerinin iyileştiği görülmüştür [26].

3. MATERYAL VE METOT

3.1. Materyal

Entegre Demir Çelik Tesislerinde; demir cevheri ilave malzemeler ile sinter veya pelet haline getirilerek veya parça cevher olarak doğrudan doğruya yüksek fırına şarj edilmekte ve metalurjik kok kömürü yardımı ile indirgenip, oksijeni alınarak sıvı ham demir elde edilir. Çelik üretimi sürecinde belirli bir miktar hurda ve alaşım elementleri bir konvertör içinde sıcak metale eklenir, alaşımın üzerine saf oksijen üflenir ve sıvı çelik elde edilir. Rafinasyon işlemlerinden sonra döküm makinalarında dökülmeye hazır hale gelen sıvı çelik, belli şekil ve ölçülerde döküm yapabilen sürekli döküm makinalarında istenen ebatlarda, yarı ürün haline getirilir. Dünya demir-çelik üretiminde ilk sırayı Çin Halk Cumhuriyeti ve onu sırasıyla Japonya ve Hindistan takip etmektedir. 2016 yılı dünya çelik üretimi 1.628 milyon ton olarak gerçekleşmiştir. 2016 yılında bu üretimin 808.4 milyon tonluk bölümü (%49,6) Çin tarafından üretilmiştir Türkiye ise demir çelik üretiminde 2016 yılındaki 33.19 milyon tonluk üretimiyle yaklaşık % 2,04'lük bir paya sahiptir. Mevcut durum itibariyle Türkiye, dünyadaki 64 çelik üreten ülke arasında 8. sırada, Avrupa'daki 8 çelik üreticileri arasında ise Almanya'dan sonra 2. sırada yer almaktadır.



Şekil 3.1. Tipik bir entegre demir çelik fabrikası üretim akım şeması

İskenderun'dan alınan killi zemin numunelerine İSDEMİR A.Ş'den alınan çelikhane curufu (B.O.F curufu) çeşitli oranlarda karıştırılarak. Mevsimsel donma-çözünme şartlarına deneysel bir çözüm katmak için zemin numunelerinin deney standartlarına uygun olarak hava ortamında donma-çözünme, zemin kabarma

miktarının ölçülmesi ve Magnezyum sülfat ($MgSO_4$) çözeltisi etkisi gibi etkilere maruz bırakılmıştır. Bu ortamı hazırlamada en uygun deney standartları olan zemin numunelerinin donma kabarma miktarları ASTM D5918, donmaya ve çözünmeye karşı direncin tayini TS EN 1367-1 ve magnezyum sülfat deneyi TS EN 1367-2'ye göre yapılmıştır.



Şekil 3.2. Çelikhane sıvı ham demir şarjı ve curuf tumba tesisi

Çelikhane curuf stok sahası lokasyonu;



Şekil 3.3. BOF curuf üretim yeri (Google Earth, 15.06.2017)

Türkiye'nin güneyinde Akdeniz'in kıyısında bulunan İSDEMİR A.Ş., 3 Ekim 1970 tarihinde Payas (Yakacık) yöresinde kurulmuştur. İSDEMİR A.Ş İskenderun'a 17 km mesafede, kurulduğu tarihten itibaren sosyal tesisleri ile birlikte toplam 16.75 milyon m² alana (fabrika alanı 6.8 milyon m²) sahiptir.



Şekil 3.4. BOF curuf stok sahasının görünümü (Google Earth, 15.06.2017)



Şekil 3.5. BOF curuf saha numune araştırması

Şekil 3.2'de İSDEMİR A.Ş Çelikhane ünitesinde çelik üretiminde, yan ürün olarak çıkan BOF curuf sahası deney çalışması öncesi gezilerek, BOF curuf malzemesinin sahaya nasıl ve hangi aşamalarda getirildiği, stoklandığı ve numunelerin alınacağı yerler tespit edildi. Çelikhane curufu demir çelik üretim aşamasının doğal bir yan ürünü olarak potalar vasıtası ile tumba tesisine, tumba tesisinden kırma eleme tesisine ve manyetik

seperatörlerden geçerek stok sahasına getirilir. Şekil 3.5’de stok sahası ve çelikhane curufu sondajlama numune alımı öncesini göstermektedir.



Şekil 3.6. İsdemir A.Ş Çelikhane curuf numune yığınları

Kırma eleme tesisinden gelen çelikhane curufları henüz dökülmesine rağmen nemle birleşerek yüzeyi atmosfer basıncıda 0.5 cm kalınlığında kabuk şeklinde sertleşmiş alt kısmı ise serbest taneli ve sıcaklığı hapsedilmiş şekilde görülmektedir. Daha derinlere inildikçe sıcaklığı daha da artmaktadır. Şekil 3.6’da bu oluşum gösterilmektedir. Ayrıca sertleşmiş kabuksu yapı elle ufalandığında toz haline gelmektedir.

3.1.1. Çelikhane Curufu (BOF Curufu)

Metal cevherlerinin ergitilmesi ve metal saflaştırma sırasında ergimiş metal üzerinde biriken posa, curuf olarak adlandırılmaktadır. Konvertör içine oksijen üflenmesi sonucu çelik kompozisyonunda istenmeyen elementlerin oksitlenerek giderilmesi sağlanmaktadır. Tesisten pota ile sahaya getirilen sıvı haldeki curuf, üzerine kontrollü olarak soğutma suyu verilir. Katılaştıran sıvı haldeki curuf kristalleşip katılaştıkça gri ve gözenekli bir yapıya sahip olur. (şekil 3.7, şekil 3.8) [15].



Şekil 3.7. Pota içindeki çelikhane curufu [16].

Fırınlarda çelik üretim süreci sırasında pik demir içerisinde yüksek miktarda S, Si, P ve C bulunduğundan sert ve kırılabilir durumdadır. Yüksek fırındaki pik demirin mukavemetini ve işlenebilirliğini artırıp çelik malzeme elde etmek için çelikhane konveyör (sıvı sıcak pik demir) içerisine oksijen üflenerek istenmeyen elementleri oksitleme yolu ile giderilmesi gerekmektedir. Konvertöre hammadde olarak sıcak metal ve hurdanın yanı sıra yardımcı hammadde olarak da yanmış kireç (CaO), kireçtaşı (CaCO_3), dolomit [$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$] gibi curuf yapıcı flux malzemeleri ilave edilir. Meydana gelen oksitler flux malzemelerle birleşerek ergimiş haldeki curufu oluştururlar ve yoğunluk farkından dolayı konvertör içindeki sıvı çeliğin üstünde yer alırlar. Çelikhane curufu konveyör içerisine üflenmiş oksijen sonucu istenmeyen C, S, P ve Si gibi elementlerle indirgenerek oluşan oksitli bileşenlerdir. Fiziksel olarak koyu gri renkte tene şekli köseli ve pürüzlü bir yüzeye sahip, yarıdan fazlası kireç (CaO) geri kalanı ise sıcak metal ve oksitli bileşiklerden oluşan bir malzemedir (şekil 3.8).



Şekil 3.8. BOF Curufu ve içindeki demir parçaları (skal)

Demir-çelik fabrikalarında curuf, potalar ile tumba tesisine taşınmakta, çelikhane curufu burada tumba edilmekte ve soğutulmaktadır. Curuf eleme ve değerlendirme tesisinde ise çelikhane curufunun içindeki demirli malzeme çelikhane hurda olarak kullanılmak üzere manyetik separatörler vasıtasıyla ayrıştırılmakta ve çelikhane curufu çeşitli ebatlarda elenmektedir. Mevcut durumda tumba edilen çelikhane curufu yeni çelikhane curufu stok sahasına dökülmektedir.

Curuflar yüzeyleri ince dikalsiyum silikat kaplı başlıca bileşen olarak CaO, MgO, SiO₂, ve FeO içerirler [13]. Düşük fosforlu çelik üretim pratiklerinde curuf içerisindeki toplam konsantrasyonları %90 civarındadır. Magnezyum, curufunun diğer önemli bileşenidir.

Demir çelik üretiminde sıvı ham demirin çeliğe dönüştürülmesinde oluşan BOF curufunun kimyasal bileşiminde genel olarak, başlıca %14-23 Fe, %3-15 SiO₂, %40-55 CaO, %3-6 MnO, %2-4 MgO, %0.95 max P₂O₅ bulunur. Demir çelik üretiminde, bu maddelerin arasında sadece fosfor olumsuzluk yaratabilir [8,13].

BOF (Bazik oksijen fırını) teknolojisi ile çelik üreten tesislerde literatüre göre 1 ton çelik üretimi ile çıkan curuf miktarı yaklaşık olarak 180 kg'dır.

Çizelge 3.1. Çelikhane curufu tipik kimyasal analizi

TFe	Met Fe	FeO	Fe ₂ O ₃	P	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	MgO	S	MnO	K ₂ O	TiO ₂	Na ₂ O
21.47	6.84	5.03	15.34	0.210	11.21	46.07	2.86	6.34	0.69	2.43	0.08	0.20	0.18

BOF Curufun Mineralojik Özellikleri;

BOF curufunun kimyasal kompozisyonu ve miktarı; konvertöre (BOF) şarj edilen hammaddeye, elde edilecek çeliğin cinsine ve işletme pratiğine göre değişiklik gösterir. Çizelge 3.2'de farklı çelikhane curuflarında sıklıkla oluşumu gözlenen fazlar verilmektedir (Shi, 2004).

Çizelge 3.2. Curufun içerdiği fazlar (Shi, 2004).

Fazlar	Kimyasal Formülü	Kısaltma
Mervinit	3CaO-MgO-2SiO ₂	C ₃ MS ₂
Alit	3CaO-SiO ₂	C ₃ S
Belit	2CaO-SiO ₂	C ₂ S
Rankinit	3CaO-2SiO ₂	C ₃ S ₂
Vollastonit	CaO-SiO ₂	CS
Diopsit	CaO-MgO-2SiO ₂	CMS ₂
Montiselit	CaO-MgO-SiO ₂	CMS
Tetrakalsiyum alüminoferrit	4CaO-Al ₂ O ₃ -Fe ₂ O ₃	C ₄ AF
Klasiyum Alüminat	CaO-Al ₂ O ₃	CA
Kalsiyum Ferrit	CaO-Fe ₂ O ₃	CF
Fosterit	2MgO-SiO ₂	M ₂ S
Sülfürlü Mineraller	CaS, MnS, FeS	-
RO Fazı	FeO-MnO-CaO-MgO	RO
Kireç	CaO	-
Periklaz	MgO	-
Diğer	FeO, Fe ₂ O ₃	-

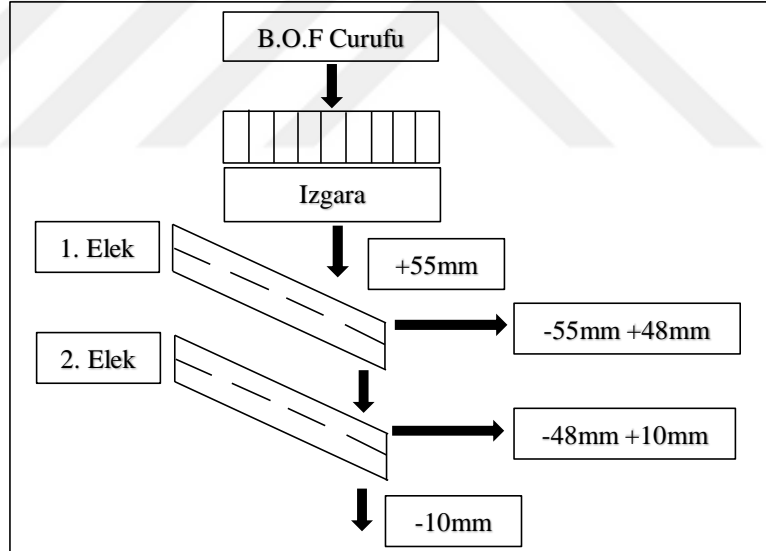
Demir-çelik tesisinde, çelikhane curufu içerisindeki demirli malzeme ilk aşamada 4 farklı aralığa (-11 mm, +10-48 mm, +48-55 mm, +55 mm) ayrılıp ayrı ayrı stoklanmaktadır [17].

Eleme tesisinde sınıflandırılan; +55 mm elenmiş demirli malzeme Çelikhane Hurda hazırlama tesisine taşınmakta ve kullanılmaktadır. +48-55 mm elenmiş demirli malzeme çelikhane hurda olarak kullanılabilir. +10-48 mm elenmiş curuf hurdası Yüksek Fırınlar tarafından parça cevher olarak kullanılmaktadır. -10 mm tane boyutundaki BOF curufu Sinter Harmanında demir cevheri olarak kullanılabilir. Donma-çözünme testleri için demir-çelik çelikhane curufu stok sahasından sondajlama usulü ile TS EN 1367-1 standardına göre kil zeminlerin iyileştirilmesi için 10 mm çelikhane curuf numuneleri alınmış ve testlerde kullanılmıştır.



Şekil 3.9. Çelikhane curufu numune alma.

Çelikhane curuf numuneleri %3, %6, %9, %12, %15 ve %20 oranlarında kil zemin numuneleri ile karıştırılıp donma ve çözünme deneyleri yapılmıştır. Şekil 3.9'da Sondajlama yaparak BOF curufu numune alma resimleri görülmektedir. Şekil 3.10'da curuf eleme akım şeması verilmektedir. Şekil 3.8'de numune yüzeyi sert kırılğan ve derine indikçe artan bir sıcaklık mevcut olduğundan, numune alma işlemi sırasında son derece dikkatli olunmalıdır.



Şekil 3.10. Curuf eleme akım şeması [18].

Metalurji tesislerinden elde edilen curuflar mevzuat gereği atık madde grupları arasından değerlendirilmektedir. Kiyasal yapısı ve özellikleri tesisin türüne, tipine ve üretim yöntemine bağlı olarak farklılık gösterir. BOF curufları başlıca CaO, MgO, SiO₂, ve FeO içermektedir. BOF curufları en basit olarak CaO-MgO-SiO₂-FeO dörütlü sistem olarak değerlendirilmektedir [19]. Çizelge 3.8'de deneylerde kullanılan BOF curufuna ait sınıflama ve kimyasal kompozisyonu yer almaktadır.

3.1.2. İskenderun Kil Numunesi

Killer doğada çokça bulunan bir malzemedir. Ancak kil malzemesini doğada saf olarak bulmak oldukça zordur. Kil yapı olarak içerisinde en fazla silis, mika, demir oksit mineralleri bulundurur. Başlıca 4 ana gruba ayrılır. Bunlar İllit, kaolinit, montmorillonit ve diğer kil gruplarıdır. Bileşiminde bulunan yabancı maddelerden dolayı sarımtırak, kırmızımtırak ve esmer gibi renklerde bulunurlar. Ayrıca killer su çekme özelliği ile Plastisite, kohezyon, renk ve rötre özelliği gösterir. Şekil 3.11’de kil numunesinin alındığı yeri göstermektedir.



Şekil 3.11. Deneyde kullanılan kil numunesi

Kil, hidratlı alüminyum ve magnezyum silikatlardan oluşan doğal bir ikincil mineraldir. Tane boyutu iki mikron veya daha küçüktür. Aynı boyuttaki başka minerallerden farklı olarak su ile karıştırıldığında çamur oluşturur. Her hangibir zemin kütlesi içinde az da olsa kil minerali içermesi o zemin kütlesinin mühendislik özelliklerini olumsuz birşekilde etkilileyebilmektedir. Zemin kütlesinin içerisinde kil miktarı arttıkça bağlı bulunulan kilin özelliğine göre zemin davranışı değişmektedir. (Önalp 2002) [25].

Doğada yaygın olarak bulunan killer, öncelikle tarım sektörünün temel taşı olmakla birlikte, pek çok endüstri dalında hammadde olarak kullanılmaktadır. İnşaat mühendisliğinde killerle temel mühendisliği, yapı malzemesi, baraj inşaatları, her türlü yapıda meydana gelebilecek kazı ve hafriyat çalışmaları gibi çok yaygın bir alanda karşılaşılmaktadır. Killerin doğal oluşum zorluğu nedeniyle sentetik malzemeler kil kapsamı dışında tutulur. Ayrıca çok miktarda organik madde içeren turba, bataklık çamuru ve bazı topraklar da kil kapsamı dışında tutulur. Organik maddeler kil içerisinde bulunabilir (Çetin, 2003) [26].

Zemin mekaniğinde zeminler kaba taneli ve ince taneli olmak üzere iki grup altında toplanır. Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemine (USCS) göre 0.075 mm tane çapı sınırı kaba ve ince taneli zeminlerin sınırı olup, 200 No'lu (<0.075 mm) eleğin altına geçen kısım ince taneli zeminler olarak adlandırılmaktadır. İnce taneli zeminler ise kil ve silt birimlerinden oluşmaktadır [26].

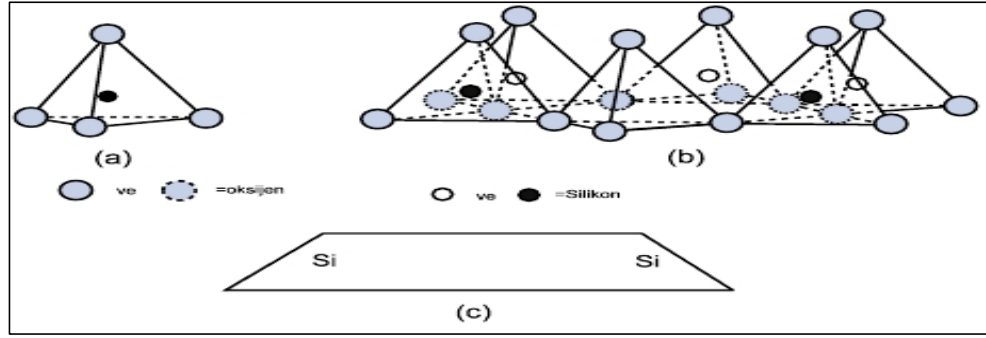
Kil zeminler ince taneli zeminlerdir. Fakat tüm ince taneli zeminler kohezyonlu veya kil olmak durumunda değildir. Siltler hem granüle hem de ince tanelidir. Kil taneciklerinde olduğu gibi münferit silt taneleri de çıplak gözle ayırt edilemezler; fakat, siltler kohezyonlu ve plastik değildirler. Çok ince taneli kohezyonsuz zeminlere bir diğer örnek de kaya unudur (Şengül, 2003) [26].



Şekil 3.12. Hatay/İskenderun bölgesi kil numunesi

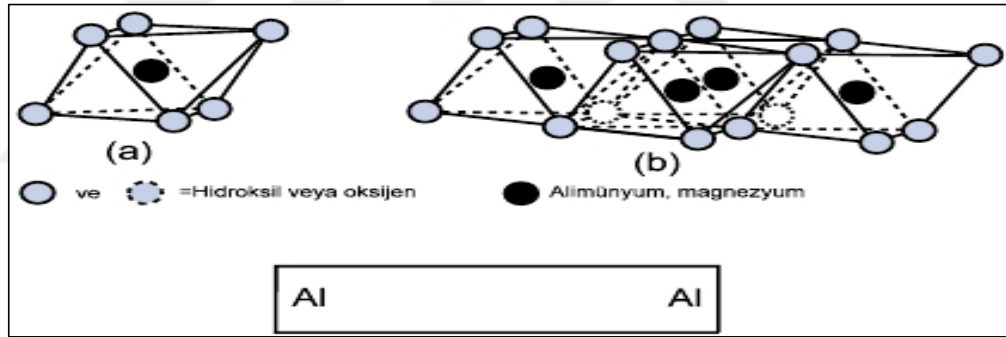
Şekil 3.12'deki kil numunesi, Hatayın İskenderun ilçesinden alınmış kil numunesidir. Kil numunesi yaş eleme yapılarak etüvde kurutulmuş ve tekrardan öğtme işlemi yapılarak. 200 nolu elek ile kuru olarak elenerek elek altı malzeme alınmıştır. Malzeme tekrardan etüvde kurutma işlemi yapılarak saf kil malzemesi elde edilmiştir. Çünkü kil malzemesi ortamsaki nemi alarak tekrardan topaklanıyor. Bu durumu önlemek için tekrardan etüv işlemi yapılarak şekil 3.12'deki kil numunesi elde ediliyor.

Kil mineralojisinde silis tetrahedron ve alüminyum veya magnezyum oktahedron olarak adlandırılan iki ana yapı bloğu vardır. Silis tetrahedron; 1 silis iyonu ile 4 oksijen atomunun birleşmesinden oluşan 4 köşeli, 4 yüzlü kristal bloğudur. Şekil 3.13'de silis tetrahedron ve tetrahedral tabaka gösterilmektedir (Holtz and Kovacs 1998) [25].



Şekil 3.13. Tetrahedron tabakası a) tetrahedron yapıtaşı b) silika tabakası c) silika tabakasının temsili gösterimi [26].

Alümina veya magnezyum oktahedron yapısı ise, merkezinde alüminyum iyonu, köşelerde oksijen ya da hidroksil iyonları bulunan düzgün sekizyüzlü şeklindedir. Düzgün sekizyüzlülerin birer yüzeyleri aynı düzlem üzerinde kalacak şekilde köşelerinden birleşmesiyle “oktahedron tabakası” ya da diğer adıyla “alümina tabakası” oluşmuştur (şekil 3.14).



Şekil 3.14. Oktahedron tabakası a) oktahedron yapıtaşı b) alümina tabakası c) alümina tabakasının temsili gösterimi [26].

Kil malzemesi plastisite teorisine göre, ezilmiş kile uygun miktarda su karıştırıldığı zaman işlenebilme ve şekillendirme özelliği kolaylaşır. Böylece kil kolayca şekil alır. Örneğin, un su ile karıştırıldığı zaman işlenebilir ve şekillendirilebilir. Kilin plastisite özelliği kazanabilmesi için muhakkak surette su ile karıştırılması gereklidir. Su dışında hiçbir madde kile plastisite özelliği kazandırmaz. Büzüşme (Rötre) özelliği ise, kil su ile yoğrulup şekillendikten sonra kurumaya terk edilirse şekillendirme sırasında verilmiş olan ölçüleri küçülür. Diğer bir değişle kil hamurunun kuruma sırasında hacmi küçülür. Bu olaya kilin rötre yapması denir [22].

Toprakların kil mineralleri kristalleri sık sık homojen olmayan, değişken bir tabaka sıralaması gösterirler. Böyle minerallere değişken tabakalı mineraller denir. Bunların içinde, değişken tabakalar farklı oranlarda düzenli veya düzensiz bir şekilde birbirlerini izleyebilirler. Elektron mikroskopta da ince kesitlerde tabaka yüzeyine dik olarak bu şekilde düzenli ve düzensiz değişken tabakalaşmalarda, bir tarafta klorit veya illit diğer tarafta da vermikulit ve smektit bulunur ki bunlar çoğunlukla klorot ve illitin kısmi ayrışması sonunda ortaya çıkarlar. Kaolinit ve smektit arasında da değişken tabakalaşma görölmektedir (Uğur 2005) [25].

Zemin mühendisliği bakımından önemli olan kil mineralinin özellikleri çizelge 3.3’de verilmiştir.

Çizelge 3.3. Kil minerallerinin özellikleri (Angın 2005)

Özellik	Kaolinit	İllit	Montmorillonit
Büyükük (mm)	100-5000	100-2000	10-1000
Kalınlık (mm)	50-2000	30	3
Özgöl yüzey (m ² /g)	5-20	100-200	700-800
Kohezyon	Düşük	Orta	Yüksek
Hacim değiştirme özelliği	Düşük	Orta	Yüksek
Kasyon değiştirme kapasitesi (cmol/kg)	3-10	15-40	80-120

Çizelge 3.3’de göröldüğü üzere kil mineralinin özgöl yüzeyleri büyük olup su tutma kapasiteleri de fazladır. Killi bir zeminin şişme kapasitesi, zemin içerisindeki kil mineralinin miktarı ve tipine, kil partiküllerinin yüzey alanlarına ve partikülleri çevreleyen zemin suyunun kimyasına bağlıdır (Angın 2005).



Şekil 3.15. Şişen zeminlerin oluşturduğu ve donma-çözünmenin verdiği zararlar

Kil, yapısı itibarıyla su çekme özelliği, plastisite, kohezyon, renk, rötre özelliklerinden dolayı şişme, kabarma ve çatlamalara neden olmaktadır. Şekil 3.15’de çevresel etmenlerden, mevsimsel donma-çözünme, zeminin killi yapısı, zeminin tabakalaşma yapısı ve hareketliğe karşı duyarlılığı ve benzeri gibi pek çok etmin doğal sonucu olarak ortaya çıkan tahribat resmedilmektedir. Çalışmamızda Hatay’ın İskenderun bölgesindeki killi zeminin kabarma miktarı ve donma-çözünme sonrası etkilerinin BOF curufunun çeşitli oranlarda katıldığında bu çevresel etkinin ve killin verebileceği kötü etkilerin en aza indirip indiremeyeceğinin araştırılması hedeflenmiştir. Bu sonuçlara göre, bu killi zemine İsdemir A.Ş Çelikhane curufunun belirli oranlarda katılarak, bir dizi testler yapılması planlanmıştır. Bu testlerin sonucunda çelikhane curuflarının İskenderun’un killi zeminine olumlu sonuç verip vermeyeceği araştırılmak istenmiştir.

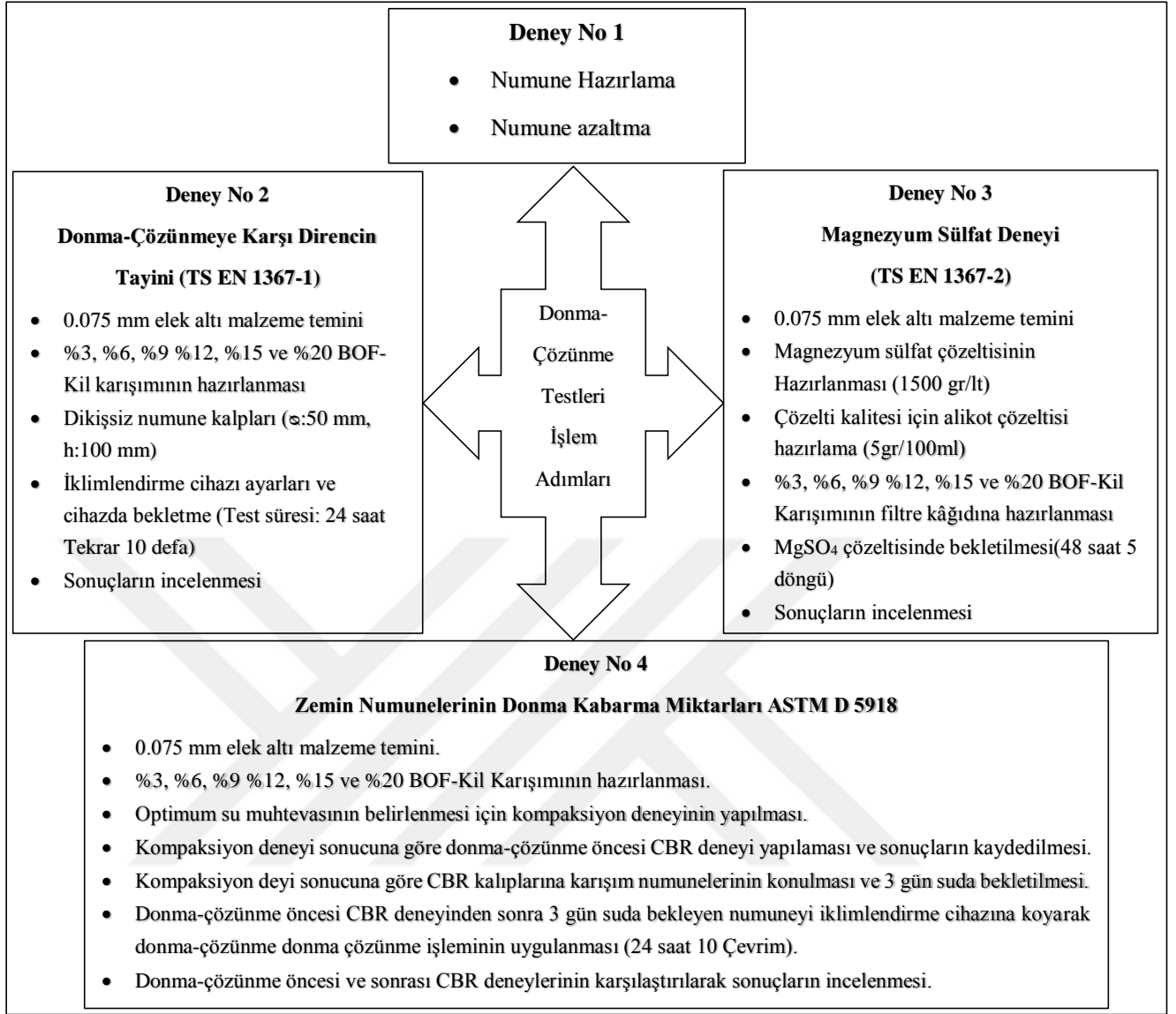


Şekil 3.16. Beton malzemenin zamanla donma-çözünme sonucu tahribatı

Mevsimsel donma-çözünme sadece zemine değil betonarme ve çelik yapılarda zarar vermektedir. Şekil 3.16’da yıl içinde havanın, sıvının ve zemin kabarmaların vermiş olduğu zarar resmedilmiştir. Gün içinde hava sıcaklığının düşmesi ve artması sıcaklık farkını doğurur. Bu fark ise, içsel gerilmeleri arttırır ve bu da yapıya zarar verir [22,23]. Şekil 3.15 ve şekil 3.16’da bu olay resmedilmiştir.

3.2. Yöntem

Bu çalışma kapsamında yapılacak olan deneyler, donma-çözünme şartlarına deneysel bir çözüm katmak için zemin numunelerinin deney standartlarına uygun olarak hava ortamında donma-çözünme, zemin kabarma miktarının ölçülmesi ve Magnezyum sülfat çözeltisine maruz bırakılmak istenilmektedir. Bu ortamı hazırlamada en uygun deney standardı olan; “Zemin Numunelerinin Donma Kabarma Miktarları ASTM D5918”, “Agregaların Donma-Çözünme deneyi, Donmaya ve Çözünmeye Karşı Direncin Tayini TS EN 1367-1” ve “Magnezyum Sülfat Deneyi TS EN 1367-2” deneyleri yapılacaktır. Ancak bu deney yöntemlerinin her birinin kendi içerisinde bağlı deneyleri bulunmaktadır. Örneğin, ASTM D 5918 deneyin yapılması için CBR deneyinin yapılması, CBR deneyinin yapılması içinde kompaksiyon deneyinin (Zemin Numunesinin ve Zemin-BOF karışımlarının optimum su muhtevasını belirlemek için) yapılması gerekmektedir. Daha mühim olanı ise donma-çözünme döngüsünün nasıl işlediğini bilmek gerekir. Çünkü gerek zeminlerin kabarması, gerek mevsimsel donma-çözünmenin beton ve zemin numunelerinde aşınmalardan kaynaklanan (şekil 3.17 ve şekil 3.16) yapı hasarlarının tahmininde izlenecek yol olmasıdır. Diğer iki deney standardında (TS EN 1367-1 ve TS EN 1367-2) ise bulunan sonuçların donma-çözünmeden bağlı olan aşınmaların tahmininde, çevre ve iklim şartları tablosu üzerinden değerlendirilerek bulunan sonuçların oluşturulan karışım oranlarının, hangi çevre ve iklim şartında değerlendirilmesi uygun olabilir tahminlerinin yapılması planlanmıştır. Şekil 3.17’de yapılacak olan deneylerin yol haritası oluşturulmuştur.



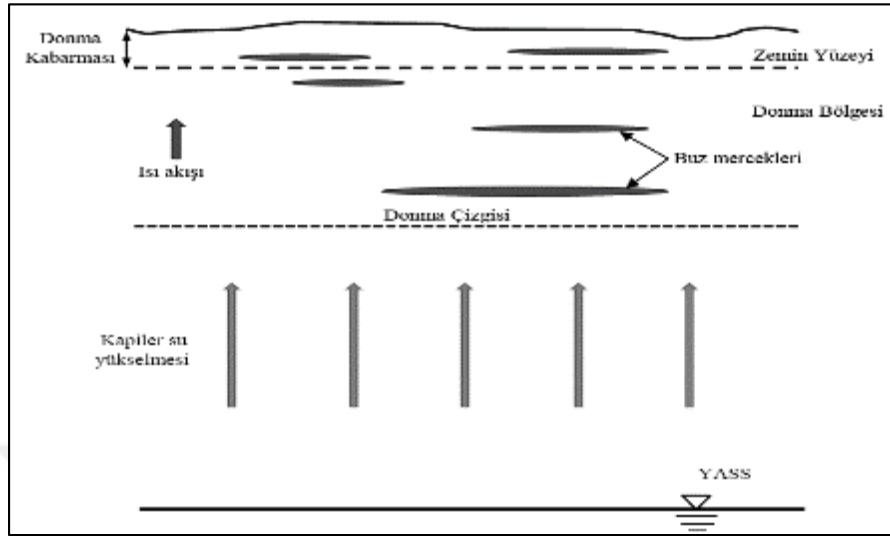
Şekil 3.17. Donma-çözünme işlem adımları

3.2.1. Zeminlerde Donma Olayı

Donma olayı, soğuk iklim koşullarının hâkim olduğu bölgelerdeki zeminlerde donma kabarması meydana getirmektedir. Ülkemizde ve dünyadaki birçok bölgede soğuk iklim şartlarının hâkim olduğu düşünülürse zeminlerde donma olayı mühendislik uygulamaları bakımından önem kazanmakta, özellikle altyapıdan üst yapıya kadar hemen hemen bütün yapıları olumsuz etkilemektedir.

Donma olayı sonucunda oluşan kabarma, zemin içerisinde bulunan suyun donma sıcaklığında sıvı durumdan katı duruma geçerken hacminin artması sonucunda meydana gelmektedir. Taber (1929), zeminlerde oluşan donma kabarmasının sadece zemin

içerisinde bulunun sudan kaynaklanmadığını, zemin içerisine donunca hacmi azalan başka bir sıvı koyarak göstermiştir.



Şekil 3.18. Donma kabarmasının şematik olarak gösterimi (Mitchell, 1976).

Donma kabarması hava sıcaklığı donma sıcaklığına düştüğü zaman zemin yüzeyine yakın bölgedeki suyun buza dönüşmesiyle oluşur. Zemindeki donmamış olan serbest haldeki su kapileritenin de etkisi ile zemin yüzeyine doğru hareket etmekte ve donmuş bölge diye adlandırılan bu bölgede buz mercекlerinin artmasına sebep olur (Mitchell, 1976). Donma kabarmasının şematik gösterimi şekil 3.18'de de görüldüğü gibi buz mercекlerinin hacmi ısı akışı ve kapiler su yükselmesinin etkisi ile artarak kabarma meydana gelmektedir [20].

3.2.2. Zeminlerin Donma Hassaslığının Belirlenmesi

Donma olayı sonucunda meydana gelen buz mercекleri çözünme sonrası zeminin daneler arasındaki dizilimini ve dolayısıyla boşluk oranını değiştireceğinden zeminde deformasyonlar ve buna bağlı olarak mukavemet kaybı meydana gelebilmektedir. Bu koşulların herhangi birinin değişmesi ile donma olayı önemli ölçüde etkilenebilmektedir.

Zeminlerin donmaya karşı hassaslığını belirlemek için çeşitli araştırmacılar tarafından geliştirilen iki farklı sınıflandırma bulunmaktadır (Konrad, 1999). Birincisi; dane çapı boyutu, mineralojik yapısı, kil içeriği, su tutma kapasitesi, ve permeabilitesi gibi geliştirilmiş yöntemlerdir. İkincisi; laboratuvarında veya arazide yapılan testler ile

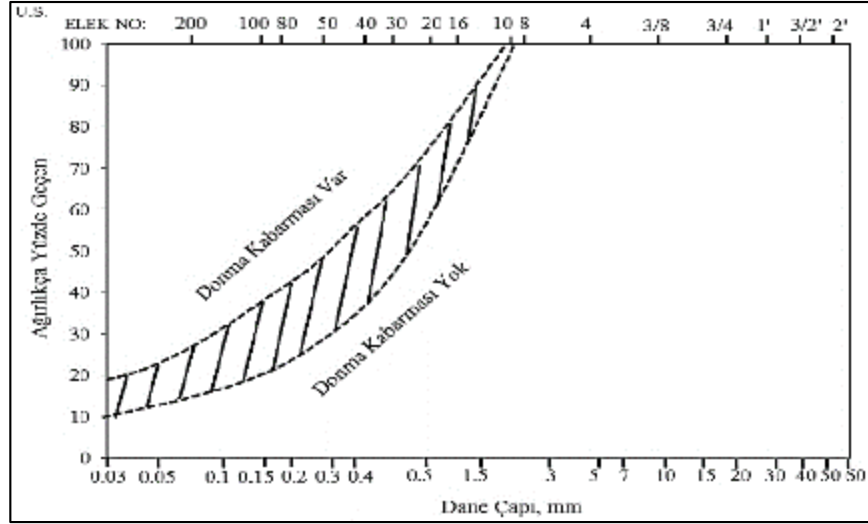
belirlenen donma kabarma hızına göre yapılan sınıflandırmadır. Bu yöntem aşağıda özetlenmiştir [20].

3.2.2.1. Dane çapı dağılımına göre donma hassaslığı

Zeminlerin donmaya karşı hassaslığını dane çapı dağılımına göre sınıflandırma yöntemi ilk olarak Casagrande (1929) ve Beskow (1935) tarafından yapılmıştır. Casagrande arazide ve laboratuvarında yaptığı çalışmalar sonucunda zeminin donma hassaslığını aşağıdaki gibi üç aşamada değerlendirmiştir. Donma için uygun koşulların donma sıcaklığı ve yeterli miktarda su olması durumu için;

- 1) Üniorm olmayan zeminlerde 0.02 mm'den küçük dane çapı oranının ağırlıkça %3'ten büyük olması durumunda zeminde buz merccklerinin oluşacağını,
- 2) Üniorm zeminlerde ise 0.02 mm'den küçük dane çapı oranının ağırlıkça %10'dan büyük olması durumunda zeminde buz merccklerinin oluşacağını,
- 3) Zeminde 0.02 mm'den küçük dane çapı oranının ağırlıkça %1'den az olması halinde zemin tamamen suya doygun olsa bile buz merccklerinin oluşmayacağını göstermiştir.

Dane çapı dağılımı açısından zeminlerin donmaya karşı hassaslığının belirlenmesi amacıyla Beskow (1935) tarafından yapılan diğcr bir çalışmada ise dane çapı dağılımı ile donma hassaslığı arasındaki ilişki grafik olarak verilmiştir. Şekil 3.19'da verilen grafikte donma hassaslığı çeşitli karışımlar kullanılarak hazırlanan zemin numuneleri ile belirlenmiştir. Şekilde görüldüğü üzere numunelerin donmaya karşı hassaslığı donma kabarmasının olup olmadığına bakılarak belirlenmektedir.



Şekil 3.19. Dane dağılımına göre donma hassaslığının belirlenmesi (Beskow, 1935).

Freitag ve McFadden (1997) zeminlerin donmaya karşı hassaslık kriteri dane çapı dağılımına göre şekil 3.19’da göstermiştir. Dane çapı 0.02 mm’den küçük olan malzemenin ağırlıkça %3’ten fazla olması durumunda zeminlerin donmaya karşı hassas olduğu belirtilmiştir. Fakat killi zeminler tam tersine düşük permeabiliteye sahip olduklarından donma kabarması buz mercleklerinin oluşumuna bağlı olarak yavaş ve düşük seviyelerde olur [20].

Çizelge 3.4. Zeminlerin donmaya karşı hassaslık kriteri (Freitag ve McFadden, 1997).

Donmaya Karşı Hassaslık Grubu (Artarak)	Zemin Cinsi	Dane Çapı 0,02 mm'den Büyük Danelerin Ağırlıkça Yüzdeleri (%)
Donmaya Karşı Hassas Değil	Çakıl, Kırma Taş Kum	0-1.5 0-3
F1 (düşük)	Çakıllı zeminler	3-10
F2 (orta)	Çakıllı zeminler Kumlar	10-20 3-15
F3 (Yüksek)	Çakıllı zeminler Kumlar (çok ince siltli kumlar dışında) Killer, $I_p > \%12$	> 20 >15 ---
F4 (Çok Yüksek)	Tüm siltler Çok ince siltli kumlar Killer, $I_p > \%12$ Diğer killer	--- >15 --- ---

3.2.2.2. Donma kabarma hızına göre hassaslık

Birim hızda birim zamanda meydana gelen zeminlerin donma kabarmaya karşı hassaslığını belirlemede büyük önem taşır.

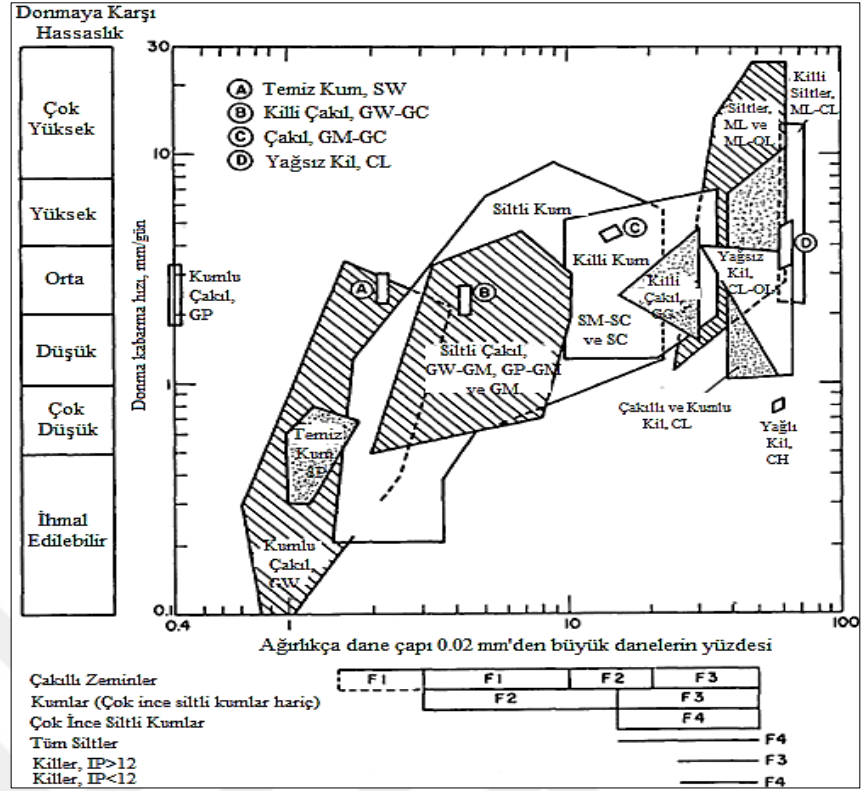
Çizelge 3.5’de zeminlerin donma hassaslığı kriterlerine göre hazırlanmış deney sonuçları verilmiştir. Tabloda da belirtilen killi zemin numunelerinin donmaya karşı hassaslıkları F1, F2, F3 ve F4 olarak adlandırılmış ve donmaya karşı hassaslıkları ise F1’den F4’e doğru artacak şekilde sınıflandırılmıştır:

- F1 grubu çakıllı zeminler, düşük donma hassaslığı içerir ve genel olarak düşük donma kabarma davranışı gösterdiğinden dolguda kullanılması için uygundur.
- 0.02 mm dane çapından küçük zemin numuneleri için (F2 grubu kumlu zeminler) donma hassaslığı düşüktür.
- F3 ve F4 grubu kumlar, çok ince siltli kumlar ve killerin donma hassaslığı F1 ve F2 gruplarına göre daha hassas ve orta derecede hassas olarak adlandırılırlar. Plastisite indisi 12’den büyük ve küçük killer ve siltler ise diğer zemin gruplarına göre daha yüksek donma hassaslığına sahiptir.

Çizelge 3.5. Laboratuvar deneylerine göre donmaya karşı hassaslık sınıflandırılması (Freitag ve McFadden, 1997).

Donma Kabarma Hızı (mm/gün)	Donmaya Karşı Hassaslık
0.0-0.5	İhmal Edilebilir
0.5-1.0	Çok Düşük
1.0-2.0	Düşük
2.0-4.0	Orta
4.0-8.0	Yüksek
> 8.0	Çok Yüksek

Freitag ve McFadden (1997) laboratuvarında 152 mm yüksekliğinde hazırlanmış silindirik numuneler üzerinde yaptığı açık sistem donma-çözünme deneyleri ile numunelerin donma kabarma hızlarını belirleyerek bir sınıflandırma kriterini çizelge 3.5’de görüldüğü üzere geliştirmiştir. Numuneler boyuna olarak yukardan aşağıya doğru ve günde yaklaşık olarak 6.3 mm’lik donma derinliğine göre donmaya maruz bırakılmıştır.



Şekil 3.20. Donma kabarma hızlarına göre hassaslık sınıflandırılması (Kaplar, 1974).

3.2.3. İklimlendirme Cihazı

Deneylerde Nüve ID 300 Klimatik test kabini kullanılmıştır. ID 300 Klimatik Test Kabini; elektronik, otomotiv ve otomotiv yan sanayi, havacılık, kimya, plastik, tekstil, ilaç, inşaat malzemeleri, gıda, ambalaj ve askeri ekipman üretimi gibi pek çok farklı sektörde ihtiyacı karşılamak üzere üretilmiştir. Cihazın bir takım teknik özellikleri aşağıdaki gibidir [11]. Cihazın görünümü şekil 3.21'de yer almaktadır.



Şekil 3.21.ID 300 Klimatik test kabini [11].

Cihazın Özellikleri

- Kullanılır hacim: 290 l.
- Çalışma sıcaklığı aralığı: $-40^{\circ}/150^{\circ}$
- Nemli ortam ayarı: %15 Rh/%98 Rh arası 90°C ile 10°C sıcaklık arasında
- Rakım ayarı: 0/2000 m
- 1000 saate kadar kesintisiz çalışma imkânı (0-999 saat 59 dakika)
- Ayarlanan setleri 1-99 kez tekrarlama ayarı mevcut (1-99 kez program tekrarı)
- Belirlenen sıcaklık değerleri arasında döngü sağlama (PID kontrol ile ısıtma, oransal kontrol sistemi ile soğutma)
- Hava sirkülasyonu, sıcaklık, nem dağılımı ve kararlılığı
- Optimum nem ve doğruluk sağlayan Psikrometrik diyagram özelliği
- Mikro işlemcili kontrol sistemi ile 10 program hafızalı
- 9 basamaklı sıcaklık ve nem ayarı
- Pt 100 sıcaklık hissedicisi ile numuneden ve hücreden sıcaklık ölçümü yapabilme.

3.2.4. Etüv Cihazı

Etüvler son zamanda çok kullanılan, çalışma sıcaklığı 100°C ile 200°C arasında, cihaz çalışma sıcaklık ayarı 50°C- 250°C arasında çalışılan bir alettir. Marka model ve ebatlarına göre 100°C kadar hassasiyet salınımları 10-15°C kadar çıkabilir. Etüv cihazları çeşitlilik yönünden oldukça geniş bir alana sahip olduğu gibi inkibatör ve kuru hava sterilizatörü anlamında kullanılırken sıcaklık ayarı, belirli sıcaklıkta kurutma, mikrop üretme ve dezenfekte veya sterilizasyon gibi amaçlarla kullanılabilen bir alettir.



Şekil 3.22. Etüv cihazı (İSTE Geoteknik laboratuvarı)

Yaş eleme sonucu elde edilen kil malzemesi 24 saat +105°C sıcaklıkta şekil 3.22'deki etüv cihazında bekletilmektedir. Etüvde bekleyen malzeme şekil 3.12'deki gibi sert ve kırılğan hale gelir. Bilyeli öğütme sonucu 200 No elekten geçen malzeme odadaki rutubetin alınması için tekrardan etüv cihazına konur. Aynı işlem çelikhane curufu (şekil 3.8) içinde yapılmalıdır. Nem ve topaklanmanın etkisiyle curuf malzemesi etüvde (şekil 3.22, 24saat +105°C'de) kurutulup nemi alındığı zaman elle ufalanarak 100 Nolu ve 200 Nolu elekten rahatça geçmektedir.

3.2.5. Numune Kapları

Deney de kullanılacak numune kapları çekme demirden yapılmış ya da sızdırmaz çapaksız kaynaklı bir yapıya sahip kapaklı kaplardır. Çapları (Ø) 50 mm yükseklikleri (h) 100 mm iç yüksekliğine sahiptir.



Şekil 3.23. Numune kapları.

Numune kapları donma-çözünmeye karşı direncin tayini (TS EN 1367-1) deneyi standardına uygun olarak özel hazırlanmıştır. Numuneler kabın içinde iklimlendirme cihazında iken herhangi sıvı veya madde giriş-çıkışına izin vermemelidir. Ayrıca cihaz iklim koşullarını taklit ettiğinden hava akımı oluşturmakta bu yüzden kutu içinden kütle kaybı olmaması için kapakları kapalı olduğu ve işretleri şekil 3.23'deki gibi kontrol edilmeli ve belirli bir aralıklarla yerleştirilmelidir.

3.2.6. Numune Alma (TS 707) ve Elek Analizi (TS EN 933-1)

Bu çalışmada, gerekli numune ve standarda uygun malzemeler hazırlamak için, İskenderun'dan alınan killi zemin numunesi Türk Standartları (TS) 707 ve TS EN 933-1 uygun olarak hazırlanmıştır.

3.2.6.1. TS 707' ye Göre Agregalardan Numune Alma

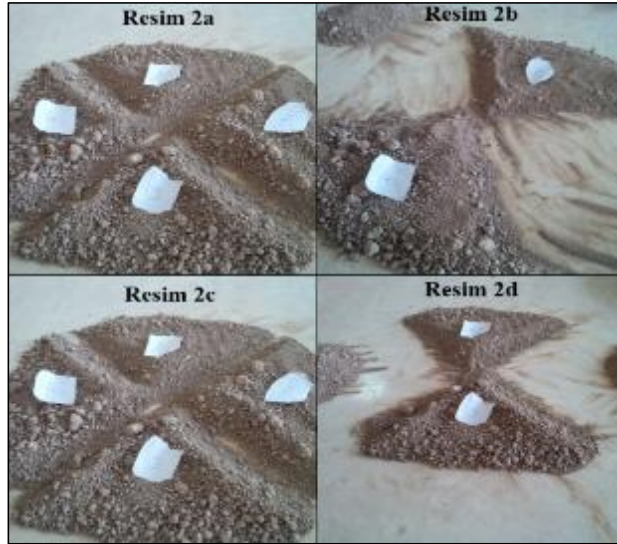
Depolardan, stoklardan, laboratuvar kaplarından veya agrega ocaklarında numune alma/seçme;

- Deneyde kullanılacak agrega hacmi projedeki alan hacminden yaralanılarak tahmini olarak seçilir.
- Agregta ocaklarından numune alma derinliği belirlenerek toplam numune miktarı işletme derinliğine bölünerek malzemenin sağlanacağı yerin toplam alanı bulunabilir. Yerin geometrisine bağlı olarak en/boy hesaplanabilir.
- Dörtgen şekilli yüzeyin olması halinde köşelreden 4, kenar oralarından 4, kenar ortayın kesişiminden 1 tane olmak üzere malzeme stoğunun veya yığınının 1 kez alt ve 1 kez üst olacak şekilde (herdefasında 1/3) 18 noktadan numune alınır.
- Numune alınacak alan dikdörtgen değil ise dörtgen kabul edilerek işlem tekrarlanır.

Yukarıdaki işlemler yığın toprak numunesi veya benzeri kütle yığınlarına da uygulanabilir. Toplanan malzeme ince daneleri kaybolmayacak şekilde nemlendirilir veya kurutulup iyice karıştırıldıktan sonra otomatik bölücü yardımı veya kareleme dörtleme yöntemi ile numune azaltır.

3.2.6.2. Kareleme Yöntemi

Laboratuvar çalışmalarında da fiziksel ve kimyasal analiz için kullanılacak malzelerden TS Enstitüsü standartlarına 5000 g, 4000 g, 2000 g ve 1000 g numune üzerinde çalışması istenilir. Bu numuneler malzemenin kaynağında yada laboratuvar alanında kümelenmiş yığınlardan getirilen numunelerden kareleme/dörtleme yada bölgeç ile otomatik olarak azaltılır. Kareleme/dörtleme yönteminde malzeme krutulduktan sonra temiz ve düz bir zemin üzerine serilerek yaklaşık bir daire olacak şekilde 0.5 cm kalınlıkta serilir. Splatula veya elle yaklaşık olarak daire kenarından ve merkez noktalardan geçecek şekilde iki eşit parça bölünüp daha sonra bu çizgiye dik gelecek şekilde ikinci bir merkez çizgi çekilerek 4 eşit parçaya ayrılır (şekil 3.24). İstenen miktar elde edilinceye kadar işlem tekrarlanır. Bu yöntemle azaltılan numune öğütücülerden geçirilerek, yaş yada kuru eleme ile 75 µm altına inecek kadar küçültülür.



Şekil 3.24. Kareleme dörtleme yöntemi ile numune azaltma

Killi zemin veya agreganın yığınının kenarından merkezi referans alınarak iki eşit parçaya bölünüp bu ayrığa dik yeni bir bölüntü yapılarak yaklaşık 4 eşit parçaya bölündü. Bu bölüntünün karşılı parçaları olan iki çeyrek parça (1-3 veya 2-4) temilenecek yada

ayrılarak yeni bir dairesel serme işlemi yapıp yine oluşturulan yığında dörde bölünüp (1.'de 1-3 alınmış ise 2.'de 2-4 alınır.) diğer karşılıklı iki parçası alınarak numune istenilen miktara ve azaltama işlemi tamamlanmış olur. Deney yapmak üzere malzeme kablara alınır (şekil 3.24).

3.2.6.3. Eleme Yöntemi TS EN 933-1

Elek analizi yapılacak malzemelerin boyutları taş ve kömür gibi birçok büyük parçalardan, boya maddeleri ve kil gibi birçok ince malzemelere kadar değiştiği, fiziksel ve kimyasal özellikleri farklı olduğu için, bütün malzemelere uygulanabilecek tek bir elek deneyi yönteminden bahsetmek mümkün değildir. Bunun için geliştirilmiş Astm veya Türk standartlarının (TS) belirlediği elekler veya temel elek serileri kullanılır. Bu elek tipleri kullanılacak alana göre değişiklik arz etmektedir. Bu yüzden gerek beton gerek zemin çalışmalarında bu temel elek serileri kullanılmaktadır.



Şekil 3.25. İSTE Geoteknik laboratuvarı elek serisi

Şekil 3.25'de İskenderun Teknik Üniversitesi Geoteknik laboratuvarında kullanılan elek serisini göstermektedir. Bu eleklerle yaş ve kuru eleme işlemi standartlara uygun olarak yapıldı ve sonuçları çizelge 3.7'ye uygun olarak hesaplanıp çizelge 3.9'da gösterildi.



Şekil 3.26. Islak elek analizi yöntemi

Eleme işlemi numune alma ve numune azaltma işleminden sonra yaş eleme yapılarak çizelge 3.9'da ki sonuçlar elde edilmiştir. Eleme işlemi 4 kg zemin numunesi kareleme dörtleme (şekil 3.26) yapılarak 1 kg'a indirilmektedir. Zemin numunesi elek serisinden tek tek (şekil 3.26 resim 3c) su altında yıkanarak (şekil 3.26 resim 3b) geçirilmiştir. Her bir elekte kalan numuneler ayrı kaplara alınmış ve etüvde 24 saat kurutma işlemi yapılmıştır. Her eleğin numunesi tartılarak çizelge 3.9'a kaydedilmiştir.

Kil malzemenin elde edilmesi için ise 0.075 mm altı elekten geçen yaş malzeme kovalarda bekletilerek dinlendirildi ve altta kalan kil malzemesi etüvde kurutularak tekrardan öğütülerek 0.075 mm elek altına geçmesi kuru olarak sağlandı. Çelikhane çurufunun eleme işlemi ise çelikhane çurufu etüvde kurutularak öğütüldü ve 0.075 mm elek altına geçmesi kuru eleme yapılarak sağlandı.



Şekil 3.27. Yaş kil numunesinin etüv sonrası ve öğütülerek (0.075 mm) kuru elek altı malzemesi (İSTE Geoteknik Lab.)

Çizelge 3.6. Agrega tane sınıfların belirtilmesinde kullanılan elek göz açıklıkları (TS 706)

Temel Elek Serisi (mm)	Temel +1 Elek Serisi (mm)	Temel +2 Elek Serisi (mm)
0	0	0
1	1	1
2	2	2
4	4	4
-	5.6	-
-	-	6.3
8	8	8
-	-	10
-	11.2	-
-	-	12.5
-	-	14
16	16	16
-	-	20
-	22.4	-
31.5	31.5	31.5
-	-	40
-	45	-
63	63	63

Eleme deneyi standart göz açıklıklı elek dizisinden veya elekten yaş veya kuru olarak yapılır. Eleme işlemi elenen malzeme granülometrisi hakkında bilgi vermelidir. Standarda uygun olarak deneyde yada alanda kullanılacak malzeme için d/D (d =alt, D =üst elek göz açıklığı) kullanılarak malzeme karakteristiği belirlenir. Bulunan değerler oluşturulan metalürjik denge çizelgesinde yerine yazılarak malzeme verimi takip edilir. Kullanılan elek standart tipleri çizelge 3.6 da verilmiştir (TS 706).

Deneylerde kullanılacak numuneler kaplara alınarak etüvde ($110\pm 5^\circ\text{C}$) kurutulur. Deneyde kullanılmayacak numuneler malzeme kaybını önlemek için ıslatılır. Biz deneyimizde işlemleri üç kez tekrarlayacağımız için elediğimiz numuneyi (killi zemin numunesini) üç ayrı kaba alarak sınıflandırdık. Deneyde kullanılacak numune gerekli işlemlerden geçirilerek tane sınıflandırması yapıldı.

Biz deneyimizde kil numunesi elde etmek için İskenderun killi zemin numunesini yaş eleme yaparak $75\ \mu\text{m}$ altı numune oranını tespit ettik. Deney numunesi eleklerden rahat geçebilmesi için bir kova içerisine yerleştirilen numune su ile karıştırılarak sılam haline getirildi. Malzeme bu halde iken sırası ile 2.0 mm, 1 mm ve 0.5 mm göz aralıklı eleklerden geçirilerek elek altı malzeme dinlenme ye bırakıldı. Dinlenen elek altı

malzemenin altında kalan kil alınarak etüv cihazında kurutuldu (şekil 3.32). Etüvden çıkarılan bu malzeme M_2 olarak kayıt edildi. Eleme işleminden önceki ilk ağırlığı M_1 'dir.

75 μm malzemenin elekten geçen ince tanelerin yüzdesini hesaplamak için aşağıdaki formül kullanılır.

$$f = \frac{(M_1 - M_2) + P}{M_1} \times 100 \quad (1)$$

Burada;

f : elekten geçen malzemelerin % miktarı.

M_1 : eleme işlemine tabi tutulacak malzemenin ilk ağırlığı(kuru)

M_2 : 75 m altı elekten geçen malzemenin kuru ağırlığı

P : elek üstü malzeme kütlesi

Standar numune eleme işleminde elekler üzerinde malzeme bırakılmamalı her elek ayrı ayrı temizlenip ilgili tane sınıfı kabına konularak tartılır. R_i 'den – R_n 'e kadar sınıflandırılır ve ilgili formda yerine yazılır.

Çizelge 3.7. Tane büyüklüğü dağılım formu örneği.

Elek göz açıklığı (mm)	Elek üstü fraksiyon kütlesi(R_i) gr	Elek üstü fraksiyon yüzdesi (%) (R_i/M_1)x100	Elek üstü Kümülatif yüzdesi (%) (R_i/M_1)x100	Yıkama ile atılan ince tanelerin kütlesi(M_1-M_2)
63				
31.5				
16				
8				
4				
2				
1				
0.5				
0.25				
0.125				
0.063				
-				
Tavadaki Fraksiyon Kütlesi (P)				
0.063 mm elekten geçen ince malzemelerin kütlesi(f) (%)			$\{((M_1-M_2)+P)/M_1\} \times 100$	
$\sum R_i + P$				
100(M_2($\sum R_i + P$)/M_2)			<%1	

Laboratuarda boyut dağılımını belirlemek amacıyla numune elek açıklıkları birbirinden farklı olan bir dizi standart elekten geçirilir. Tane sınıflandırma işleminden büyük elek açıklıklı elekten başalayarak standarttaki en küçük gözenekli elek olacak şekilde sıralanarak numuneler yaş veya kuru olarak elek dizisinden geçirilir. (Saklara ve Diğ., 2000)

Endüstride en çok kullanım alanı bulan bu yöntem basitliği, masrafsız olması ayrıca mazlemenin tane fraksiyonlarına rahatlıkla ayrılması nedeni ile 38 μm 'ye kadar olan iri boyutta standart elekler kullanılır.

3.2.6.3.1. Elle Eleme

Laboratuvarda yapılacak numune eleme işlemlerinde çokça kullanılan yöntemdir. 38 μm 'den iri tanelerin fraksiyon sınıflandırılması için kullanılabilir.

3.2.6.3.2. Ro-Tap (sarsak) ile Otomatik elem İşlemi

Laboratuvar ve büyük ölçekli çalışmalar için oldukça pratik ve hızlı bir yöntemdir. Daha çok 6 mm ve 38 μm arasındaki malzemeleri için kullanılır. Belirlenmiş temel elek serileri sarak üzerine konularak ya da ASTM E11 standardınca belirlenen elekler "Ro-Tap" adı verilen cihazda 5 ile 20 dk. sürede sarsma yolu ile eleme işlemi gerçekleştirilir. (Elek Analiz Deney Föyü, İTÜ) [24].

3.2.6.3.3. (Islak) Yaş Eleme

Laboratuvar çalışmalarında ve endüstride çok ince malzemelerin (kil ve metal zenginleştirme gibi) eldesinde en çok kullanılan yöntemdir. Kil malzemesinin eldesi için kuru eleme işlemlerini takiben sıvı ile karıştırılarak ıslak ince eleklerden elenir. İşlem dikkat ve zaman isteyen bir işlemdir. Malzeme eleme işleminden sonra kurutulur ve gerekirse tekrardan ince eleme işlemine tabi tutulabilir. Bulunan değerler metalurjik denge çizelgesine yazılır (Elek Analiz Deney Föyü, İTÜ).

3.2.6.3.4. Kuru Eleme

Endüstride ve laboratuvarında sıklıkla kullanılan eleme yöntemidir. Numune azaltma yöntemi ile gruplandırılan malzeme temel elek serisinden elle veya otomatik eleme işleminde geçirilerek tane fraksiyonları oluşturulan malzeme elek analiz tablosuna yazılarak verim ve granülometri hesabı yapılır (Elek Analiz Deney Föyü, İTÜ) [24].

3.2.6.3.5. Deneyin Yapılışı

Killi zemin numunesi TS 707'ye uygun olarak belirlenen bölgelerden numuneler alınır. Bu numuneler düz ve temiz bir zemin üzerine serilerek silindir şeklinde ve 5 cm kalınlıkta serilen malzeme merkezden olmak üzere 4 eşit parçaya ayrılır. İki çeyrek parça (1-3 veya 2-4) karşılıklı olarak alınır ve kalan karşılıklı parça yeniden 5 cm kalınlıkta silindir şeklinde serilir bu sefer diğer (1.'de 1-3 alınmış ise bu defa 2-4) karşılıklı iki parçası alınarak deney yapmak üzere karıştırılır (şekil 3.28). Kalan numune alındığı kütle temsil eder. Temsil alandan alınan killi zemin numunesi kareleme dörtleme işleminden sonra ayrı bir kaba alınır ve etüv cihazında 24 saat bekletilerek tüm nemi alınarak kurutulur.



Şekil 3.28. Kareleme dörtleme ve numune azaltma

Laboratuvar çalışması için örnek teşkil eden numune etüv cihazında 105°C'de 24 saat kurutulularak temel elek 1 standart eleklerinden (19.5 mm – 9.53 mm – 5.6 mm – 4.76 mm – 2.38 mm – 0.42 mm – 0.149 mm – 0.074 mm) geçirilerek işlem tamamlanır.

Eleme işlemi tamamlandıktan sonra her bir eleğin elek üstü değeri ve elek altı değeri hassas terazide tartılır. Her bir elekte kalan miktar çizelge 3.9'a yazılır.

3.2.7. Donmaya ve Çözünmeye Karşı Direncin Tayini (TS EN 1367-1)

Bu deney yöntemi agregaların termal bozunma yöntemi olan TS EN 1367-1 agregaların donma çözünmeye karşı direncin tayini adlı deney yöntemidir. Bu yöntemde agrega daneleri oda sıcaklığından (20°C) -17°C'ye düşürülüp tekrar oda sıcaklığına kademeli ve yavaş bir şekilde 24 saat sürede getirilerek agrega danelerinin bu stres sayesinde toleransını ölçen yöntemdir. Oda sıcaklığından -17°C'ye düşürülüp tekrar oda sıcaklığına getirilmesi 1 periyottur. Bu periyot 10 defa tekrarlanarak toplam 10 gün süre ile işlem tamamlanır. Bu çevrim sırasından malzeme temel elek sınıfındaki en küçük elekten elenerek oluşan yüzde kütle kaybı malzemenin donma-çözünme sınıfını belirler. Kütle kaybı yok ise bu malzeme donma-çözünmeye direnç göstermiştir denilir[8].

Çizelge 3.8. BOF curufu elek analizi ve dane sınıflandırmasına göre kimyasal kompozisyonu.

Dane Boyu (mm)	%Ağırlık	%TFe	%MetFe	%FeO	%Fe ₂ O ₃	%P	CaO	Al ₂ O ₃	MgO
+5	16.20	27.88	5.67	12.41	18.00	0.301	42.12	2.46	4.32
-5+2	22.53	26.16	10.32	0.99	21.55	0.281	41.22	2.65	4.41
-2+0.5	25.71	23.27	5.44	7.62	17.04	0.215	45.54	2.84	5.23
-0.5+0.1	25.10	16.11	2.86	5.52	12.83	0.268	48.58	3.34	5.06
-0.1	10.36	11.10	0.79	2.63	11.83	0.123	46.08	3.58	12.05
Toplam	100	21.62	5.45	5.86	16.62	0.248	44.83	2.94	5.56

İSDEMİR A.Ş BOF curufu elek analizi sonuçları çizelge 3.8'de TS EN 933'e Uygun olarak hazırlanmıştır. Kırma eleme tesisinden geçen malzeme manyetik seperatörlerden geçerek içerisindeki metal malzeme alınarak karbonatlı bir malzeme kalır. Tekrardan eleme işlemine tabi tutularak çizelge 3.8'deki sonuçlar elde edilir ve bu değerlere uygun metalurjik denge çizelgesi çıkartılır. Böylece verim hesabında tahminlerini yapılması da kolaylaşır.

Çizelge 3.9. Hatay-İskenderun ilçesinde bulunan kil numunesinin elek analizi çizelgesi.

Dane Çapı Aralığı (mm)	Elek Üstü (gr)	Elek Altı (gr)	Elek Altı (%)
9.53+5.6	4.4	995.6	99.56
5.6+4.75	8.12	987.48	98.75
4.75+2.36	9.85	977.63	97.76
2.36+0.42	45.64	931.99	93.20
0.42+0.149	121.64	810.35	81.04
0.149+0.074	148.2	662.15	66.22
- 0.074	662.15	0.00	0.00
TOPLAM	1000		

Deney kuru ortam şartlarına uygun olarak hazırlanmıştır. Hatay-İskenderun'dan alınan numuneler, Ø 50 mm x h 100 mm dikişsiz ve kaynaklı çelik kutulara konularak hazırlanmıştır. Deney kapsamında bir adet şahit numune (%100 kil zemin numunesi) hazırlanmıştır. Şahit numune temel alınarak içerilerine %3, %6, %9, %12, %15 ve %20 oranlarında yedi adet numuneden üç'er tane olmak üzere toplam 21 adet numune hazırlanmıştır. Şekil 3.29'da numunelerin hazırlanış şekli gösterilmiştir.



Şekil 3.29. Numunelerin hazırlanması ve sınıflandırılması resmedilmiştir.

Hatay ili İskenderun ilçesinden alınan kil zemin numunesi ve İSDEMİR A.Ş çelikhane curufuna, yerinde numune alımı, tartım işlemleri yapılmış ve elek analizine tabi tutulmuştur (çizelge 3.9). Numunelerin istenilen oranda karışımı agregaların donma-çözünme deneyi olan TSEN 1367-1'e uygun olarak yapılmıştır [8].

3.2.7.1. Deney Standardı

Aynı standartta üç'er deney (A1-0'den 3 adet gibi) numunesi kullanılmıştır. Agregaların donma-çözünme çevriminden sonra agrega büyüklük sınıfına göre (Los Angeles Deneyi) TS EN 1097-2'ye uygun olarak yapılabilir. Bundan dolayı laboratuvar normalden 2 kat daha fazla numune bulundurulmalıdır. Bu numune iki eşit kısma ayrılarak birinci kısım donma-çözünmeye işlemine tabi tutularak ikinci kısım agregalar ise parçalanma ve yoğunluk testine tabi tutulmalıdır.

Deney numunelerine ait miktar ve tane büyüklükleri çizelge 3.10'da verilmiştir. Los Angeles Deneyi için standart olarak kullanılan ve ideal tane büyüklüğü 8-16 mm arası 2000 g olan agrega numuneleridir. Bu değerlerde \pm %5 sapma olabilir. Çizelge 3.10'da bu uygun standart değerler verilmiştir.

Çizelge 3.10. Donma-çözünme döngüsü deneyi için gereken deney numunesi kısımlarının miktarı.

En Büyük Agregatane Büyüklüğü (mm)	Agrega Kütlesi veya Hacmi	
	Normal Agregatane (gr)	Hafif Agregatane (Yığın Hacmi) (ml)
4 – 8	1000	500
8 – 16	2000	1000
16 – 32	4000	1500
32 – 64	6000	–

Donma-çözünme deneyinde agrega kullanılacaksa numuneler taş unu ve organik maddelerden temizlemesi için yıkanmalıdır. Yıkanan malzemeler etüvde $105\pm 5^{\circ}\text{C}$ 'ta kurutulmalı ve tartılmalıdır. Tartılan bu kütle M_1 olarak değerlendirilir.

Bu M_1 numunesi içinde saf su buluna metal kutularda ($20\pm 3^{\circ}\text{C}$) atmosfer basıncında tutulur su seviyesi en az 10 mm üstte olmalı ve bu durum çevrim süresince kontrol edilmelidir.

Metal kutular agrega ve su ile hazırlanarak cihaza konulur. Isının her tarafa eşit olarak yayılması için birbirleriyle ve cihaz duvarı ile teması keserek 50 mm mesafe konur. Soğutma alanının ortası sıcaklık ölçme noktası olarak kullanılır. Bu numuneler $20\pm 3^{\circ}\text{C}$ ile $17\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ arasındaki çevrim şartları şöyledir;

- 1) Oda sıcaklığında ($20\pm 3^{\circ}\text{C}$ 'den) sıfır (0°C 'ye) dereceye indirme 150 ± 30 dk.
- 2) Sıfır derecede bekletme 210 ± 30 dakika
- 3) Sıfır dereceden -17.5°C 'ye 180 ± 30 dakikada indirme.

4) -17.5°C’de bekletme 240 dakika.

5) -17.5°C den oda sıcaklığına getirme

Bu beş adım toplam 24 saati geçmemeli ve -17.5°C’den oda sıcaklığına dönme süresi 10.5 saati geçemez. Bu beş adım 1 periyottur ve 10 defa tekrarlanmalıdır.

Çizelge 3.11. Donma-çözünme işlem adımları.

İşlem Sırası	Dondurma İşlemi		Maruz Bırakılan Süre (dk)	Tolerans (dk)
	İlk Sıcaklık (°C)	Son Sıcaklık (°C)		
1. işlem: Soğutma	(20±3) °C	0 °C	150	±30
2. işlem: Bekletme	0 °C	0 °C	210	±30
3. işlem: Soğutma	0 °C	(-17 ±2.5) °C	180	±30
4. işlem: Bekletme	(-17 ±2.5) °C	(-17 ±2.5) °C	240 (en az)	-

10 Döngü tamamlandıktan sonra tüm numuneleri kaplara alınır ve en küçük eleğin yarısı kadar göz açıklıklı bir elekten elenerek toplam kütle kayıpları ölçülerek tartılan değer M_2 olarak kaydedilir. Elekten elenen malzeme etüvde kurutulmalı etüv sıcaklığı 105°C olmalı ve kütle kaybında kuru ağırlık kabul edilmelidir.

Agregaların donma-çözünme deneyi kütle kaybı hesabı aşağıdaki formül ile hesaplanmıştır;

$$F(\%) = \frac{M_1 - M_2}{M_1} \times 100 \quad (2)$$

Burada;

F: Agregaların termal bozunma (Donma-çözünme etkisi ile) sonrası kütle kaybı değeri.

M_1 : deney numunesinin donma çözünme öncesi kuru kütle ağırlığı (g)

M_2 : donma-çözünme sonrası elenen malzemenin elek altı (kütle kaybı) değeri (g)

Çizelge 3.12. En yüksek donma-çözünme direnç değerlerine göre kategoriler.

F (Kütlece Yüzde Kayıp)	F Kategorisi
≤ 1	F1
≤ 2	F2
≤ 3	F3
≤ 4	F4
> 4	F _(BEYAN)
Serbest	F _(NR)

Çizelge 3.12'deki F (kütlece yüzde kayıp) çizelgesi TS EN 1367-1 deneyinin standart çizelgesidir. Bu satandarda göre malzemenin ilk kütle miktarı donma çözünme döngüsünden sonra eleme yapılarak elede edilen kütle kayıp miktarı (2)'deki formül uygulanarak 1 ile 4 arasında bir değer elde edilir. Formülden bulunan değer 1 veya 1 den küçükse kütle kaybı az olmuştur yani malzemenin donma-çözünme işlemine direç göstermiştir denilir. Aynı şekilde 1 ile 2 arasında ise malzeme yine donma-çözünmeye direnç göstermiştir. Anacak direnç sınıfı 1'den farklı olarak daha az direnç göstermiştir. Bu yüzden bir sınıflandırma yapmak için 0-1 arasında bulunan değerler için F1 katagorisinde, 1-2 arasındaki bir değer için F2 katagorisinde 2-3 arasında ise F3 katagorisinde 3-4 Arasında ise F4 katagorisinde ve 4'den büyükse $F_{(BEYAN)}$ daha büyük çıkan sonuçlar için ise serbest $F_{(NR)}$ olarak birimlendirilir. Elde edile F katagori değerleri agrega yada malzemeler üzerinde kesin bir yargı bildirmez ancak oluşturulan çevre ve iklim şartları çizelgesinde değerlendirme yapılarak numune için bulunan F katagori değerleri için bir tahminde bulunulması sağlanır.

Çizelge 3.13. İklim şartlarına ve çevre şartlarına göre örnek agrega talebi.

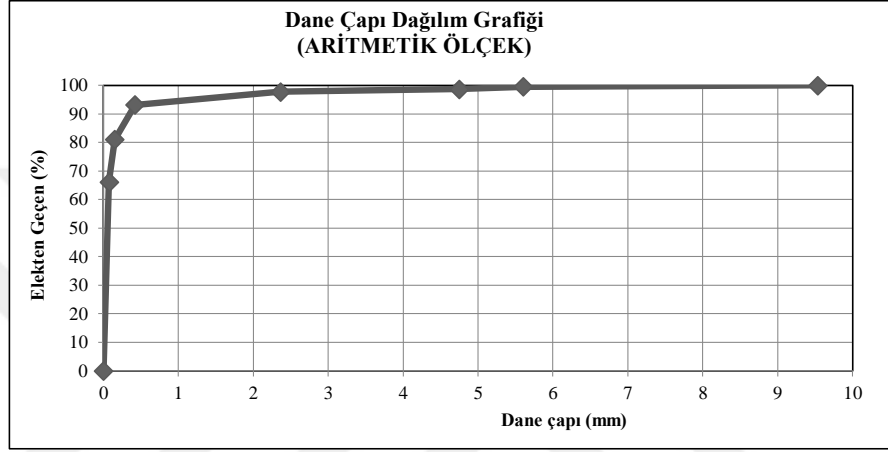
Çevre Şartları	İklim Şartları		
	Akdeniz	Atlantik	Kıta Avrupası
Buzlanma yok kuru	X	X	X
Kısmi doyunluk, tuz yok.	X	F4	F2
Doygun, Tuz yok	X	F2	F1
Tuzlu ortam (deniz suyu, yol satırları)	F4	F2	F1
Hava alanı satırlı kaplaması	F2	F1	F1

(X: Herhangi bir F değeri şartı yok.)

Formül (2)'den bulunan değer çizelge 3.12'de F kategorisi seçilerek donma-çözünme sonrası malzemenin hangi iklim ve çevre şartında kullanılabileceği hakkında tahminler yapmak için TS EN 1367-1'in hazırlamış olduğu çizelge 3.13'den bakılarak yorumlanabilir. Örneğin yaptığımız çalışmada bulduğumuz değere F4 kategorisinde olsun bulunan bu değer çizelge 3.13'e bakıldığında Akdeniz iklim şartında göre Tuzlu ortam (deniz suyu, yol satırları) şartına kadar uygunken, Atlantik iklim şartına göre Kısmi doyunluk, tuz yok. Çevre şartına kadar uygun demektir.

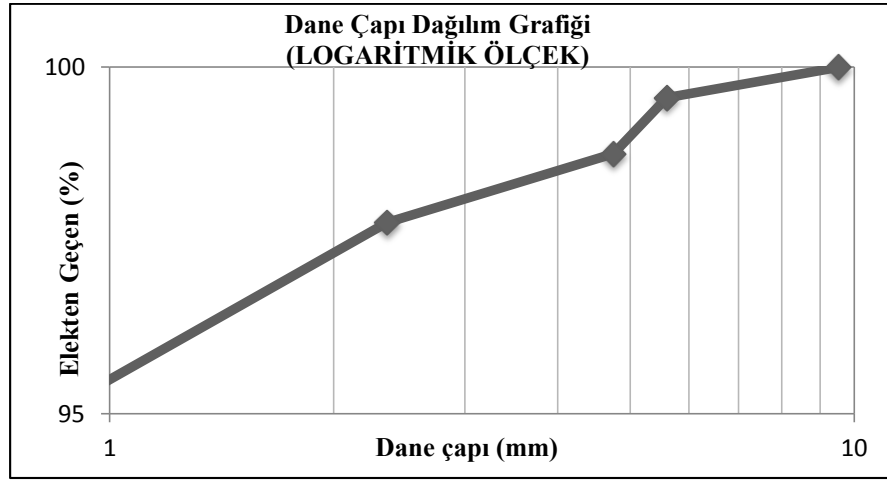
3.2.8. Magnezyum Sülfat Deneyi (TS EN 1367-2)

Çalışmada kullanılan kil zemin Hatay-İskenderun ilçesinden temin edilmiştir. Yerinde numune alımı, tartım ve gradasyon işlemi (elek analizi) çizelge 3.9’da gösterilmektedir. Numunelerin istenen oranda karışımı, deney aşamaları ve ilgili analizleri TS EN 1367-2 standardına uygun olarak yapılmıştır [9]. Şekil 3.30 ve şekil 3.31’de ise deneylerde kullanılan kil zemine ait granülometri eğrileri gösterilmektedir.



Şekil 3.30. Dane çapı dağılım grafiği (Aritmetik ölçek).

Yukarıdaki şekil 3.30’da killi zemin numunesi elenerek elde edilmiş (çizelge 3.9) aritmetik ölçek tane dağılım eğrisidir. Eleme işlemi yapılan malzeme standart elek sınıfı 1’e göre (çizelge 3.7) dizilmiş elekten geçen malzeme miktarları tabloda (çizelge 3.9) terine yazılarak bu sonuçlar elde edilmiştir. Eleme işlemi yapılmadan önce malzeme 24 saat etüvde kurutulmuştur. Aynı değerlerden yararlanarak şekil 3.31’deki logaritmik ölçek dane dağılım eğrisi hazırlanmıştır.



Şekil 3.31. Dane çapı dağılım grafiği (logaritmik ölçek)

Bu çalışma kapsamında sunulan deneyde, killi zeminin numunesinin magnezyum sülfat çözeltisine batırılıp bekletilen numunelerin etüvde kurutulması ile killi zemin malzemesinin aşınma davranışının değerlendirilmesi amaçlanmıştır.

Önceden hazırlanan numuneler $MgSO_4$ çözeltisi içerisinde bekletilip etüvde $105\pm 5^\circ C$ de kurutulur. Amaç magnezyum sülfat çözeltisinin killi zemin taneleri içerisindeki boşluklara sıvı olarak girmekte etüvde kristalleşen sıvı $MgSO_4$ içerisinde bulunduğu çepelere baskı yaparak aşınmaları arttırmaktadır. Dane yapısı $75 \mu m$ 'dan daha küçük malzemeler daha da ufalanarak $38 \mu m$ 'un altında parçalar oluşturmaktadır.

Magnezyum sülfat çözeltisinin hazırlanması sırasında, 1000 g saf su içerisine 1500 g magnezyum sülfat yavaş yavaş ilave edilerek karıştırılmaktadır. Çözeltinin kalitesini ölçmek için ise %5'lik alikot çözeltisi hazırlanmıştır. Bu çözelti 100 ml saf su içerisine 5g baryum klorür eklenerek elde edilmiştir. Magnezyum sülfat çözeltisinin kalitesinin anlaşılması için alikot çözeltisi bir veya birkaç damla damlatılarak renk değişimi gözlenmiştir [9].

Deneylerde, Hatay-İskenderun'dan alınan doğal zeminden eleme (kuru ve yaş) işlemlerinden sonra %100 kil numunesi elde edilmiştir. Bu malzemeye İSDEMİR A.Ş' den alınan BOF curufu %3, %6, %9, %12, %15 ve %20 oranlarında katılmış ve karışımın yoğunluğu $\varnothing 50$ mm ve 100 h mm boyda deney için tasarlanmış çelik, dişsiz ve kaynaklı kaplarda $1.75 g/cm^3$ olarak ayarlanmıştır. Çelik kaplar, doğru miktar ve oranı belirlemek için kullanılmıştır. Numunelerin filtre kâğıdına konulmuş hali ve (şekil 3.32), kil malzemesinin etüv sonrası hali şekil 3.32'de gösterilmiştir. BOF curufu karışımı killi zemin numuneleri $\varnothing 50$ mm ve 100 h mm yükseklikteki metal kapların hacmi (g/cm^3) temel alınarak hazırlanmıştır.



Şekil 3.32. Kil malzemesinin etüv sonrası görünümü ve Filtre kâğıdında sınıflandırılmış karışımı

3.2.8.1. Deney Standardı

Agregaların termal bozulma deneyi olan agregaların magnezyum sülfat deneyi TS EN 1367-2 standardına uygun olarak hazırlanan numuneler (şekil 3.32) ve kimyasallar ($MgSO_4$ çözeltisi ve $BrCl_2$ çözeltisi) uygun hale getirildi $MgSO_4$ çözeltisi bir kovani içerisine (5 litreye yakın) konuldu filtre kâğıdının içerisine konan zemin numuneleri çözeltini içerisinde bekletildi. Çözeltiye doymun hale gelen numuneler yıkanıp süzöldükten sonra etüv cihazında $105\pm 5^\circ C$ ' de 24 saat kurutulur. Bu işlem bir periyottur. Bu işlem 5 kez tekrarlanarak deney tamamlanır.

Deney öncesi numune ağırlığı M_1 olarak kaydedildi. Numune kayıpları deney sonunda numunelerin en küçük eleğin yarısı kadar bir elekten geçirilerek eleğin altında kalan kısım kütle kaybı M_2 olarak kaydedilir.

Magnezyum deneyi işlemi aşağıdaki formülasyon ile ölçölür;

$$M_s (\%) = \frac{M_1 - M_2}{M_1} \times 100 \quad (3)$$

Burada;

$M_s (\%)$ = magnezyum sülfat kütlece yüzde kayıp değeri

M_1 : Numunelerin deney öncesi ağırlıkları (g)

M_2 : Numunelerin deney sonrası elek altı kütlesi (g)

Her numuneden 3 adet örnek hazırlanmıştır bulunan bu değeri hepsini ayrı ayrı hesaplandı ve bu üç numunenin sonucunun ortalaması alınarak bulunan değeri için grafik şekli oluşturuldu (çizelge 4.7, şekil 4.16).

Çizelge 3.14. Magnezyum sülfat kullanılarak elde edilen en yüksek don dayanıklılığı değerlerine göre kategoriler.

Ms (Kütlece Kayıp)	Ms Kategorisi
≤ 18	Ms18
≤ 25	Ms25
≤ 35	Ms35
> 35	Ms _(BEYAN)
Serbest	Ms _(NR)

Çizelge 3.14'deki Ms (kütlece Yüzde Kayıp) çizelgesi TS EN 1367-2 deneyinin standart çizelgesidir. Bu satandarda göre malzemenin ilk kütle miktarı donma-çözünme döngüsünden sonra eleme yapılarak elde edilen kütle kaybı miktarı (3)'deki formül uygulanarak 18 ile 35 arasında bir değer elde edilir. Bu deneyde numune aşınması daha fazladır. Çünkü yoğun kıvamda hazırlanan magnezyum çözeltisi malzeme gözeneklerine girerek kristallenir bu yüzden aşınma daha fazladır. Formülden bulunan değer 18 veya 18 den küçükse kütle kaybı az olmuştur yani malzememin magnezyum sülfat işlemine direç göstermiştir denilir. Aynı şekilde 18 ile 25 arasında ise malzeme yine magnezyum sülfata direç göstermiştir. Anacak direç sınıfı 18 den farklı olarak daha az direç göstermiştir. Bu yüzden bir sınıflandırma yapmak için 0-18 arasında bulunan değerler için M18 katagorisinde, 18-25 arasındaki bir değer için Ms25 katagorisinde 25-35 arasında ise Ms35 katagorisinde 35'den büyükse Ms_(BEYAN) daha büyük çıkan sonuçlar için ise serbest Ms_(NR) olarak birimlendirilir. Elde edile Ms katagori değerleri agrega yada malzemeler üzerinde kesin bir yargı bildirmez ancak oluşturulan çevre ve ilkim şartları çizelgesinde değerlendirme yapılarak numune için bulunan Ms katagori değerleri için bir tahminde bulunulması sağlanır.

Çizelge 3.15. İklim şartlarına ve çevre şartlarına göre örnek agrega talebi.

Çevre Şartları	İklim Şartları		
	Akdeniz	Atlantik	Kıta Avrupası
Buzlanma yok kuru	X	X	X
Kısmi doygunluk, tuz yok.	X	Ms35	Ms25
Doygun, Tuz yok	X	Ms25	Ms18
Tuzlu ortam (deniz suyu, yol satırları)	Ms35	Ms25	Ms18
Hava alanı satırlı kaplaması	Ms25	Ms18	Ms18

(X: Herhangi bir Ms değeri şartı yok.)

Formül (3)'den bulunan değer çizelge 3.14 'de Ms kategorisi seçilerek magnezyum sülfat aşındırma sonrası malzemenin hangi iklim ve çevre şartında kullanılabileceği hakkında tahminler yapmak için TS EN 1367-2'in hazırlamış olduğu çizelge 3.15'den faydalanılarak yorumlanabilir. Örneğin yaptığımız çalışmada bulduğumuz değer Ms35 kategorisinde olsun bulundan bu değer çizelge 3.15'e bakıldığında Akdeniz iklim şartında göre Tuzlu ortam (deniz suyu, yol satırları) şartına kadar uygunken, Atlantik iklim şartına göre Kısmi doygunluk, tuz yok. Çevre şartına kadar uygun ancak kıta Avrupası iklim ve çevre şartına uygun değildir demektir.

3.2.9. Zemin Numunelerinin Donma Kabarma Miktarları ASTM D 5918 (2006)

İklimin doğal sonucu olarak oluşan ve toprağın devimsel (etkin) yapısını etkileyen önemli olaylardan bir tanesi de donma-çözünmedir. Yapılan çalışmalar ışığında donma-çözünmenin zemin yapısını ve agrega yapısını büyük ölçüde etkilemektedir. İklimin doğal sonucu olan donma-çözünme, iki olayın oluşmasına neden olarak zemin kinetik yapısını doğrudan etkilemektedir. Bu olayların birincisi, zemin danelerini oluşturan malzemelerinin gözeneklerinde kristalleşen suyun hücre çeperine baskı yaparak zemin yoğunluğunu azaltmakta, ikinci etkisi ise çözünen su kristallerinin çözünerek yoğunluğa azalan zeminin kinetik yapısını da bozmakta ve toprak drenajı ile zemin geometrisini de değiştirmektedir. (Kay ve diğ., 1985).



Şekil 3.33. Donma-çözünme devrine maruz kalmış, 100x100x100 mm boyutlarında küp beton numuneleri

Hava sıcaklığının donma ısısının altına düştüğü durumlarda özellikle de bu durumun birkaç günden fazla sürmesi halinde zemindeki boşluk suyunun donması mümkündür. Zemindeki don etkisinin mühendislik açısından iki farklı önemi bulunmaktadır. Bunlardan birincisi; suyun donmasıyla birlikte meydana gelen hacim

artışından dolayı zeminin hacmi çok kısa bir süre içerisinde yaklaşık %10 oranında artabilmektedir. İkinci ve mühendislik açısından daha önemli olarak nitelendirilebilen olay ise; buz kristallerinin oluşması ve zeminde mercekler meydana getirmesidir. Bu merceklerin kalınlığı birkaç santimetreye kadar çıkabilmekte ve meydana gelen kabarma nedeniyle küçük yapılar ve yol gibi hafif yüzey yapılarına zarar verebilmektedir. Şekil 3.34’de bu olayı anlatan olayı resmetmektedir.



Şekil 3.34. Don etkisi nedeniyle zarar görmüş olan bir yol kaplaması ve otoyol bariyeri

İşte bu gibi olayları da iyi anlamak için zeminlerin yapısını, kompaksiyon değerlerini, sıkıştırılabilirliğini ve zemin basıncını daha iyi anlayabilmek ve sayısal bir veri ortaya koyabilmek için kompaksiyon, zeminlerin sıkıştırılabilirliğini ve bunların donma-çözünme arasındaki ilişkiyi inceleyebilmek için bu zeminlerin numunelerini donma kabarma miktarının belirlenmesi (ASTM D 5918) deneylerin yapılması bu ilişkiyi anlamada bir ip ucu verebilir. Biz bu çalışmamızda Kabarma miktarını yani zemin şişmelerinin İSDEMİR A.Ş’den alınan BOF curufunun bu killi zemilerde hangi oranlarda karıştırılarak, donma-çözünme çevriminden ne kadar az yada çok etkileneceğinin araştırılması istenmiştir.

3.2.9.1. Donma Kabarma Hızının Belirlenmesi

Zeminlerin kabarmama hızını anlayabilmek için ilgili arazinin zemininden alınan numunelerin yerinde veya laboratuvarda yapılan deneylerle anlayabilmek mümkündür. Zeminin donma-çözünmeden kaynaklanan etkisini anlaya bilmek için ortam şartlarının araştırılarak laboratuvar ortamında taklit edilmesi gerekmektedir. Bunun için arazi deneylerinde donmuş tabaka kalınlığı, sıcaklık ve kabarma miktarları gibi değerler

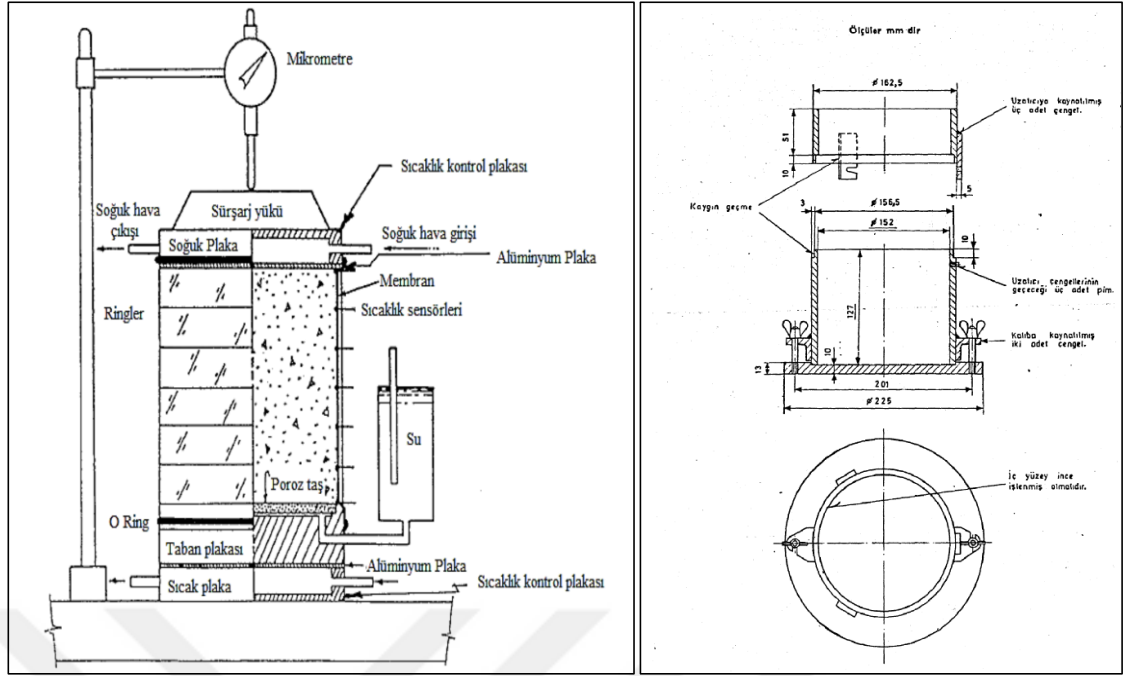
mutlaka alınmalı ve yerinde yapılan deneyler de bu konular özenli bir şekilde yapılmalıdır [20].

3.2.9.2. Laboratuvar Çalışmaları (Deneyleri)

Yerinde yapılan deneyler de araziden alınmış dolguda ya da örselenmiş numuneler üzerinde donma-çözünme deneyi yapılabilir. Laboratuvar ortamında donma-çözünme için kullanılacak suyun ve deneye düzeneğine göre, açık ve kapalı sistem olmak üzere iki şekilde yapılabilir.

- Kapalı sistem donma-çözünme zemin bünyesinde bulunan su ile kabarma gerçekleşir.
- Açık sistem donma çözünme yar altı suyuna veya yer altına sızan suyun kapiler boşluklarının emme kuvveti oluşturarak zeminin donmuş bölgelerine hareket eder. Böylece buz mercekleşmesi oluşarak zeminde kabarma meydana getirir.

Hem kapalı hem açık sistem donma-çözünme deneyler ASTM D5918'e uygun olarak yapılmıştır (şekil 3.35). Çalışma kapsamında donma-çözünme sonrası kabarma hızları CBR (California Bearing Ratio) deneyi ve CBR deneyine bağlı Kompaksiyon deneyleri yaparak zeminlerin donma-kabarmaya karşı hassasiyeti belirlenmek istenmiştir. Deney yönteminde kompaksiyon değerine göre su muhtevası belirlenmiş zemin örneği CBR kalıbına sıkıştırılarak bir metal çubuğun mold kabının içindeki zemin yüzeyine yaklaşık 19 cm³ metal bir çubuğun 2.8 kPa sürşarj yükü ile batırılarak zeminin donma-çözünmedeki hassasiyeti belirlenebilir. Belirlenen sıcaklık ve çevrim aşamasına bağlı olarak 10 kez donma-çözünme çevrimine tabi tutulmuştur, bu şartlar çizelge 4.3'de verilmiştir.



Şekil 3.35. Donma çözünme deney şematığı (ASTM D 5918)[20].

Şekil 3.35’de donma-çözünme düzeneği ve aparatların kullanımı resmedilmiştir. Bu düzenek donma-çözünme şartları ayarlanmış iklimlendirme cihazına konulmuştur. Farklı bir çalışma için istenirse zemin numunesinin derinlikçe sıcaklık değişimleri gözlemlenebilir. Böylece sıcaklık değişimleri ile donma olayının zemin numunesi derinliğinin ne ölçüde ve donma derinliğinde gerçekleştiği hakkında bilgi verebilir [20].

3.2.9.3. Numune Hazırlama Yöntemi

Deney ortamı belirlenen çalışma koşullarına göre kompaksiyon ve proktor deneyleri yaparak optimum su muhtevası kuru birim hacim ağırlığı belirlenmiştir. Kompaksiyon sonuçlarına göre belirlenen değerlerle zemin numunesi CBR kalıplarına (mold çapı (Ø) 15.2 cm Yüksekliği (h) 12.7 cm) standart proktor enerjisi ile sıkıştırılmıştır. Mold kabına sıkıştırılan numuneler şekil 3.36’deki gibi deney düzenekleri yerleştirilerek suya doygun hale gelmesi için üç gün suda bekletilmiştir.



Şekil 3.36. Numunelerin suya doymun hale getirilmesi (İSTE)

Yüzde yüz suya doymun hale getirilmesi için suya bırakılan numunelerin kabarma miktarlarını da takip edebilmek için mikrometreler takılmıştır. Kabarma miktarları sabitleninceye kadar CBR kalıplarına kanan killi zemin numuneleri su altında bekletildi. Bu süre sonunda numuneler suya doymundur denilmiştir.

3.2.9.4. Deney Yöntemi

Proktor sıklığında optimum su muhtevasında CBR kalıpları içerisinde sıkıştırılarak hazırlanmış numuneler en az 3 gün süre ile su içerisinde bekletilerek donma-çözünme deneyine tabi tutulmuştur. Hazırlanan zemin numuneleri 3.2 kPa'lık sürşarj yükü altında ASTM D 5918'e göre yaklaşık 240 saat süren ve sıcaklık değeri 20°C ile -17°C arasında değiştirilebilen bir kabın içerisinde kapalı sistem donma-çözünme deneylerine maruz bırakılacaktır. Donma olayı sırasında oluşan kabarma miktarları numune üzerine yerleştirilen mikrometrelerle zamana bağlı olarak kaydedilecektir.

Zemin numuneleri su muhtevasını belirlemek için kompaksiyon deneyleri her bir deney numunesi için yapılmıştır. Kompaksiyon değeri belirlenen numuneler standart proktor enerjisi ile sıkıştırılarak donma-çözünme öncesi ve sonra CBR deneyleri yapılarak numunelerin bulunan değeri için kabarma miktarları ve hızları arasındaki ilişki incelenmiştir.

Donma olayı sırasında oluşan kabarma veya çözünme sırasında meydana gelen oturma değeri numuneler üzerine yerleştirilen 1/100 mm hassasiyetteki mikrometrelerden alınan okumalar ile gözlemlenmektedir. Donma kabarma hızları zamanla donma süreçlerinin ilk sekiz saat sonundaki okuma değeri göre belirlenmektedir.

Tüm numunelerin donma-çözünme öncesi ve sonrası CBR değerleri birebir ölçekli çizilen eksen takımında 45° eğim çizgisinin üst kısmında kalmaktadır. Buna göre tüm numunelerde donma-çözünme sonrası mukavemet kaybının olduğu rahatlıkla söylenebilir.

Zemin numunelerinin donma kabarma hassaslığının belirlenmesi ve donma-çözünme davranışını anlayabilmek için bir kompaksiyon ve CBR deneyleri yapılmıştır. Donmaya karşı hassasiyet ASTM D 5918 deney standardına göre belirlenmiştir [20].

3.2.9.5. Donma-Çözünme Deneyi

Deney düzeneği Açık ve kapalı sistem donma-çözünme deney düzeneği olmak üzere iki şekilde yapılır. Deney kalıbına numune suyu alttan ve sürekli olarak beslenir bu sistem açık sistem donma-çözünme deney düzeneğidir. Cihaz içerisinde bulunan numunelere donma sıcaklığı üzerinde bir sıcaklıkta sabit is numune üstündeki plak donma ısısına maruz kalır. Böylece numune üstten donarken alttan beslenen su donarak donma bölgesine doğru baskı yapar. Deney yöntemi çatlak ve sızdırma suyu ile kabaran zeminleri örnek olduğunda deney düzeneği de bu durum göz önünde bulundurularak tasarlanmış, bu durumdan dolayı deney başlangıcı su muhtevası ile deney sonu su muhtevası arasında büyük fark olmaktadır. İkinci deney yöntemi olan kapalı sistemde ise mold kabındaki zemin numunesi deney koşullarınca doymun bünye suyu ile donma-çözünmeye tabi tutulduğundan içerdiği su miktarıyla orantılı olarak donma-kabarma meydana gelmektedir. Yaptığımız çalışma kapsamında ASTM D 5918 deney yöntemin bir aşaması olan kapalı sistem donma-çözünme deney yöntemi kullanarak donma kabarma hassaslığı hakkında bilgi alınmak istenmiştir [20].



Şekil 3.37. Kapalı sistem donma-çözünme deneyi (İSTE)

3.2.9.6. CBR Deneyi

Bu deney yöntemi (CBR Deneyi) mold kabı içerisine sıkıştırılmış araziden alınmış zemin numunesinin CBR cihazına konularak silindriksel pistonun numune yüzeyine bir yük-penetrasyon uygulayarak zeminin taşıma gücü hakkında bilgi almak için kullanılan sistem bütünüdür. Diğer bir ifade ile CBR standart yük değerini, herhangi bir yük-penetrasyon değeri için oranı olarak da tanımlanabilir. Bu standart değerler 2.5 mm ve 5 mm penetrasyon değerleri için, numunelerin yük penetrasyon değerleri için ölçülen 2.5 mm ve 5 mm penetrasyon değeri arasında büyük olan alınır.

Zeminlerin kabarma miktarı ASTM D 5918 deneyinde kullanılan cihaz şekil 3.38 de gösterilmiştir. Cihaz kalıp içerisindeki numunenin yüzeyine tek taraflı olarak kuvvet uygulamaktadır. Cihaz üzerindeki ekran sayesinde işlemin her adımı kolayca izlenebilir. 1/100 mm hassasiyete sahip mikrometre mold kabının kuvvet halkası sabitlenerek penetrasyon ilerleme miktarı takip edilmektedir. Bu deney yöntemi en çok yol ve hava alanı dolgu alanlarında kullanılan malzemelerin mukavemetini belirlemede kullanılır.



Şekil 3.38. CBR deney aleti (İSTE Geoteknik laboratuvarı).

Bu çalışma kapsamında 15.2 cm çapında ve 12.7 cm yüksekliğinde CBR kalıpları kullanılmıştır. Zemin numuneleri genellikle 2.5 mm penetrasyona kadar devam edilmiş daha sonra deney sonlandırılmış ve zemin numunelerinin deney sonu su muhtevaları belirlenmiştir [21].

3.2.9.7. Donma-Çözünme Sonrası İnceleme Yöntemi

Bu deney yönteminde donma-çözünme işlemini takiben aynı numunelerin tekrar hazırlanarak CBR işlemi sonrası suya doygun hale getirilerek iklimlendirme cihazında donma-çözünme çevrim adımlarını gerçekleştirerek donma-çözünme öncesi CBR değerleri arasındaki bağıntı incelenmiştir. CBR değerleri ile kuru birim hacim ağırlığı (γ_{kmaks}) ve optimum su muhtevası da (ω_{opt}) incelenmiştir. Bu yöntemle donma-çözüm öncesi ve sonrası oluşan mukavemet kayıpları incelenmiş ve matematiksel hesapları (4) formülü kullanılarak yapılmıştır. Donma-çözünme öncesi CBR değeri (CBR_1) ile donma-çözünme sonrası CBR değeri ise (CBR_2) olarak adlandırılmıştır. Aralarındaki ilişki ise CBR değişim oranı (ΔCBR) olarak adlandırılmıştır.

Donma-çözünme arasındaki ilişki aşağıda formülasyon kullanılmıştır.

$$\Delta CBR = \frac{CBR_1 - CBR_2}{CBR_1} \times 100 \quad (4)$$

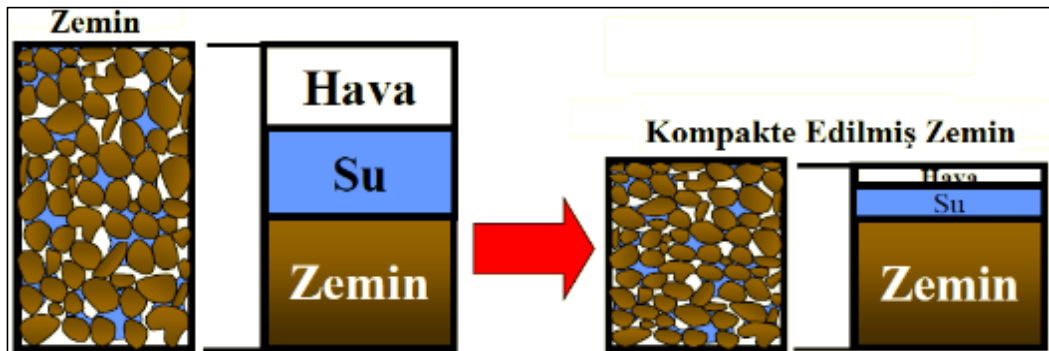
Ayrıca %100 suya doygun numuneler üzerinde donma-çözünme sonrası CBR deneyleri yapılarak donma-çözünme öncesine göre değişim oranları bağıntı (4)'e göre belirlenmiştir [20].

3.2.9.8. Kompaksiyon (Standart Proktor) Deneyi

Zemin numunesinin bir mold kabı içerisine üç ayrı tabaka halinde metal bir tokmakla sıkıştırılması ile mühendislik özelliği kazandırılmasına kompaksiyon deneyi denir.

Zemin geotekniği uygulama aşamalarında toprak dolguları gibi çeşitli mühendislik çalışmaları için kullanılan yaygın bir uygulamadır. İnşaat sahaları, kaplama altı dolgular, barajlar, su bentleri gibi yapılar toprak dolguları kullanmaktadır. Zemin stabilizasyonun için kullanılan toprak dolgular elverişsiz zemin yapılarının kazılarak yerine mühendislik yapıları yüksek bir dolgu olarak kullanılır. Durabilitesi yüksek bir zemin oluşturmak için başka sahadan getirilen malzeme ile olacaktır. Elde edilen zemin malzemesi sahaya serilerek heterojen bir malzeme oluşturarak permeabilitesi yüksek, yüksek poroziteye sahip sıkıştırılabilir yeni bir zemin tabakası elde edilir. Zeminin olumsuz mühendislik özelliklerini önlemek için sıkıştırılabilir bir zemin elde etmek gerekir. Bu işlemle zemin içerisindeki boşluklar azalır ve daha sıkı bir zemin elde edilir. Böylece mühendislik özelliklerinin artışı ile birim hacim ağırlığında da artışı sağlanmış olur.

Bu deney yöntemine göre, zemin içerisindeki boşlukların azaltılması kompaksiyon deneyi ile mümkündür. Kompaksiyon deneyi zemin boşluklarını azaltma bilmek için sıkıştırılamaz olan su ile zemin taneleri su ile boşlukların doldurulup sıkıştırıldığında hava kabarcıklarının alanı terk ederek daha dolgun ve sıkı bir zemin elde edilir ancak su miktarının azlığı ya da çokluğu sorun yaratacağından kompaksiyon deneyi ile bu su miktarının uygun değeri belirlenir. (şekil 3.39)



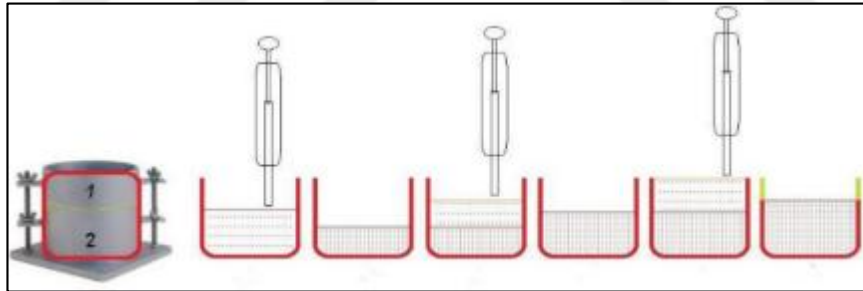
Şekil 3.39. Kompaksiyon etkisi (Zemin+Kompakte edilmiş zemin)

Şekil 3.39’da da görüldüğü gibi zemin danelerinin sıkıştırılabilmesi için iki farklı etki bulunur. Birinci etki zemin içerisindeki su miktarının fazla olması zemin boşluklarındaki havanın hapsolmesine ve dışarı çıkmamasına neden olmaktadır. Böylece sıkışan hava hacminde artan basınçla sıkışma zorlaşır. Zemin kesitinin tamamen su ile dolu olması durumunda sıkıştırma mümkün olmayacaktır bunun nedeni kap veya zemin kesitinde hidrostatik basınç oluşacağından uygulanan yükler neticesinde zemini oluşturan danelerin birbirine yaklaşımını engelleyecektir. İdeal su miktarının belirlenmesi halinde zemin daneleri ve su uygulanan basınçla hava boşluklarını dışarı itecek ve daha sıkı ve yoğun bir yapı oluşacaktır, ideal su miktarının azlığı zemin sıkıştırma enerjisininide arttıracığı düşünülürse iyi bir sıkıştırmada yapılamayacaktır.

Zeminlerin belirlenen uygundeğerdeki bir eneyji ile yine uygun bir sıklık elde etmek için gerekli olan su miktarının bulunması yöntemine optimum su muhtevası denir.

Standart Proktor Deneyi İşlem adımları;

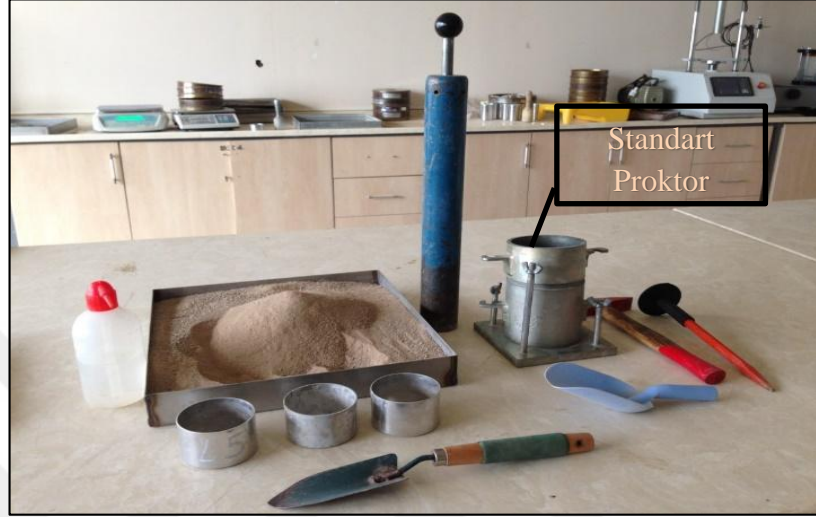
- Demir çekiç ve tokmak 2.5 kg ağırlıkta
- Mold’a 30.5 cm yükseklikten düşürme
- 3 tabaka halinde, her tabakaya 25’er kere düşürülerek gerçekleştirilir.
- Toplam 590 kJ/m^3 enerji ile sıkıştırılır.



Şekil 3.40. Standart proktor uygulaması.

Zemin numunesi önce kurutulur. Yaklaşık 4000 g çelik bir kaba alınarak malzeme ağırlığının yüzde 3 veya yüzde 5 oranda su eklenerek iyice karıştırılır. Zemin numunesine eşit bir şekilde karıştırılan su mold kabının 1/3’ü kadar birinci tabakası sıkıştırılır. Sıkıştırma işlemi çelik tokmağın 30.5 cm yükseklikten 25 kez düşülür mold kabına 2. tabaka zemin numuneside aynı şekilde yapılır. Üçüncü tabaka mold kabına yaka takılarak tamamen numune ile doldurulur ve 30.5 cm yükseklikten 25 düşürüm yaparak yaka çıkarılır ve yüzeyi çelik spatula ile sıyırılarak düzlenir. (şekil 4.18) kap+numune ağırlı tartılır ve kayıt edilir. Mold kabındaki numunenin alt, üst ve ortasında numune alınarak etüvete kurutulma üzere parça alınır. Bu işlem zemin nem miktarını ölçmek ve

kuru birim hacim miktarını belirlemek için yapılır. Her deneye, aşaması için ayrı ayrı kayıt edilir. İşleme kab+numune ağırlığı bir önceki çalışma değerinden daha küçük bir değer çıktıkana kadar devam edilir. Kap+numune ağırlığı azaldıktan sonra her karışım oranı için belirlenen kuru birim hacim ağırlığı ve optimum su miktarı tablosu oluşturularak grafiğin tepe noktası optimum su miktarının verir (şekil 4.18, şekil 4,19).



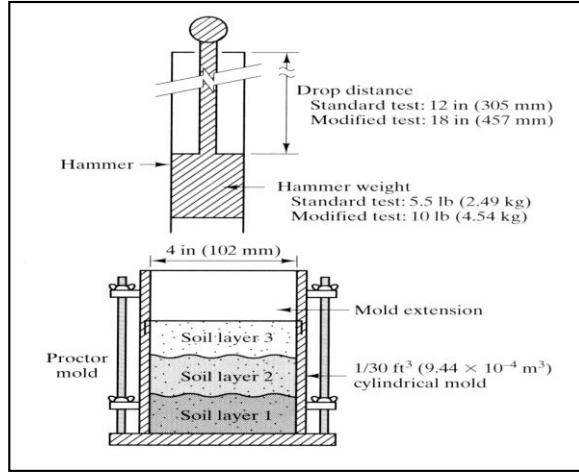
Şekil 3.41. Kompaksiyon deney alet ve ekipmanları (İSTE Geoteknik laboratuvarı)

Yukarıda ki resimde deneyde kullanılacak bazı resimler verilmiştir. Bunlar standart proktor kalıbı, metal ve plastik kürek (örnek almak için), standart proktor çekici, büyük boy çelik tepsi, sukabı ve İskenderun bölgesi killi zemin numunesini resmektedir.

Kompaksiyonda Suyun Etkisi;

Zemin malzemelerinin sıkıştırılabilirliği kompaksiyon enerjisi ve zemin numunesi içerisindeki su miktarına bağlı, uygun değer su, enerji ve gradasyon sağlandığında statik ve dinamik yükler altında zemine oluşturan daneler birbirine daha rahat hareket ederek uygun bir sıkılık sağlanır. Killi ve siltli zemin yapılarında su içeriğinin önemi kompaksiyon özelliğinin etkisi daha bariz görülmektedir. Çünkü zemin içindeki su miktarı danelerin hareketliliğini görmekte daha etkin bir yoldur.

Su muhtevasını (temiz kum ve çakıllar) kohezyonsuz zeminlerin sıkıştırılmasını sıkıştırmasını daha az etkilemektedir. Çünkü iri daneli zemin numunesi içerisindeki su ve havanın zemini terketmesi daha kolaydır. Yalnız ince daneli ve nemli zeminlerde ise sıkıştırma kuru veya zemine göre kapiler gerilimleri çıkması nedeni ile daha zor gerçekleşir.



Şekil 3.42. Kompaksiyon deneyi sıkıştırma metodu.

Zemin mazlemleri kompaksiyon enerjisi ile sıkıştırıldığında değişik su ihtivasi zemin kinetiğinin de doğrudan etkileyeceğinden zemin içerisindeki suyun miktarı önemlidir. Zemin malzemeleri sabit kompaksiyon enerjisi ile farklı su miktarları ile sıkıştırıldığında artan su içeriği kuru yoğunluğu önce arttırmakta olsada sonra azalmaktadır.

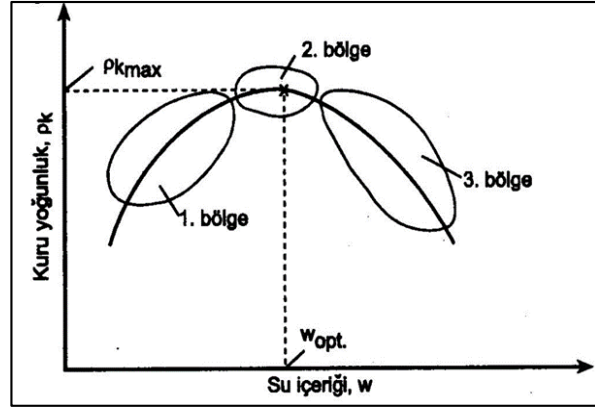
Kompaksiyon süresi boyunca su miktarının varlığına göre iki farklı etki yapar.

1. Suya doygunluk derecesi yüksek olduğunda;

Zemin numunesi ve su sıkıştırılmaz malzeme olduğundan su miktarının fazlalığı zemini oluşturan danelerin birbirine yaklaşmasını engeller ve sıkıştırma güçleşir. Su miktarının artması ile zemin boşluklarındaki havanın bir kısmı hapsolür. Dışarı hava çıkışının azalması ile oluşan basınç artışı kompaksiyonun gerçekleşmesine engel olur.

2. Suya doygunluk derecesi düşük olduğunda;

Zemine muhtevastaki uygun değer su miktarı zemini oluşturan danelerin kapiler ve sürtünme gerilmeleri ve elektriksel kuvvetin net etkisi çekim kuvvetine dönüşür. Optimum su muhtevası sağlanan zeminlerde taneler arası sürtünme kuvveti, kapiler gerilimi azalarak daneler arası elektriksel itme kuvveti de ortaya çıkar.



Şekil 3.43. Kuru birim hacim yoğunluk grafiği[21].

Şekil 3.43’de su muhtevası yapılmış bir numunenin kuru birim hacim yoğunluğu grafiği gösterilmektedir. Şekilde görüldüğü üzere üç bölgeden oluşmaktadır. 3. Bölgede zemin muhtevasında fazla miktarda su bulunduğundan sıkıştırılamaz, 1. Bölgede ise zemin numunesinde uygun değer altında su içerdiğinden yüksek enerji ile sıkıştırılır ve boşluk zemin içerisinde hapsolür.

2. bölgede bölge grafiğın tam tepe noktasıdır. Bu durumda malzeme uygun miktar içermektedir. Kuru yoğunluk ve su sıkışması en yüksek olmaktadır. Maksimum kuru yoğunluk $\gamma_{k(max)}$ durumunda, optimum su muhtevası (w_{opt}) demektir. En iyi sıkıştırma boşluksuz yapı bu bölgedeki değerle sağlanır. Arazi çalışmalarında en iyi sıkışma optimum su muhtevasıyla olur (grafikte 2. Bölge). Çalışılan zemin su içeriğine sahip olması daha az enerjiyle daha az boşluklu yapı sağlanır [21].

Hesaplamalar;

- Numunenin Su İçeriğini Belirlemek;

$$\frac{W_1 - W_k}{W_1 - W_w} = \frac{W_w}{W_k} = W \quad (5)$$

W : Su muhtevası (zemin içindeki su ağırlığının/zemin kuru ağırlığına oranıdır)

W_1 : Yaş numune ağırlığı.

W_k : Kuru numune ağırlığı.

W_w : Su ağırlığı.

- **Kompaksiyonun Temel Bağıntısı;**

$$\gamma_k = \frac{\gamma_n}{1 + W} \text{ gr/cm}^3 \quad (6)$$

$$\gamma_n = \frac{W_4 - W_3}{V} \text{ gr/cm}^3 \quad (7)$$

γ_k : yağ birim hacim ağırlık.

W : su muhtevası.

W_4 : kalıp+zemin.

W_3 : kalıp.

V : kalıbın iç hacmi (943cm³).

4. ARAŞTIRMA BULGULAR VE TARTIŞMA

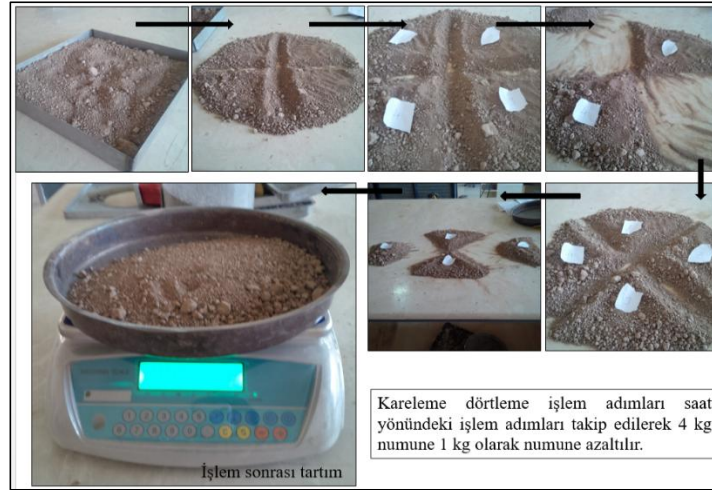
4.1. Elek Analizi

Bölgelerden alınması için tespit edilen (şekil 3.11, şekil 14) killi zemin numunesi ve İSDEMİR A.Ş den BOF curufu numunesi (şekil 3.8, şekil 3.7) İSTE zemin geoteknik laboratuvar çalışma alanına büyük boy nakliye çuvallarına (şekil 4.1) konularak yığılandırıldı. Numune alma işlemi TS 707'e uygun olarak numune alma işlemi gerçekleştirildi. Numune alma işlemi önce İskenderun killi zemin numunesi yığınının çeşitli bölgelerinden 4 kg killi zemin numunesi alınarak laboratuvarda bulunan çelik tepsiye konuldu ve daha sonra aynı işlem BOF curufu numunesi içinde yapıldı. Curuf yığınının çeşitli bölgelerinden 4 kg BOF curuf örneği alınarak çelik tepsilere konuldu ve laboratuvara getirildi. Böylece numune alma işlemi bitirilmiş oldu.



Şekil 4.1. İSDEMİR A.Ş Curuf stok sahası ve örnek alınmış BOF curufu paketleri

Numune alma işlemi bitirdikten sonra numune azaltma işlemi için kareleme dörtleme işlemi yapılarak numune azaltıldı. Bu yöntemle göre; 4 kg örnek alınan killi zemin numunesi İSTE zemin geotekniği laboratuvarında bulunan mermer masa üzerine boşaltıldı, oluşan yığın yaklaşık olarak bir silindir haline getirildi (şekil 4.2). Killi zemin numunesi yaklaşık olarak dörde bölündü. İki çeyrek parça 2-4 alınarak yeni bir karışım yapıldı. Yeni oluşturulan yığın tekrar silindir hale getirildi ve o parçalarda dörde bölünüp bu defa 1-3, karşılıklı iki parça alınarak elek analizi deneyi yapmak üzere iki parça karıştırıldı (şekil 4.2).



Şekil 4.2. Kareleme dörtleme işlem adımları (İSTE).

Böylece elimizde 1 kg (1000 g) numune elek analizi yapmak için numune kaldı. Numune azaltma işlemi BOF curufu numunesi için de yapıldı. 4 kg'lık curuf malzemesi killi zemin numunesinde yapıldığı gibi aynı şekilde kareleme dörtleme yöntemi ile azaltılarak önce 1-3 sonra 2-4 parçaları alınarak curuf numunesi 1 kg'a indirildi ve elek analizi yapıldı. Deneyin yapılabilmesi için bulunması gereken bazı deney aletleri şunlardır;

- Numune : Killi zemin numunesi (5000 g)
- Elekler : (19.05 mm, 9.53 mm, 5.6 mm, 4.76 mm, 2.38 mm, 0.42 mm, 0.149 mm, 0.074 mm).
- Böleç : (Kareleme dörtleme böleci) yoksa elle dörtleme yapma için numune kabı ve küçük el küreği.
- Hassas Terazî.
- Numune Kaplar: Çeşitli boy ve ebatla.
- Etüv cihazı (105 ± 2) °C sıcaklık şartını sağlayacak.

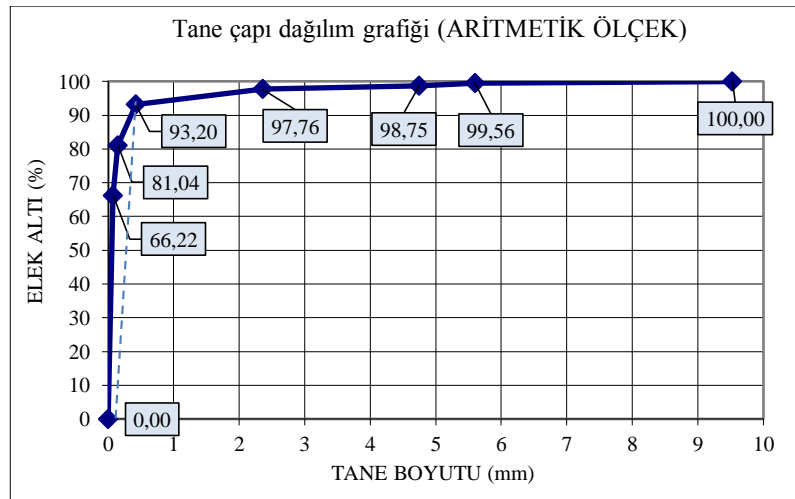
Eleme deneyine killi zemin numunesi ve BOF curufu olmak üzere iki numuneden 1'er kg alınarak etüv cihazına konuldu. Bu malzeme etüv cihazına 24 saat süre ile konularak kurutulması sağlandı. Etüvden çıkarılan kuru malzeme önce tartıldı ve sonra temel elek serisi göz açıklığı olan eleklerin üzerine boşaltılarak, elle eleme için sarsma uygulandı. Elekler elle eleme yöntemiyle elenmiştir. $-75 \mu\text{m}$ malemenin elde edilebilmesi yaş eleme yöntemi uygulanarak, ideal tane sınıflandırılması yapıldı.

Eleme işlemi tamamlandıktan sonra her bir eleğin elek üstü değeri ayrı ayrı kaplara kunularak etüvde kurutuldu. Etüvde kurutulduktan sonra her bir elek, elek altı değeri hassas terazide tartıldı. Her bir elekte kalan miktar çizelge 4.1'e yazılarak incelendi.

Çizelge 4.1. Tane büyüklüğü fraksiyonu tablosu

Tane büyüklüğü fraksiyonu (mm)	Elek Üstü, (gr)	Elek Altı, (gr)	Elek Altı, (%)	TOPLAM (gr)	T. büyü. fraksiyonu (mm)+	Elek Altı (%)	T. büyü. fraksiyonu (mm)+	Elek Altı, (%)
9.53+5.6	4.4	995.6	99.56	1000	9.530	100.00	9.530	100.00
5.6+4.75	8.12	987.48	98.75	1000	5.600	99.56	5.600	99.56
4.75+2.36	9.85	977.63	97.76	1000	4.750	98.75	4.750	98.75
2.36+0.42	45.64	931.99	93.20	1000	2.360	97.76	2.360	97.76
0.42+0.149	121.64	810.35	81.04	1000	0.420	93.20	0.420	93.20
0.149+0.074	148.2	662.15	66.22	1000	0.149	81.04	0.149	81.04
0.074+0	662.15	0.00	0.00	1000	0.074	66.22	0.074	66.22
TOPLAM	1000				0.000	0.00		

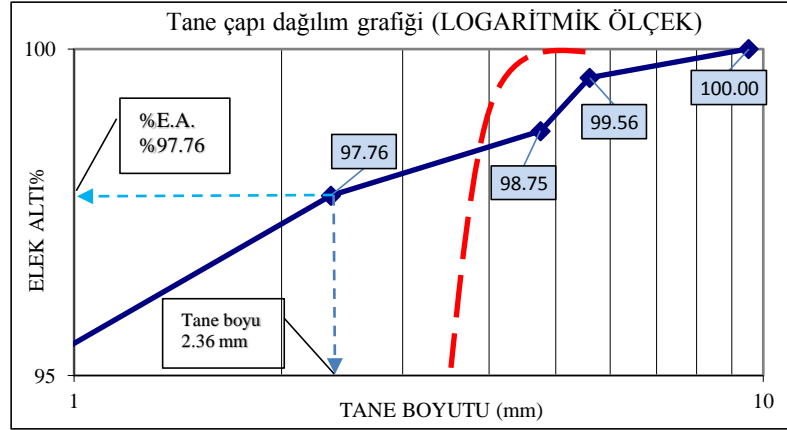
Yukarıdaki çizelge 4.1'de 9.53 mm üstü elekte killi zemin malzemesi kalmadığı için, bu elekten daha geniş aralıktaki temel elek serileri tabloda yazılmadı. Elek altı yüzde (%) miktarları ve elek üstü yüzde (%) hesaplanırken bu duruma dikkat edilerek tane çapı dağılım grafiği (Aritmetik Ölçek) ve tane çapı dağılım grafiği (Logaritmik Ölçek) ıslak elek analizine göre hazırlanmıştır.



Şekil 4.3. Tane çapı dağılımı grafiği (Aritmetik ölçek)

Tane çapı dağılım grafine baktığımızda 0.00-0.42 mm tane boyutundaki zemin numunesi taneleri yüzde (%)93.20 oranında bulunmaktadır. Geriye kalan 0.42-5.6 mm

arasındaki danelerin %6.80 oranında olduğu gözlenmektedir. Bu durum zemin malzemesinin granülometrik yapısının iyi olmadığını göstermektedir.



Şekil 4.4. Tane çapı dağılım grafiği (Logaritmik ölçek)

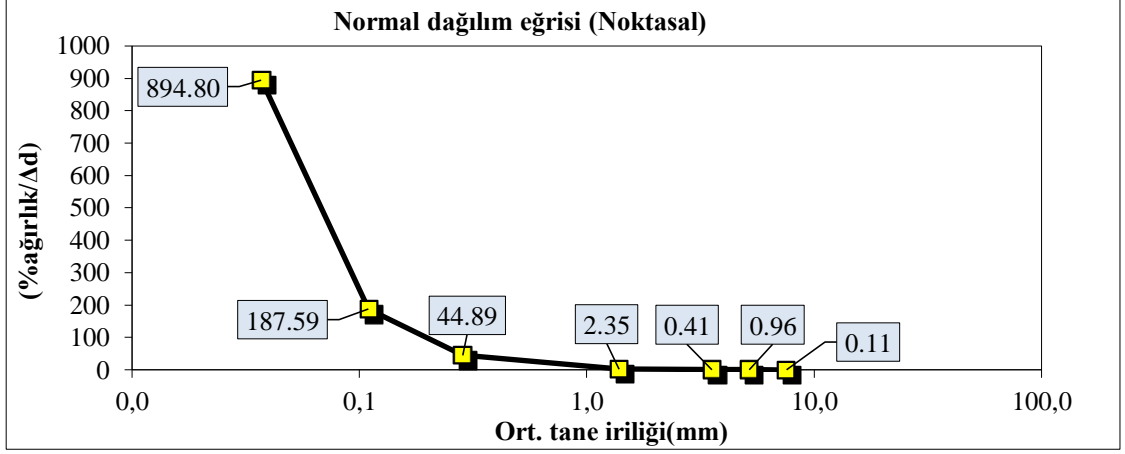
Şekil 4.4’de çizelge 4.1’deki tane büyüklüğü fraksiyonuna (mm) ve elek altı yüzde (%) miktarından faydalanarak logaritmik tablo tipi kullanılarak çizilmiştir. Bu tablo değeri ideal granülometriye sahip bir malzeme değildir. Çizelge 4.1 ve şekil 4.4 değerlerine baktığımızda bu değer; 0.0-2.36 mm tane boyutu malzeme miktarı %97.76’dır. buda zemin numunesi malzemesinin yüksek miktarda killi olduğunu göstermektedir. İdeal tane dağılımına sahip malzemelerde, kırmızı kesikli çizgi gibi (“S”) şekline benzemektedir. Mavi ile gösterilen çizgi bizim zemin numunesinin gerçek değerlerinden elde edilen çizgi şeklindedir. Buradan da anlaşılacağı gibi malzeme düzgün bir dağılım göstermediği anlaşılmaktadır.

Bulunanan elek analiz değerlerine göre iskenderun kili zemin numunelerinin ortalama tane boyutları (ΔD), normal dağılım oranları (%ağılık/ortalama tane iriliği) kümülatif elek dağılımı, Coarseness Index (CI) ve killi zemin numunesi için bulunan değerlere göre normal dağılım grafikleri ve tablosuda (çizelge 4.2) çizilmiştir.

Çizelge 4.2. Tane büyüklüğü fraksiyonu tablosu

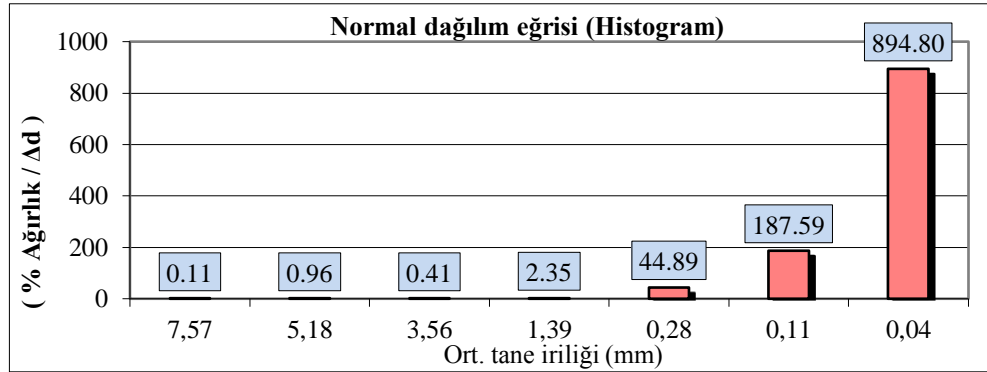
Tane büyüklüğü fraksiyonu (mm)	Elek Üstü, g	Ağırlık%	Toplam	X		Y		Normal Dağ. Oranı (%ağırlık/ Δd)	Δd	Ort.tane iriliği
				EA(mm)	EÜ(mm)	kümülatif dağılım				
9.53+5.6	4.40	0.44	1000	9.53	5.60	100.00	0.44	0.11	3.93	7.57
5.6+4.75	8.12	0.81	1000	5.60	4.75	99.56	1.25	0.96	0.85	5.18
4.75+2.36	9.85	0.99	1000	4.75	2.36	98.75	2.24	0.41	2.39	3.56
2.36+0.42	45.64	4.56	1000	2.36	0.42	97.76	6.80	2.35	1.94	1.39
0.42+0.149	121.64	12.16	1000	0.42	0.15	93.20	18.97	45.05	0.27	0.29
0.149+0.074	148.20	14.82	1000	0.15	0.07	81.04	33.79	185.25	0.08	0.11
0.074+0	662.15	66.22	1000	0.07	0.00	66.22	100.00	945.93	0.07	0.04
TOPLAM	1000	100.0								
Coarseness Index (CI)							163.48			

Çizelge 4.1’de elde edilen değerler temel elek serisi eleklerden elenerek bulunan değerler kullanılarak çizelge 4.2’deki sonuçlar elde edilmiştir. elek üstü (g) miktarlarından ve elek üstü yüzde (%) değerlerinden yararlanarak (X(E.A(mm)), X(E.Ü (mm))-Y(E.A(%)), Y(E.Ü(%) sütun değerleri) kümülatif dağılım değerleri bulunmuştur. Kümülatif E.A (%) değerleri eleğin altına geçen miktardan bir sonraki elek sınıfında üste kalan E.Ü (%) numune miktarı çıkarılarak her bir elek sınıfı için bulundu. tane iriliği (ΔD) belirlenen tane büyüklüğü fraksiyonu için (9.53+5.6 mm elek sınıfında) elek altı (E.A) ve elek üstü (E.Ü) tane boyutlarının (mm cinsinden) farkından (E.A(mm)-E.Ü (mm) değerleri farkı) yararlanarak tane iriliğini (ΔD)’yi bulduk bu işlem ΔD sütunu boyunca yapılarak kayıt edildi. Ortalama tane iriliği değerini ise, çizelge 4.2’de bulunan ΔD değerini ikiye bölerek elde ettik tüm sütun boyunca bu işlem yapıldı ve kayıt edildi. Bu değerler bulunduktan sonra normal dağılım oranı değerini Ağırlıkça yüzde oranını ΔD (tane iriliğine) bölerek herbir elek fraksiyonu bulundu. Bu değer her bir elek sınıfında bulunan tanelerin nekadarlık bir yüzde de bulunduğunu göstermektedir. Bu değerlerde Y sütunlarındaki kümülatif dağılım tablosundaki (E.Ü (%)) miktarları toplanarak Coarseness Index (CI) değeri bulundu. Bu değer kabalık indeksi olarak bilinir ve killi zemin numunesi ve agregalar için bu değer bulunarak malzeminiz hakkında kırma-öğütme devreleri seçimi gibi veya zemin sıkıştırma ekipmanların seçininde rol oynamaktadır. Biz bu Coarseness Index (CI) değerini 163.48 olarak bulduk.



Şekil 4.5. Normal dağılım eğrisi (Noktasal)

Şekil 4.5 ve şekil 4.6'daki normal dağılım eğrileri (noktasal ve histogram) çizelge 4.2'dan yararlanılarak bulundu. Bu çizelgelere göre İskenderun bölgesinden alınan zemin numunesinin 0.0-0.1 mm aralığından zemin numunesi tanelerini yüzde (%)894.80 oranında olduğu gözükmetedir. 0.1-1.0 mm ebatındaki zemin numunesi tanelerinin yüzdece miktarı ise (%)232.48 olarak gözükmetedir. Tane ebatlarına ve bu tane aralığındaki yüzdece miktarları İskenderun bölgesinden alınan numunların kil miktarının yüksek olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.6. Kil numunesi normal dağılım eğrisi (Histogram)

Şekil 4.6'da ise Kil numunesi normal dağılım eğrisinin histogram olarak dağılımı gösterilmiştir. Bu çizelgede 1.0-0.0 mm aralığındaki malzemelerin kütlece yüzdesini şekil 4.5'e göre biraz daha detaylı gösterilmesi istenmiştir. Dikkat edilecek olursa, 0.04 mm malzeme miktarı kütlece yüzdesi (%) 894.80 dir. -75 μm'dan elenen malzeme için elek altı malzeme miktarı kütlece yüzdesi yaklaşık olarak (%) 1127.28 bulunmuştur. Bu yüzde oranındaki (0.28-0.04 mm aralığında) zemin numunesi için yapılacak yorum; Hatay'ın İskenderun bölgesinden alınan zemin numunesi yüksek oranda killidir denilebilir. Daha

sağlıklı yorum yapılabilmesi için deney sayıları arttırılabilir ve farklı deney yöntemleride uygulanabilir.

4.2. Donmaya ve Çözünmeye Karşı Direncin Tayini (TS EN 1367-1)

Atmosfer basıncı altında mevsimsel donma-çözünme taklit edilerek, -75 µm boyutunda killi zemin numuneleri, su ve BOF curufu %3, %6, %9, %12, %15 ve %20 oranlarında karıştırılarak oluşturulan numuneler on kez donma-çözünme döngüsüne tabi tutulmuştur. İklimlendirme cihazında -17.5 °C'a soğutma ve sonrada (oda şartı sıcaklık değerine) yaklaşık 20 °C'ye çıkartılarak hava ortamında donma-çözünme işlemi gerçekleştirilmiştir. Donma-çözünme döngüsünün tamamlanmasından sonra killi zemin numunesi ve BOF karışımının oluşturduğu taneler arasında çatlak oluşumu, kütle kaybı ve mukavemet değişiklikleri kontrol edildi. Deneyde kullanılan malzemeler, cihazlar ve ortam şartları şekil 4.7 gösterilmiştir.

Numune kaplarının hazırlanması, ortam şartları ve cihazlar;

Karışım:

BOF curufu : -75 µm boyutunda 4000 g
Kil : -75 µm boyutunda 5000 g
Su : Deiyonize su (H₂O) 2500 g

Cihazla ve Ekipmanlar:

Kaplar : Ø 50 mm x h 100 mm dikişsiz ve kaynaksız kapaklı çelik kutular 21 adet
Klimatik test kabini : +22 °C ve -17.5 °C arası döngü sağlayabilen
Terazi : Hassas tartım cihazı.
Elekler : 75 µm elek (200 No), 45 µm elek (325 No), temel elek serisi ve çeşitli kaplar.
Kurutma : Etüv cihazı (105±3 °C).

Deney Ortamı:

Sıcaklık : +22 °C'den -17.5 °C arası değişken
Ortam : Kapalı ortam (dış etmenden etkilenmeyen)
PH : Şartı yok. (Oda koşulları).
Nem : Yok. (cihaz işlem ayarında; istenirse)



Şekil 4.7. Deneyde kullanılan cihazlar, numuneler ve ekipmanlar

Hazırlanan deney numuneleri için özel olarak dikişsiz çekme çelikten yapılan kapaklı kaplar yaptırılmıştır (şekil 4.7). Bu kaplara killi zemin numunesi artı BOF curufu ve %10 oranında deiyonize su katılarak yoğunluğu (d) 1.75gr/cm^3 olarak ayarlandı ve böylece atmosferik hava ortamı sağlanarak donma-çözünme işlemine geçildi.

Donma çözünme işlem adımları Klimatik test kabini ID 300'e şöyle kayıt edildi;

- 1) Sıcaklık, (150 ± 30) dakikada (20 ± 3) °C'den 0 (sıfır) °C'e düşürme.
- 2) Ortamı (210 ± 30) dakika süreyle 0 (sıfır) °C'de tutma.
- 3) Sıcaklık, (180 ± 30) dakikada 0 (sıfır) °C'den (-17.5 ± 2.5) °C'e düşürme.
- 4) Ortamı 240 dakika süreyle (-17.5 ± 2.5) °C'de tutma.
- 5) Ortamı -17.5 °C'den 22 °C'ye yükseltme olarak ayarlamıştır. Bu sıcaklık

değerleri arasında bekleme süresi 10.5 saati geçemez. Biz bu tolerans değerlerini de hesaba katarak, bu süreyi 9.5 saat olarak belirlendik.

(Not: Tatil gibi nedenlerle, donma döngüsü sırasında veya elle kontrol sırasında deneye ara verilmesi gerekirse, metal kutular (-17.5 ± 2.5) °C'de muhafaza edilmelidir. Deneye ara verilebilecek azami süre 72 saattir.)

Donma-çözünme İşlem adımları çizelge 4.3'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.3. Donma-çözünme işlem adımları

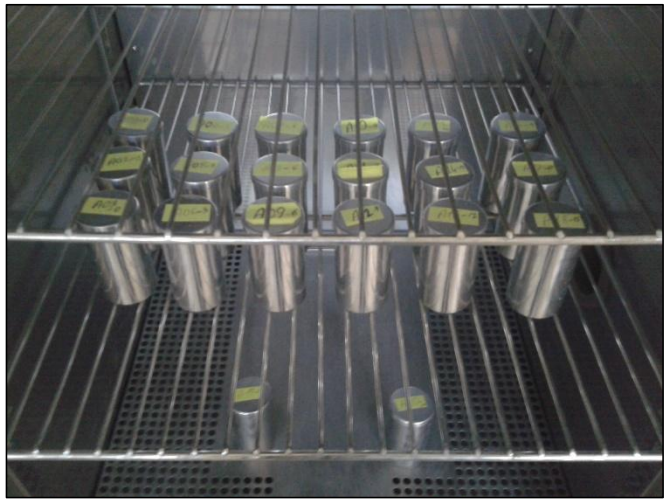
İşlem Sırası	Dondurma İşlemi		Maruz Bırakılan Süre (dk)	Tolerans (dk)
	İlk Sıcaklık (°C)	Son Sıcaklık (°C)		
1. işlem: Soğutma	(20±3) °C	0 °C	150	±30
2. işlem: Bekletme	0 °C	0 °C	210	±30
3. işlem: Soğutma	0 °C	(-17 ± 2.5) °C	180	±30
4. işlem: Bekletme	(-17 ± 2.5) °C	(-17 ± 2.5) °C	240(en az)	-

Hazırlanan karışımlarda çelikhane curufu oranları %0, %3, %6, %9, %12, %15 ve %20'dir. Bu oranlarda her birinden 3'er adet, %20 BOF curufu ve killi zemin numunesi karışımından 2 adet olmak üzere toplam 20 numune hazırlanmıştır. Numune adları A1 den başlayıp A20 kadar, karışım oranı isimleri ise A1-0 (Kap adı-%BOF curufu oranı) şeklinde isimlendirilmiştir (şekil-46, çizelge 4.3).



Şekil 4.8. Numune kapları ve isimlendirilmesi.

Hazırlanan numuneler iklimlendirme cihazına şekil 4.9'daki gibi yerleştirilmiş ve cihaz donma-çözünme işlem adımlarını gerçekleştirmesi için (çizelge 4.3'deki gibi) deney şartlarında olması istenen sıcaklık şartları, bekleme süresi, nemlilik şartları ve çevrim sayısı gibi şartlar cihaz üzerinde ayarlanmıştır.



Şekil 4.9. Donma-çözünme öncesi numunelerin cihaza yerleştirilmesi.

Her bir numune kap ağırlıkları donma-çözünme çevrimine başlanmadan önce ölçülerek her bir numunenin kütlesi (g) M_1 olarak kayıt edildi. Donma-çözünme işleminden sonra aşınma ve kütle kaybı 325 No (-45 μm) elekten elenerek M_2 olarak kayıt edildi. Bu iki değer arasındaki kütlece numune kayıpları yüzdesi ise formülasyon (2) ile hesaplanmıştır. Bulunan değerleri çizelge 4.5’de gösterilmiştir.

Çizelge 4.4. En yüksek donma ve çözünme direnç değerlerine göre kategoriler.

F (Kütlece Yüzde Kayıp)	F Kategorisi
≤ 1	F1
≤ 2	F2
≤ 3	F3
≤ 4	F4
> 4	$F_{(\text{BEYAN})}$
Serbest	$F_{(\text{NR})}$

Donma-çözünme kütlece yüzde kayıp değeri (% F) aşınma miktarı yüzdesine göre bir sınıf (% F kategorisi) oluşturulur. Bu değer 1 ile 4 arasında değer alır. 4’den büyük değer bulunursa bu $F_{(\text{BEYAN})}$ ya da serbest $F_{(\text{NR})}$ olarak adlandırılır. Aşınma miktarı bulunan değer o numune hakkında kesin bir sonuç bildirmese de karışım numunesinin yeni sınıfının ne olduğunu ve buna göre hangi çevre ve iklim şartında değerlendirilebileceği hakkında bilgi edinmemizi sağlayacaktır.



Şekil 4.10. Donma-çözünme sonrası eleme işlemi

Şekil 4.10’da donma-çözünme döngüsü tamamlanan karışım numunelerinin her biri 45 μm (325 No) elekten elenmiştir. Karışım numunelerinin kütle kaybı (M_2) çizelge

4.5’de yerine yazılmıştır. Eleme işlemi elle birkaç dakika sallanarak sağlandı ve elenen numune tartıldıktan sonra atılmıştır.

Çizelge 4.5. Numunelerin M_1 ve M_2 değerleri dağılımı.

Numune No ve BOFC kull.%	Kap Ağ. (g)	Kap + Numune Ağ. (M_1) (g)	D.Ç Sonrası Kap + Numune Ağ. (M_2) (g)	D.Ç Sonrası F Kategori Oranı (%)	F Kategorisi	Ortalama değer (F_{ort}) (%)	F_{ort} göre F Kategorisi
A1-0	61.3	212.49	204.85	3.60	F4	3.82	F4
A2-0	66.2	217.39	209.30	3.72	F4		
A3-0	61.03	212.22	203.40	4.16	$F_{(BEYAN)}$		
A4-3	63.01	214.20	208.50	2.66	F3	3.14	F4
A5-3	62.59	213.78	205.66	3.80	F4		
A6-3	63.12	214.31	207.96	2.96	F3		
A7-6	62.65	213.84	210.39	1.61	F2	1.43	F2
A8-6	60.92	212.11	210.39	0.81	F1		
A9-6	62.87	214.06	210.05	1.87	F2		
A10-9	62.96	214.15	209.13	2.34	F3	1.72	F2
A11-9	63.45	214.64	211.92	1.27	F2		
A12-9	59.78	210.97	207.71	1.54	F2		
A13-12	63.99	215.18	211.44	1.74	F2	1.31	F2
A14-12	62.93	214.12	213.15	0.45	F1		
A15-12	65.4	216.59	212.83	1.74	F2		
A16-15	63.31	214.50	211.17	1.55	F2	1.56	F2
A17-15	57.74	208.93	206.00	1.40	F2		
A18-15	65.39	216.58	212.83	1.73	F2		
A19-20	63.5	214.69	211.70	1.39	F2	1.40	F2
A20-20	55.12	206.31	203.39	1.41	F2		

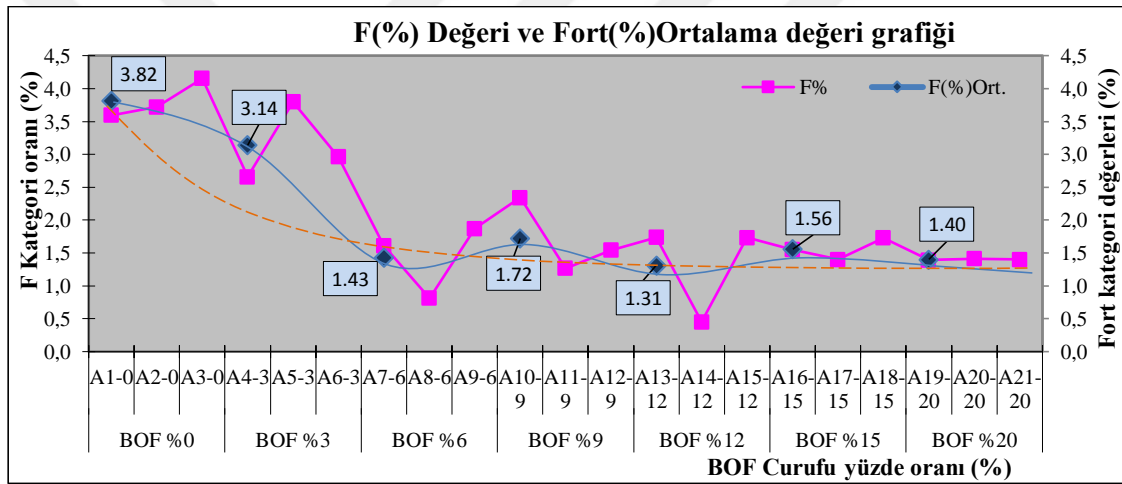
Çizelge 4.5’de her bir karışım numunesinin adlarını, numune ağılıkları, donma-çözünme öncesi ağılıklarını (M_1), donma-çözünme sonrası (M_2) kütle kayıplarını, yüzde F kategorilerini ve ortalama yüzde F değerlerini ve kategorilerini göstermektedir. Yüzde (%) F kategorisi değerleri, ilk kütle değerinden (M_1) donma-çözünme işleminden sonraki kütle kaybı (M_2) değerinin çıkarılarak, numunenin ilk kütle miktarına (M_1) bölünüp 100 ile çarpılması ile bulunmuştur (formül (2)). Bu değerler bulunduktan sonra her ortak yüzde değerinin (Örnek; A1-0, A2-0, A3-0 gibi) ortalaması alınarak F_{ort} değeri bulundu ve bu F_{ort} kategorisine göre yorumlar yapılmıştır.

Çizelge 4.5’deki sonuçlar incelendiğinde donma-çözünme işleminden sonra killi zemin %100 kil numunesi aşınmaları A1-0 için, 3.60 A2-0 için 3.72 ve 4.16’dır. killi zemin numunesi içerisine %3 BOF curufu eklendiğinde A4-3 için 2.66, A5-3 numunesi için 3.80 ve A6-3 numunesi için 2.96 çıkmaktadır. Killi zemin numunesi içerisine BOF curufu yüzdesi arttırıldığında donma-çözünmeden kaynaklanan aşınmalar azalmış ve

kategori sınıfının değiştiği gözlenmiştir. Ancak bu iyileşme %6 ve %15 BOF curufu ekleme aralığında gözlenmede %15 ile %20 BOF arlığında sabit kaldığı gözlenmiştir.

Bu deney yönteminde zemin mukavemetinde artışın önemi büyük olsada asıl istenen bu değildir. Bu deneyde bulunan sonuçlara göre kullanılacak mazlemenin hangi sınıfta olduğu ve hangi şartlarda nasıl kullanılabileceği hakkında fikir vermesi istenilmektedir.

Biz bu deney yöntemi ile killi zemin numunemizin bir sanayi yan ürünü olan BOF curufunun bu killi zemin malzemesine ne gibi bir fayda sağlacadığı ve bu sağladığı faydanın hangi alanda ve çevre iklim şartında kullanılabileceği hakkında bir fikir vermesi için araştırılmıştır. Çizelge 4.5 ve şekil 4.11'den de anlaşıldığı gibi BOF curufunun killi zemin nununesi üzerinde belirli oranlarda karıştırıldığında bir iyileşme sağlamıştır.



şekil 4.11. Donma ve çözünme F değerleri sonucu.

şekil 4.11 değerleri çizelge 4.5'deki F_{ort} değerlerinden faydalanılarak elde edilmiştir. Çizelgeden de görüldüğu gibi aşınma miktarları oranı ($\%F_{ort}$) ile BOF curufu arasında pozitif bir etki var. Ancak sadece bu deney yöntemi ile kesin yargıya varmak doğru olmaz. Daha kesin sonuçlar almak için başka deney yöntemlerinin de uygulanarak daha geniş bir fikir edinilebilir. Bulunan değerlere göre çevre ve iklim şartları tablosu oluşturulmuştur. Çizelge 4.6'da bu şartlar verilmiştir.

Çizelge 4.6. İklim ve çevre şartlarına göre numune talebi kategorileri

Çevre Şartları	İklim Şartları		
	Akdeniz	Atlantik	Kıta Avrupası
Buzlanma yok kuru ortam	X	X	X
Kısmi doygunluk, tuz yok	X	F4	F2
Doygun, Tuz yok	X	F2	F1
Tuzlu ortam (deniz suyu, yol satırları)	F4	F2	F1
Hava alanı satırlı kaplaması	F2	F1	F1

(X: Herhangi bir F şartı yok)

Çevre ve iklim koşulları için oluşturulan çizelge 4.6'daki şartlar kesin olarak sonucu bildirmese de bu yorumlardan yola çıkarak; yol satırlı kaplamaları, zemin düzenleme, bina temel dolgusu, yol dolgusu, liman dolu işlemlerinde ve benzerleri işlemlerde çevre ve iklim şartlarında hava ortamında nasıl etki edeceği hakkında tahminde bulunmaya yardımcı olmuştur. Bulunan sonuçlara göre; killi zemin numunesi içerisinde %6-15 oranında BOF curufu konulduğunda yeni oluşan numune Akdeniz iklim şartında hava alanı satırlı kaplamasına, Atlantik iklim şartına göre doygun, tuz yok çevre şartına ve kıta Avrupası'nda kısmi doygunluk, tuz yok çevre şartına kadar kullanım alanı bulunmaktadır.

4.3. Magnezyum Sülfat Deneyi (TS EN 1367-2)

Bu deney, killi zemin numunesi ve BOF curufu karışımının belirlenen oranlarda periyodik olarak magnezyum sülfata daldırılması ve takiben etüvde kurutulması yolu ile agregaların davranışlarını değerlendirmek için yapılmıştır.

Tane büyüklüğü 75 µm ile 45 µm'un arasında ki tanelerden oluşan killi zemin, BOF curufu ve su ile karıştırılarak, karışım numuneleri hazırlandı. Hazırlanan zemin numunesi doymuş magnezyum sülfat çözeltisine 5 kere daldırıldı ve takiben (110±5)°C'de etüvde kurutuldu. Magnezyum sülfatın tekrar su alması ve killi zemin ve BOF curufu karışımı numunesinde tekrarlanan kristalizasyon ile killi zemin numunesi ve BOF curufu tanelerindeki boşluklarında zararlı etkiler olduğu görülmüştür. Magnezyum sülfat (MgSO₄) deneyi sonucunda 45 µm elekten (325 No) elenerek -45 µm'dan daha küçük malzemelerin oluşmasına neden olan zararlı etkilerin neden olduğu ufalanmalar ölçüldü (çizelge 4.7).

Numune kaplarının hazırlanması, ortam şartları ve cihazlar;

Karışım:

BOF curufu : -75 µm boyutunda 2000 g

Kil : -75 µm boyutunda 4000 g

Su : deiyonize su (H₂O)1000 g (numune içerine katmak için)

Cihazla ve Ekipmanlar:

Kaplar : Ø50 mm x h 100 mm dikişsiz ve kaynaksız kapaklı çelik kutular 21 adet

Filtre kağıdı : -45 µm'dan büyük malzemelerin geçmesine izin vermemeli

Terazi : Hassas tartım cihazı.

Elekler : 75 µm elek (200 No), 45 µm elek (325 No), temel elek serisi, çeşitli kaplar ve 5 l'lik kova.

Cam Mezür : çeşitli 100-1000 ml/ hacminde ölçüm yapabilen (şekil 4.13)

Kurutma : Etüv cihazı(105±3 °C).

Deney Ortamı:

Sıcaklık : 20-22 °C oda sıcaklığı

Ortam : Kapalı ortam (dış etmenden etkilenmeyen)

PH : şartı yok

Nem : Yok (ortam koşullarına uygun olabilir)

Kimyasallar :

Tuz : Magnezyum sülfat (MgSO₄)-Episom yada episomit (MgSO₄+7H₂O) 9 kg

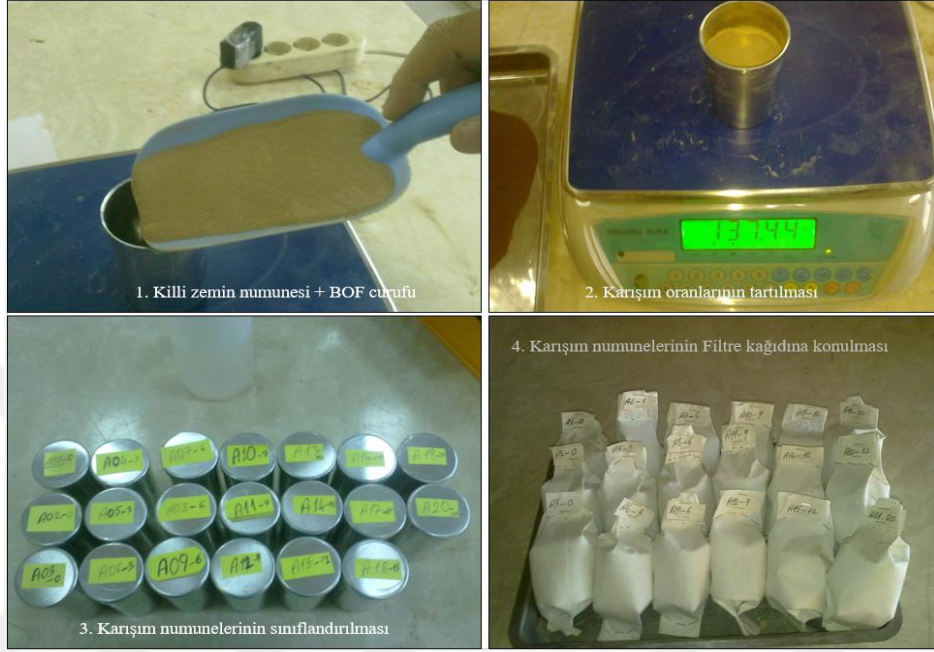
Çözelti : Baryum klorür çözeltisi (BaCl₂) (alikit çözeltisi) MgSO₄ çözeltisinin kontrolü için hazırlanır (%5'lik)

Su : Deiyonize su 6 kg numunelerin konulacağı sıvı ortam için.



Şekil 4.12. Magnezyum sülfat deneyi için kullanılan bazı materyaller.

Ø 50 mm x h 100 mm dikişsiz ve kaynaksız kapaklı çelik kutular hacimleri baz alınarak malzeme miktarını belirlemek için kullanılmıştır. Hacimleri belirlenen killi zemin ve BOF curuları %3, %6, %9, %12, %15 ve %20 oranlarında eklenerek filtre kağıtlarına konulup kaptıldı. her bir karışım numunesi isimlendirilerek deney şartına uygun hale getirildi (şekil 4.13).



Şekil 4.13. Filtre kâğıdı içerisinde konulmuş killi zemin+BOF curufu karışım numuneleri.

Baryum Klorür (BrCl_2) ve Magnezyum Sülfat (MgSO_4) çözeltilerinin hazırlanması:

• **MgSO_4 çözeltisi** : 1000 ml deiyonize su içerisinde 1500 g magnezyum sülfat tuzu eklenerek hazırlanır. Çok yoğun bir karışım çözelti olacağından su biraz ılıtılabilir (en fazla 30°C 'ye kardar). Çözelti hazırlanırken MgSO_4 tuzu(katı) azar azar eklenerek iyice karıştırılır (şekil 4.14).

• **%5'lik Alikot (BrCl_2) Çözeltisi** : 100 ml deiyonize su içerisinde 5 g baryum klorür (BrCl_2) katısı eklenerek hazırlanır. Karışım %5'lik olmalı ve saf su olmalı çünkü musluk suyu içerisinde çeşitli mineraller olduğundan BrCl_2 katısı çeşme suyu içerisinde renk veriyor. %5'lik alikot çözeltisi magnezyum sülfat deney aşamasında magnezyum sülfat çözeltisinin derişim ve çözelti kalitesini ölçmek için kullanıldı (şekil 4.13).



Şekil 4.14. MgSO₄ ve BrCl₂ çözeltisinin hazırlanması.

Magnezyum sülfat deneyi (TS EN 1367-2) işlem adımları;

- Hazırlanan Çözelti içerisine önceden hazırladığımız %0, %3, %6, %9, %12, %15, %20 lik Kil ve Kil+B.O.F karışımları çözelti içerisine batırılır. ((17±0.5) saat boyunca)
- Malzeme çözülden çıkartılarak (2±0.25)saat boyunca suyu süzülür.
- Takiben her bir Malzeme (110±5)°C'lik etüvde (24±1)saat boyunca kurutulur ve (5±0.25) saat boyunca laboratuvar sıcaklığına erişmesi için soğutulur.
- Bir sonraki daldırma işleminde, kabın tabanında toplanan tuz çökeltileri önce çözülür ve çözelti iyice karıştırılarak 30 dakika süre ile beklemeye bırakılır.
- Kaptaki çözeltinin yoğunluğu kontrol edilir. Yoğunluk belirlenmiş aralığın dışında ise çözelti hazırlanmış doymun taze MgSO₄ çözeltiyle değiştirilir.
- Çalışma periyodu (48±2) saat süre ile 5 defa uygulanmalıdır.
- İşlemlerin 5 defa tekrar edilmesinden sonra malzeme (Kil+BOF) soğutulur, her bir sepetteki malzeme magnezyum sülfattan temizlenene kadar musluk suyuyla yıkanır.

İşlem, hazırlanan karışım numuneleri 20 mm'lik çözelti ile kaplanacak şekilde (17±0.5) saat boyunca doymun magnezyum sülfat çözeltili kap içerisine daldırılmıştır. Her numune ile yığılmış tuz depolanmaları ve kap kenarları arasında 20 mm açıklık bırakılmıştır. Deneyin her aşamasında numunelerde herhangi bir danenin kaybolmamasına dikkat edilmiştir. Buharlaşma ve kirlenmeden sakınmak için kabın kapağı kapatılmıştır. Daldırma işleminden sonra her numune çözülden çıkartılarak (2±0.25) saat boyunca suyu süzölmüştür. Takiben her bir sepet (110±5)°C'lik etüvde (24±1) saat boyunca kurutulmuş ve (5±0.25) saat boyunca laboratuvar sıcaklığına erişmesi için soğutulmuştur. Bir sonraki daldırma işleminde, kabın tabanında toplanan tuz çökeltileri önce çözülmüş ve çözelti iyice karıştırılarak 30 dakika süre ile beklemeye bırakılmıştır. Daha sonra, kaptaki çözeltinin yoğunluğu kontrol edilmiştir. Yoğunluğu

belirlenmiş aralığın dışında olduğu durumlarda çözelti hazırlanmış doymun taze $MgSO_4$ çözeltiyle değiştirilmiştir. Daldırma işlemi esnasında numunenin etrafa sıçraması durumunda çözeltinin ölçülen yoğunluğu, süspansiyon halindeki ince dane veya iyon değiştirme etkilerinden dolayı tam sağlanamadığı durumlarda çözelti taze bir çözelti ile değiştirilmiştir. Çalışma periyodu (48 ± 2) saat süre ile 5 defa uygulanmıştır. İşlemlerin 5 defa tekrar edilmesinden sonra numuneler soğutulmuş ve her bir numune magnezyum sülfattan temizlenene kadar musluk suyuyla yıkanmıştır. Şekil 4.14'de yıkama işlemi gösterilmiştir. Bu işlemlerin ardından her deney numunesi etüvde kurutulmuştur. Deney numuneleri $-75 \mu m$ (200 No'lu)'lik elekten elenerek elek üstü kütlesi 0.01 g doğrulukla kaydedilmiştir. Deney sonuçları toplu halde çizelge 4.7'de verilmiştir.



Şekil 4.15. $MgSO_4$ Deneyi işlem adımları.

Magnezyum sülfat ($MgSO_4$) deneyine (TS EN 1367-2) başlamadan önce her bir numune çizelge 4.7'de numune sınıfı (adı) ve ilk ağırlık (M_1) değerleri kayıt edildi. Bu işlemler bittikten sonra $MgSO_4$ aşındırma deneyine başlandı. 5. Periyot (10 gün) sonunda

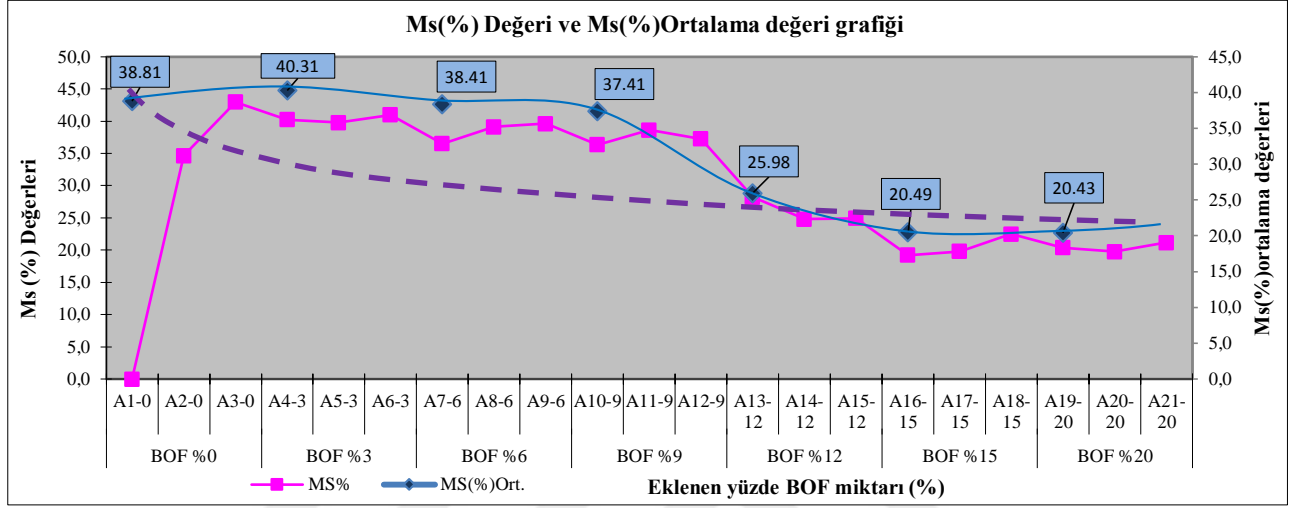
her bir numune $MgSO_4$ aşınma miktarını tespit etmek için 45 μm elek (325 No) ile elendi ve her bir karışım numune değeri tartıldı. Bulunan sonuç Ms_2 değerleri olarak kayıt edildi. Magnezyum sülfat aşındırma deneyi yüzde kayıp oranı ($Ms(\%)$) (3) no'lu formülasyon kullanılarak çizelge 4.7'de kayıt edilmiştir. Bu orana göre çizelge 3.15'teki Ms sınıfı belirlenmektedir. Ms sınıfına göre çizelge 4.1 değerleri kullanılarak çevre iklim şartına göre numune talebi oluşturulmaktadır.

Çizelge 4.7. $MgSO_4$ Deney sonuçları

Numune Sınıfı	Toplam Ağırlıklar (g) + Filt. Kâğ. Ağ.(g)	MS_1 (g)	MS_2 (g)	MS (%)	Ortalamalar (%)
A1-0	140.47	137.44	0.00 (Hata)	0.00 (Hata)	38.81
A2-0	141.83	137.44	88.3	34.65	
A3-0	142.22	137.44	76.32	42.98	
A4-3	141.48	137.44	80.55	40.21	40.31
A5-3	141.15	137.44	81.32	39.76	
A6-3	141.84	137.44	79.35	40.95	
A7-6	141.43	137.44	85.8	36.51	38.41
A8-6	142.32	137.44	81.8	39.09	
A9-6	142.75	137.44	80.88	39.62	
A10-9	141.12	137.44	86.16	36.34	37.41
A11-9	142.31	137.44	82.5	38.61	
A12-9	141.77	137.44	84.6	37.27	
A13-12	141.21	137.44	97.6	28.21	25.98
A14-12	141.47	137.44	102.36	24.80	
A15-12	141.27	137.44	102.22	24.93	
A16-15	141.32	137.44	110.3	19.20	20.49
A17-15	141.15	137.44	109.5	19.79	
A18-15	141.72	137.44	105.6	22.47	
A19-20	141.37	137.44	108.66	20.36	20.43
A20-20	142.24	137.44	109.32	19.77	
A21-20	140.9	137.44	107.62	21.16	

Çizelge 4.7'de Magnezyum sülfat deneyi sonuçları verilmiştir. Her bir numunenin isimleri A1-0 (1. Kap A numunesi yüzde (%) BOF oranı 0) şeklinde ifade edilmiştir. Yüzde BOF curufu oranı killi zemin numunesinin kütlece (g) oranına göre hesaplandı. Deney öncesinde Her bir numunenin ağırlığı hassas terazide (0.01 g duyarlılıkta) tartıldı ve M_1 olarak kayıt edildi. Karışım numunelerine magnezyum sülfat deneyinden sonraki kütle kaybı M_2 olarak kayıt edildi. Bulunan bu değerlerden sonra ilk kütle (M_1) son kütle kaybı (M_2) çıkarılıp ilk kütle kaybına bölünerek 100 ile çarpıldı böylece formül (3)'deki % Ms değeri elde edilerek çizelge 4.7'de yerine yazıldı. Deneyde her bir karışım

oranından 3'er adet olmak üzere toplam 21 adet deney numunesi hazırlanmıştır. Hazırlanan her bir numune aynı karışım numuneleri deney sonrası (%Ms) değerleri ortalaması alınarak %Ms_{ort} değerleri bulunmuştur. %Ms kategori değerleri ve yorumları bu %Ms_{ort} değerine göre yorum yapıldı. Deney ile ilgili tüm değerler çizelge 4.7'e yazıldı ve şekil 4.16'da farklı oranlarda BOF curufu karışımları sonucunda elde edilen yüzde kayıp oranı eğrisi verilmiştir.



Şekil 4.16. Karışımın (BOF+kil) Ms (%) yüzde kayıp oranları

Şekil 4.16'da, çizelge 4.7'e göre hazırlanmış grafik gösterilmektedir. En iyi sonuçları %12, %15 ve %20 oranlarında BOF curufun killi zemin numunesi içerisine eklenmesi ile bulunmuştur. %12 BOF curufu eklenmiş karışım için %25.98 iken %15 BOF curufu eklenmiş karışım için bulunan %Ms değeri %20.49'dur. %20 BOF curufu eklenmiş karışım için ise %Ms değeri neredeyse sabit kalmış denilebilir.

Çizelge 4.8. Magnezyum sülfat kullanılarak elde edilen Ms (%) Kategorileri.

Ms (Kütlece Kayıp)	Ms Kategorisi
≤ 18	Ms18
≤ 25	Ms25
≤ 35	Ms35
> 35	Ms(BEYAN)
Serbest	Ms(NR)

Yukarıdaki çizelge 4.8'de magnezyum sülfat aşındırma deneyi sonucuna göre çıkan sonuçların hangi Ms katagorisinde değerlendirileceği her bir killi zemin BOF curufu karışımı için belirlendi. Her karışım oranlarından 3'er adet alındı ve bu değerlerin ortalaması çizelge 4.7'de gösterildi. Bu %Ms ortalamalarına göre; %3'lük BOF curufu

killi zemin karışımı numune Ms_(BEYAN), %6'lık karışım Ms_(BEYAN), %9'luk karışım Ms_(BEYAN), %12'lik karışım Ms25, %15'lik karışım Ms25 ve %20'lik karışım Ms25 olarak bulunmuştur. Bulunan bu değerler çizelge 4.9'daki çevre ve iklim şartları tablosunda değerlendirilmiştir. Burada unutulmamalıdır ki bulunan değerler, kesin bir yargı bildirmemektedir. Sadece aşınma sonrası killi zemin BOF curufu karışım numunelerinin nasıl değerlendirileceği hakkında bilgi edinmemizi sağlamıştır.

Çizelge 4.9. Çevre ve iklim şartlarına göre numune talebi kategorileri.

Çevre Şartları	İklim Şartları		
	Akdeniz	Atlantik	Kıta Avrupası
Buzlanma yok, kuru ortam	X	X	X
Kısmi doygunluk, tuz yok	X	Ms35	Ms25
Doygun, tuz yok	X	Ms25	Ms18
Tuzlu ortam (deniz suyu, yol satırları)	Ms35	Ms25	Ms18
Hava alanı satırlı kaplaması	Ms25	Ms18	Ms18

(X: Herhangi bir Ms şartı yok)

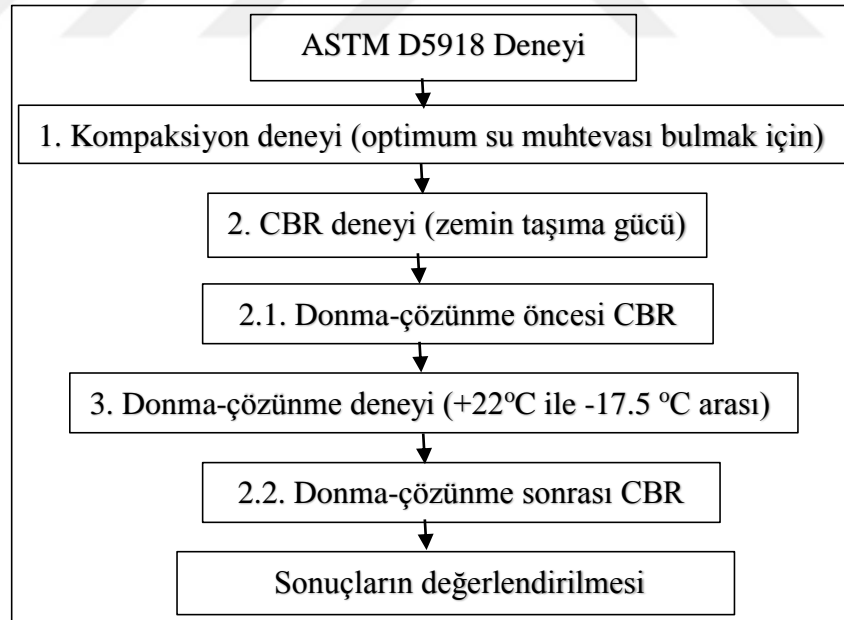
Magnezyum sülfat deneyi sonucunda aşındırılan killi zemin ve BOF curufu karışım numunelerinde bazı değişimler gözlenmiştir. Killi zemin numunesine %3, %6 ve %9 oranlarında BOF curufu eklendiğinde tuzlu sıvı ortamında aşınmaya karşı direnç çok fazla olmasa da en iyi sonucu killi zemin numunesine %12, %15 ve %20 oranlarında BOF curufu eklendiğinde elde edilmiştir. Elde ettiğimiz sonuçlara göre killi zemin numunesine %12, %15 ve %20 oranlarında BOF curufu eklendiğinde Akdeniz ve Atlantik iklim şartlarına göre tüm çevre şartlarına uygun olduğu gözlenmiştir. Ancak Kıta Avrupası İklim şartlarına göre; “Buzlanma yok, kuru ortam” ve “Kısmi doygunluk, tuz yok” çevre şartı kullanımına uygun iken, “Doygun, tuz yok”, “Tuzlu ortam (deniz suyu, yol satırları)” ve “Hava alanı satırlı kaplaması çevre şartlarına uygun değildir.

Killi zemin numunesine BOF curufu malzemesinin çevre ve iklim koşullarına göre oluşturulan çizelge 4.9'daki şartlar kesin olarak sonucu bildirmemektedir. Bu yorumlardan yola çıkılarak; yol satırlı kaplamaları, zemin düzenleme, bina temel ve yol dolgu alanlarında, liman dolgu işlemlerinde ve benzerleri işlemlerde çevre ve iklim şartlarında sıvı ortamda nasıl etki edeceği hakkında tahminde bulunmaya yardımcı olmuştur.

4.4. Zemin Numunelerinin Donma Kabarma Miktarları ASTM D 5918 (2006)

Zemin numunelerinin kabarma miktarı deneyi, Hatay'ın İskenderun bölgesinden alınan killi zemin numunesi içerisinde İSDEMİR A.Ş'den getirilen BOF curufu CBR kaplarına optimum su miktarları belirlenip karıştırılarak sıkıştırıldı. Bu numunelerin iklimlendirme cihazında belirlenen sıcaklık (+22°C ile -17.5 °C) değerlerinde donma-çözünme döngüsü 10 kez tekrarlanarak donma-çözünme öncesi CBR ve donma-çözünme sonrası CBR arasındaki ilişki izlenmiştir.

ASTM D 5918 zeminnlerin donma kabarma hassasiyetinin belirlenmesi deneyi standarda uygun olarak yapılmıştır. Çalışma kapsamında numuneler üç'er örnek olmak üzere hazırlanmış, İSDEMİR A.Ş'den alınan BOF curufu Killi zemin numunesi içerisinde karıştırılarak belirlenen oranlar doğrultusunda donma-çözünme işlemi yapılmıştır. Deney numuneleri %3, %6, %9, %12, %15 ve %20 oranlarında İskenderun bölgesinden alınan zemin numunesi ile karıştırılarak yük-penetrasyon miktarları donma-çözünme öncesi ve donma-çözünme çevrim sonrası değerleri incelenmiştir. ASTM D 5918 deney çalışması aşağıdaki işlem adımları izlenerek yapılmıştır.



Şekil 4.17. ASTM D5918 işlem adımları.

Killi zemin numunelerinin kabarma miktarının belirlenmesi için 3 farklı deney yapılmıştır. Bu deneyler çalıştığımız bölgenin doğadaki zemin yapısının en iyi şartlarda (su içeriği ve sıkılığı gibi) nasıl karakteriksel bir özellik gösterdiğini anlamak için yapıldı.

Bu deneyler; başta kompaksiyon deneyi olmak üzere, CBR ve donma-çözünme deneyleridir. Kompaksiyon deneyi İskenderun bölgesindeki killi zemin numunesinin optimum su muhtevasını belirleyerek zemin malzemesinin maksimum sıkılığını bulmak için yapıldı. Optimum su içeriği ve sıkılığı bulunan killi zemin numunesi için CBR (California Bearing Ratio) zeminlerin sıkıştırma deneyi yapıldı. İklimsel sıcaklık çevrimini taklit etmek için ise iklimik test kabini ID 300 (şekil 3.21) ile belirlenen sıcaklık değerleri arasında 10 çevrim donma-çözünme işlemi yapıldı. Donma-çözünme işlemi tamamlandıktan sonra tekrardan CBR deneyi yapıldı ve donma-çözünme öncesi ve sonrası CBR değerleri arasındaki ilişki incelendi.

ASTM D 5918 deneyi numune kaplarının hazırlanması, ortam şartları ve cihazlar;

Karışım:

BOF curufu : -75 µm boyutunda 2000 g
Kil : -75 µm boyutunda 4000 g
Su : gerekli miktarda musluk suyu (numune içerine katmak için)

Cihazla ve Ekipmanlar:

Kaplar : CBR kabı (mold)
Nanometreler : milimetre hassaslığında karışım numunelerinin kabarmasını ölçmede.
Terazi : Hassas tartım cihazı.
Elekler : 75 µm elek (200 No), 45 µm elek (325 No), temel elek serisi, çeşitli kaplar
Cam Mezür : çeşitli 100-1000 ml/ hacminde ölçüm yapabilen (şekil 4.13)
Kurutma : Etüv cihazı (105±3 °C)
İklimlendirme cihazı: çevrimsel sıcaklık ayarı sağlayan. (+22°C ile -17.5 °C'de 10 kez)
Su tankı : CBR kalıplarını suda bekletmek için.

Deney Ortamı:

Sıcaklık : 20-22 °C oda sıcaklığı (cihaz içi belirlenen değerler)
Ortam : Kapalı ortam (dış etmenden etkilenmeyen)
PH : şartı yok
Nem : Yok (ortam koşullarına uygun olabilir) diğer şartlar yapılacak bağlı deneyler için ayrıca belirtildi.

Zeminlerin donma kabarma miktarı deneyi için CBR deneyi yapmadan önce her bir zemin karışım oranı için ayrı ayrı kompaksiyon deneylerinin belirlenmesi gerekmektedir. Yapılan deneyler sonucunda zemin kabarma miktarlarına bağlı olarak indeks özellikleri ve arasındaki bağıntıda anlaşılması olacaktır.

4.4.1. Kompaksiyon (Proktor) Deneyi

Bu deneyin amacı, bir çekicinin 30.5 cm yükseklikten 25 kez bırakılarak sıkıştırılmış zeminde maksimum kuru birim hacim ağırlığı ve uygun değer su muhtevası bulma işlemine kompaksiyon denir. Yöntemin amacı ise ideal su miktarını bulan ideal bir sıklık ve enerji tasarrufunu bulmaktır.

Deneyler sonucunda belirlenen donma kabarma hızları ile zemin numunelerinin donma-çözünme sonrası mukavemet kayıpları arasındaki ilişkiler incelenmiştir. Bu amaçla farklı geoteknik özelliklere sahip 24 adet zemin numunesi üzerinde donma-çözünme deneyleri yapılmıştır. Tüm zemin numuneleri maksimum kuru birim hacim ağırlık ve optimum su muhtevasında Standart Proktor enerjisi ile sıkıştırılarak hazırlanmıştır. Bulunan bu değerler şekil 4.18’de ve şekil 4.19’da verilmiştir.

Karışım:

BOF curufu : -75 µm boyutunda 2000 g
Kil : -75 µm boyutunda 4000 g
Su : gerekli miktarda musluk suyu (numune içine katmak için)

Cihazla ve Ekipmanlar:

Metal kap : Mold kabı (Standart Proktor)
Metal tokmak : Metal tokmak(Proktor çekici, serbest düşme için)
Palet Bıçağı : Numune yüzeyini düzeltmek için
Metal tepsi : Karışım numunesine kıvam suyunu karıştırmak için
Terazi : hassas terazi 0.001 g duyarlıkta
Metal ve plastik kürek: Numuneleri karıştırmak, Mold’a koymak ve Mold’dan parça almak için.

Deney, kurutulmuş Killi zemin numunesi ve belirlenen oranlarda BOF curufu killi zemin numunesi daneleri, önce killi zemin numunesi karışımına bir miktar su ilave edilerek karıştırılır. oluşturulan killi zemin numunesi karışımı üç tabaka halinde metal kap (mold) içine her seferinde kabın 1/3 ü kadar tabakalar halinde ve her tabaka 25 defa metal tokmak düşürülerek sıkıştırıldı. Killi zemin karışımı sıkıştırılırken metal tokmak killi zemin karışım numunesinin değişik yerleri üzerinde serbest düşmeyle bırakıldı. Bu şekilde 3 tabaka halinde sıkıştırılarak doldurulan metal kap üzerindeki fazlalıklar traşlandıktan sonra tartıldı ve su muhtevasının belirlenmesi için sıkışmış killi zemin karışım numunesi yüzeyinden, alt yüzeyinden ve ortakısından 3 parça kaplara alındı ve daha doğru bir nem miktarı belirlemek üzere aynı sıkışmış killi zemin karışım

numunesinden parçalar alındı. Bu numune önce yaş halde iken tartıldı ve sonra etüvde kurutulduktan sonra kuru ağırlığı ölçüldü.

Bu işlem 4-5 defa tekrarlanarak değişik su muhtevaları için kuru birim hacim ağırlıkları tespit edildi. Deney tekrarının çoğaltılması kuru birim hacim ağırlık, su muhtevanın grafiği üzerinde daha fazla veri elde edilmesi anlamına geleceğinden deneyde daha hassas bir sonuç elde edilmesini sağlar.

Kompaksiyon (Standart Proktor) deneyi işlem adımları;

1) 200 No'lu elek altına geçen yaklaşık 5 kg'lık killi zemin numunesi alındı. Ağırlığı bilinen killi zemin numunesi bir kap içinde belirli bir miktar su eklenerek su muhtevası değeri artırıldı.

2) Proktor kalıbının ağırlığı ölçüldü ve not edildi.

3) Kompaksiyon için kalıba yaka (extension) takıldı.

4) Killi zemin numunesi karışımı kalıba üç tabaka halinde yerleştirildi ve her tabaka proktor çekici 25 kere killi zemin numunesi yüzüne düşürülerek sıkıştırıldı.

5) Kalıptaki killi zemin numunesi örselenmeden yaka çıkarıldı.

6) Sıkışmış zemin ve kalıbın toplam ağırlığı belirlendi ve not edildi.

7) Sıkıştırılmış zemin kalıptan çıkarıldı ve 20-30 gr'lık bir killi zemin numunesi alınarak killi zeminin numunesinin su muhtevası belirlenir.

8) Zemin kaba boşatıldı ve bir miktar su eklenerek tekrar karıştırıldı ve deney tekrarlandı. Kap içerisindeki numune ağırlığı bir önceki numune ağırlığından büyük olana kadar aynı işlemlere devam edildi ve bulunan tüm değerler not edildi.

9) Kap içerisinde ki numune ağırlığı bir önceki tartım ağırlığından daha küçük çıktığından ilgili karışım oranı killi zemin numunesi için işlem sonlandırıldı ve yeni killi zemin numunesi ve BOF curufu karışım oranı hazırlanarak yeni kompaksiyon deneyine geçildi.

İlgili deney için killi zemin numunesi artı BOF curufu karışım değerleri killi zemin numunesi içerisine %3 BOF curufu, %6 BOF curufu, %9 BOF curufu, %12 BOF curufu, %15 BOF curufu, ve %20 BOF curufu, eklenmiş karışım numunelerinin her biri için kompaksiyon (standart proktor) deneyi yapıldı. Çizelge 4.10'da sadece %100 killi zemin numunesi (BOF curufu içermiyor) kompaksiyon (standart proktor) deneyi sonuçlarını göstermektedir. Diğer killi zemin numunesi içerisine BOF curufu yukarıdaki belirlenen oranlarda harmanlarak her biri için kompaksiyon değeri bulundu.

Çizelge 4.10. Kompaksiyon deneyi değerleri (%100 Killi zemin numunesi %0 BOF curufu).

Deney No	1		2		3		4		5		6	
Islak Numune ve Kalıp Ağırlıkları (gr)	6314.5 (1)		6404.5		6476		6567		6624.5		6605.5	
Kalıp Ağırlığı (gr) - yakasız	4832.5 (2)		4833.5		4834.5		4835.5		4836.5		4837.5	
Islak Numune Ağırlığı (gr) M	1482 (3)		1571		1641,5		1731,5		1788		1768	
Doğal Birim Hacim Ağırlığı (gr/cm ³) (γ _n)	1.550 (4)		1.643		1.717		1.811		1.870		1.849	
Kap No	2	42	45	13	43	25	1	24	46	3	26	27
Islak Numune ve Dara Ağırlığı (gr)	96.8 (5)	110.99	113.27	100.84	114.51	108.21	87.47	103.46	152	116.8	139.11	145.05
Kuru Numune ve Dara Ağırlığı (gr)	93.47 (6)	108.5	109.56	96.05	109.07	101.85	81.57	95.7	137.92	105.58	122.57	118.06
Su Ağırlığı (gr)	3.33 (7)	2.49	3.71	4.79	5.44	6.36	5.9	7.76	14.08	11.22	16.54	26.99
Dara Ağırlığı (gr)	43.92 (8)	66.45	64.61	48.54	61.17	46.05	41.47	42.01	63.71	47.71	40.71	41.66
Kuru Numune Ağırlığı (gr)	49.55 (9)	42.05	44.95	47.51	47.9	55.8	40.1	53.69	74.21	57.87	81.86	76.4
Su Muhtevası (%) w	6.720(10)	5.922	8.254	10.082	11.357	11.398	14.713	14.453	18.973	19.388	20.205	35.327
Ortalama Su muhtevası (%) (W _{ort})	6.321		9.168		11.377		14.583		19.181		27.766	
Kuru Birim Hacim Ağırlığı (gr/cm ³) (γ _k)	1.458		1.505		1.542		1.581		1.569		1.447	

Çizelge 4.10’da kontrol amaçlı İskenderun bölgesinden getirilen killi zemin numunesine (%100 killi zemin numunesi) kompaksiyon deneyi yapılmıştır. bu deneyin amacı belirlenen oranlarda BOF curufu katıldığında zemin sıkışma miktarında ve optimum su miktarında bir değişme olup olmadığını gözlemektir. Deneyin işlem adımları şöyledir.

1) Deneye başlama aşamasında, ilk önce %100 kil (BOF curufu yok) zemin numunesi için şekil 4.18’deki işlem adımları izlenir. İlk önce bir tepsi içerisine killi zemin numunesi hazırlanır. İçerisine %3 oranda su eklenerek iyice karıştırılır. Standartlarca belirlenen oranlarda önce kabın 1/3’üne numune konularak, Proktor çekici ile 25 düşüm yapılarak 1. katman sıkıştırılır. Sonra 2/3’lük kısmı numune ile doldurulup Proktor çekici ile 25 düşüm yapılır. Son olarak kabın tamamı (3/3) numune ile doldurulup 25 düşüm yapılır ve mold’un yakası çıkarılarak yüzeyi ıspatula ile kesilerek düzlenir. Numune+mold kabı tartılır ve tabloda yerine yazılır (1)¹.

2) Proktor mold’unun yakası çıkarılarak (şekil 4.18 resim 3,4,5) ağırlığı tabloda yerine kayıt edilir (2)¹.

3) Numune+mold kabının ağırlığından mold kabının ağırlığı çıkartılarak ıslak numune ağırlığı bulunur (3)¹.

4) Islak numune ağırlığı Mold kabının hacmine bölünerek doğal birim hacim ağırlığı (ıslak birim hacim ağırlığı) bulunur (4)¹.

5) Numune Mold kabından çıkarılarak veya kabın içerisinde iken numunenin üst kısmından, orta kısmından ve alt kısımdan parçalar alınarak (şekil 4.18-resim 7) tartım yapılır ve tabloda ıslak numune ve dara ağırlığı yazılır (5)¹. NOT: bu işlem sırasında kap ağırlıklarında (şekil 4.18-resim 7'deki) tartılarak yazılır (8)¹.

6) Islak numune ağırlığı belirlendikten sonra numune kabı etüve konur 24 saat sonra çıkartılarak Kuru numune ve kap ağırlığı yazılır (6)¹.

7) Kap ağırlığından numune kabının darası çıkarılarak. Kuru numune ağırlığı bulunur (9)¹.

8) Kuru numune ve dara ağırlığından (g) (5)¹, ıslak numune ve dara ağırlığı (g) (6)¹ çıkarılarak su ağırlığı (g) (7)¹ bulunur.

9) Buradan bulunan su ağırlığını (7)¹, kuru numune ağırlığına (9)¹ bölüp 100 ile çarparsak su muhtevasını (%w) buluruz (10)¹.

10) Deneyde (5,6,7,8,9)¹ işlem adımlarının daha sağlıklı olabilmesi için birer numune daha alınır. Böylece bulunan iki numune değeri için ortalama su muhtevası (% W_{ort}) bulunur (11)¹.

11) Bulunan ortalama su muhtevasına göre; kuru birim hacim ağırlığı (12) formülde yerine konularak bulunur (12)². [tabloda: (12)=(4)/{1+(11)/100}] böylece 100% killi zemin numunesi için %3'lük su muhtevası (Deney No 1) işlemi bitmiş olur. Ancak işleme, bir önceki su muhtevası deneyi için belirlenen ıslak numune ağırlığından (3)¹ daha küçük değer bulunana kadar devam edilir.

¹ Çizelge 4.10'daki tabloda parantez içi ile numaralandırılmış Kompaksiyon deneyi işlem adımları.

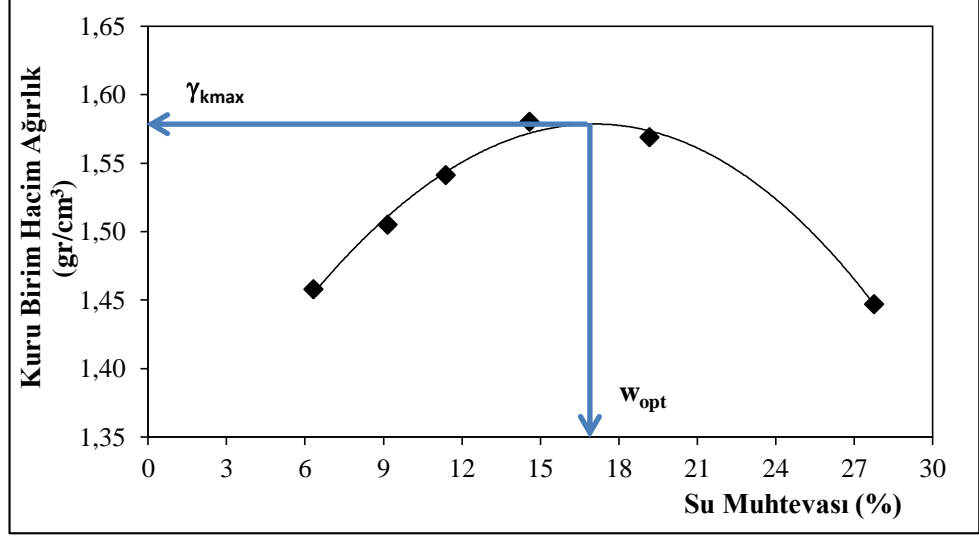
² Kuru birim hacim ağırlığı hesaplamada kullanılan basitleştirilmiş Excel formülü. Formül ayrıca kompaksiyon hesaplamaları temel bağıntısında verilmiştir.



Şekil 4.18. Kompaksiyon (standart Proktor) deneyi işlem adımları

Şekil 4.18’de kompaksiyon deneyinin İskenderun teknik üniversitesi inşaat mühendisliği zemin geotekniğinde yapılmış kompaksiyon deneyinin işlem adımları gösterilmiştir.

1. Kompaksiyon deneyi için gerekli malzemeler ve ekipmanlar.
2. Kompaksiyon kabının (mold) yağlanması.
3. boş kap ağırlığının alınması.
4. Kompaksiyon işlemi (killi zemin numunesi ve killi zemin karışımının sıkıştırılması).
5. Sıkıştırılan malzemenin yüzeyinin düzeltilmesi.
6. Mold kabına sıkıştırılmış killi zemin numunesi veya killi zemin karışımının tartılması.
7. Her sıkıştırılmış killi zemin karışımından alınmış nemli parçaların tartımı.



Şekil 4.19. Kil numunesi kuru birim hacim ağırlığı su muhtevası grafiği.

Şekil 4.19, çizelge 4.10'da verilen Kompaksiyon (standart proktor) deneyi sonuçları kullanılarak yapıldı. Çizelge 4.10 %100 killi zemin numunesi için optimum su içeriğini bulmak için yapılan toplam 5 kompaksiyon deneyin sonucu bulunmuştur. Bulunan kuru birim hacim ağırlık (gr/cm^3) değerleri ve yüzde su muhtevası (%) değerleri için grafik oluşturuldu. Bu grafiğin tepe noktasından X eksenine ve Y eksenine dik çizilen doğruların değeri ortalama su muhtevasını ve ortalama kuru birim hacim ağırlığını (gr/cm^3) vermektedir.

Bu değer(%100 Killi zemin numunesi için);

- Kuru birim hacim ağırlığı (γ_{kmaxs}) = $1.58 \text{ (gr}/\text{cm}^3)$
- Optimum su muhtevası (ω_{opt})= %17

İSDEMİR A.Ş'den getirilen BOF curufu killi zemin numunesine %3, %6, %9, %12 %15 ve %20 oranlarında harmanlanacak her bir numune içinde kompaksiyon değerleri bulundu. Buluna bu derğerlere göre killi zemin numunesi artı BOF curufu karışımlarının maksimum sıkıştırılabilmesi için belirlenen bu karışım numunelerine eklenencek optimum su miktarı ve kuru birim malzeme miktarı belirlenmiş oldu. Bulduğumuz bu değerler göre CBR deneyi için de ideal değerleri bulunmuştur.

4.4.2. CBR Deneyi

Kaliforniya taşıma oranı deneyi belli boyutları olan bir pistonun özel olarak sıkıştırılmış bir numuneye belirli derinliğe kadar batması için gerekli basıncın, aynı

pistonun düzgün bir gradasyon olan kırma taştan hazırlanmış bir numunede aynı batmayı sağlayan basınca oranı olarak tanımlanan ve yüzde olarak ifade edilen bir sayıdır.

CBR deney standardına göre, İSTE İnşaat Geoteknik Laboratuvarında ASTM D 5918 zeminlerin kabarma miktarını tespit etmek için bir dizi deney yapılmıştır. Bu kapsamda B-0 (%100 Kil), B-3 (%3 BOF), B-6 (%6 BOF), B-9 (%9 BOF), B-12 (%12 BOF), B-15 (%15 BOF), B-20 (%20 BOF) ve B-100 (%100 BOF) olmak üzere 8 numune üzerinde D.Ç öncesi CBR ve D.Ç sonrası CBR olmak üzere 16 adet CBR değeri hesaplanmış ve bu değerler arasındaki ilişki incelenmiştir.

Deneyler sonucunda belirlenen donma kabarma hızları ile zemin numunelerinin donma-çözünme sonrası mukavemet kayıpları arasındaki ilişkiler incelenmiştir. Bu amaçla farklı geoteknik özelliklere sahip 16 adet zemin numunesi üzerinde donma-çözünme deneyleri yapılmıştır. Hatay ili İskenderun ilçesinden alınan killi zemin numunesi ve İskenderun ilçesi İSDEMİR A.Ş'den alınan BOF curufunun standart kompaksiyon deneyinde bulunan yoğunluklarda sıkıştırılarak CBR (Kaliforniya taşıma oranı) deneyi yapılmıştır.

Karışım:

BOF curufu : -75 µm boyutunda 5000 g
Kil : -75 µm boyutunda 5000 g
Su : Kompaksiyon deneyinde belirlenen oranlarca Kil ve BOF karışımına katılmak üzere musluk suyu.

Cihazla ve Ekipmanlar:

Metal kap : Mold kabı (standart proktor).
Metal tokmak : 4.5 kg'lık kompaksiyon tokmağı.
Palet Bıçağı : Numune yüzeyini düzeltmek için.
Metal tepsi : Karışım numunesine kıvam suyunu karıştırmak için.
Terazi : hassas terazi 0.001 g duyarlıkta.
Metal ve plastik kürek: Numuneleri karıştırmak, Mold'a koymak ve Mold'dan parça almak için.
Metal disk : D = 15 cm ve H = 5 cm, 3 adet.
Mikrometre : Piston penetrasyonunun ölçülmesini ve penetrasyon hızının denetlenebilmesini sağlayacak 0.01 mm bölüntülü, 25 mm kapasiteli göstergeli.
Kurutma fırını: Yaş numuneleri kurutmak için 110±5°C sıcaklık verebilen termostatik cihaz.

Etüv cihazında kurutulmuş -75 µm boyutunda 5000 g killi zemin malzemesi ve -75 µm boyutunda 5000 g BOF curufu hazırlandı. Zeminin su muhtevası kopmpaksiyon deneyinde belirlenen orana göre tespit edildi. Numune Standart sıkıştırma deneyinde bulunan optimum su muhtevası değerine kadar su ile karıştırıldı. Bu su muhtevasını yakalayınca numune iyice karıştırıldı. Standart sıkıştırma deneyindeki Maksimum kuru yoğunluk değeriyle CBR kalıbını dolduruldu, malzeme miktarı hesaplandı ve bu malzeme metal tepsiye ayrıldı. Sıkıştırma metoduna göre 15.24 cm (6")'lik CBR kalıbında sıkıştırılacak olan numune şartnamesinde verilen sıkışmayı sağlayacak şekilde optimum rutubetin tolerans sınırları içindeki bir su içeriğinde sıkıştırıldı. Sıkıştırma işlemi sırasında, ilave yakası takılmış olan kalıp, taban plakası üzerine bağlandı ve aralık diski yerleştirildi aralık diski üzerine, kalıp çapında kesilmiş olan filtre kâğıdı konuldu ve numune istenilen metotla sıkıştırıldı. Sıkıştırma işlemi bittikten sonra ilave yaka çıkartıldı ve kalıbın üst seviyesi hizasında çelik çetvel ile numune yüzeyi tesviye edildi. Numune yüzeyinde iri malzemedan dolayı oluşan boşluklar, daha ince malzeme ile dolduruldu. Delikli taban plakası ve aralık diski çıkartıldıktan sonra kalıp sıkıştırılmış numune tartılarak ağırlığı kaydedildi, içinde sıkıştırılmış numune olan kalıp ters çevrilerek, üstüne kalıp çapında kesilmiş olan kaba filtre kağıdı konan delikli taban plakası üzerine, numune ile filtre kağıdı temas edecek şekilde yerleştirilip bağlanmıştır.

Killi zemin numunesi ve BOF curufu CBR kapıları kompaksiyon kalıplarına alınarak sıkıştırma işlemi yapıldı. Sıkıştırma işleminde yük okumaları 0.50 mm, 1.0 mm, 1.50 mm, 2.00 mm, 2.50 mm, 3.00 mm ve 5.00 mm'lik penetrasyon değerleri alınmıştır.

Okunan yük değerlerine göre penetrasyon değerleri bulunmuştur ve her bir killi zemin BOF curufu karışım oranı içi ayrı ayrı CBR değerleri de bulunmuştur. Bu değerler arasındaki yüzde farkı (Δ CBR) değeri çizelge ek 17'de gösterilmiştir ayrıca donma-çözünme öncesi CBR deneyi değerleri ve donma-çözünme deneyi değerleri de hesaplanarak çizelge ek 17'de gösterilmiştir.

Donma-çözünme deneyi için CBR kapları 3 gün (72 saat) boyunca su tankında bekletilmiştir. Doman-çözünme deneyi için suda bekleticek CBR kapları yeniden killi zemin numunesi BOF curufu karışım oranları yeniden hazırlandı. Suda bekletilen CBR kalıplarının üzerine nanometreler konularak şişme ve kabarma olup olmadığı gözlemlendi. 3. günün sonunda numuneler sudan çıkartıldı ve fazla suyunun süzülmesi için 1-2 saat bekletildi. Numunler daha sonra iklimlendirme cihazına +22°C ile -17.5°C'e arasında belirlenen standartlarda (çizelge 3.11) çevrim yapacak şekilde bekletildi. donma-çözünme işlemi bittikten sonra cihazdan çıkartılan CBR kalıpları penetrasyon cihazına

konularak ölçümleri yapıldı ve değerleri not edildi. Bu sonuçlar çizelge ek 17’de gösterilmiştir. Bu işlemler tamamlandıktan sonra deney sonlandırılmıştır.

Hesaplamalar ve Deney Raporu Hazırlamak;

CBR cihazına konulan malzemenin yük-penetrasyon değerleri her bir penetrasyon (batma) miktarı için okunan değer (çizelge 4.11) tabloda kN cinsinde değer yazılır, penetrasyon yükü 5 mm ilerleme seviyesine kadar güç yüklenir. 2.5 mm ve 5 mm yük-penetrasyon miktarı için büyük olan değer alınır. Oluşturulan bu tablo değerleri kullanılarak yük (Kg(f))-Penetrasyon (mm) grafiği çizilir. Başlangıç kısmı yukarı doğru iç bükeyse bir düzeltme yapmak gerekir. Dışa doğru dışbükeyse normaldir (şekil 40). İç bükey oluşan grafiklerde penetrasyon ekseninin kesişme noktası ile teğet iç bükey çizilen eğri bir biri ile çakışacak şekilde sola kaydırılır böylece CBR değeri düzeltilmiş olur.

Çizelge 4.11. Yük-Penetrasyon tablosu örneği.

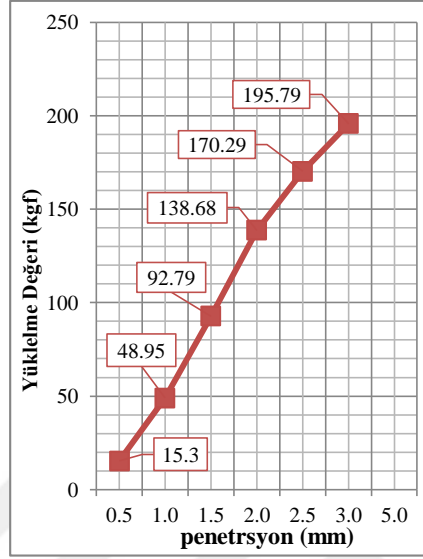
Penetrasyon (mm)	Proving Ring		
	Reading (kN)	Düz Yük. / Load Kg(f)	Ters Yük. / Load Kg(f)
0.5			
1.0			
1.5			
2.0			
2.5			
3.0			
5.0			

Killi zemin numunesi ve BOF curufu CBR kapıları kompaksiyon kalıplarına alınarak sıkıştırma işlemi yapıldı. Sıkıştırma işleminde yük okumaları 0.50 mm, 1.0 mm, 1.50 mm, 2.00 mm, 2.50 mm, 3.00 mm ve 5.00 mm’lik penetrasyon değerleri yukarıdaki tabloya yazılmıştır. Herbir % BOF artı killi zemin numunesi karışım oranı için CBR değerleri ve donma-çözünme sonrası CBR değerleri de hesaplanmıştır.

Çizelge 4.12. Standart Yük-Penetrasyon değeri

Standart Load Values		
Penetration (mm)	Unit load Kg(f)/cm ²	Total Load Kg (f)
2.5	70	1350
5.0	105	2055

Çizelge 4.12 standart yük-penetrasyon değeri tablosudur. Tüm deney için bulunan CBR değerleri için bu penetrasyon değerleri temel alınarak yapılmıştır. 2.5 mm ve 5.0 mm için bulunan değerler için büyük olan değer temel alınarak yapılmıştır.



Şekil 4.20. Yük penetrasyon grafiği örneği.

Yukarıda buluna çizelge 4.11 değerine göre şekil 4.20'deki şekil çizilir. Bu kapsamda killi zemin numunesi içerisine BOF curufu konularak yapılan karışım numunerlerinin CBR değerlerinden elde edilen verilere göre grafikleri çizilmiştir. Dikey yönlü değerler (X eksenini) CBR basınç deneyinde stabilite test cihazında elde edilen yükleme değerleri (Kg(f)) yazılır. Yatay yönlü değerler (Y eksenini) stabilite test cihazında elde edilen penetrasyon (mm) ilerleme miktarına göre yazıldı ve arasındaki ilişki grafiğe edilmiştir.

CBR Deneyi Laboratuvar Sonuçları;

Donma kabarma miktarını ve zeminlerin taşıma gücünün mevsimsel iklim şartlarında sıcaklık farkından doğacak ufalanma ve aşındırmaları anlamak için CBR deneyi (Kaliforniya taşıma oranı) iki farklı aşamada değerlendirerek incelendi. Bu aşamalardan birincisi zeminlerin normal şartlarda taşıma gücünü anlamak için donma-çözünme öncesi CBR deneyinin yapılması. İkinci şamada ise karışım malzemelerine donma-çözünme işlemi uygulanarak, bu iki değer arasındaki ilişki incelendi. Bu sonuçlar donma-çözünme öncesi CBR değeri (CBR₁) ve donma-çözünme sonrası CBR değeri

(CBR₂) aralarında (4) formülü uygulanarak Δ CBR değerine ulaşıldı. Bu bağtıdan bulunan değer çizelge ek 17’de yerine konularak arasındaki ilişki incelendi.

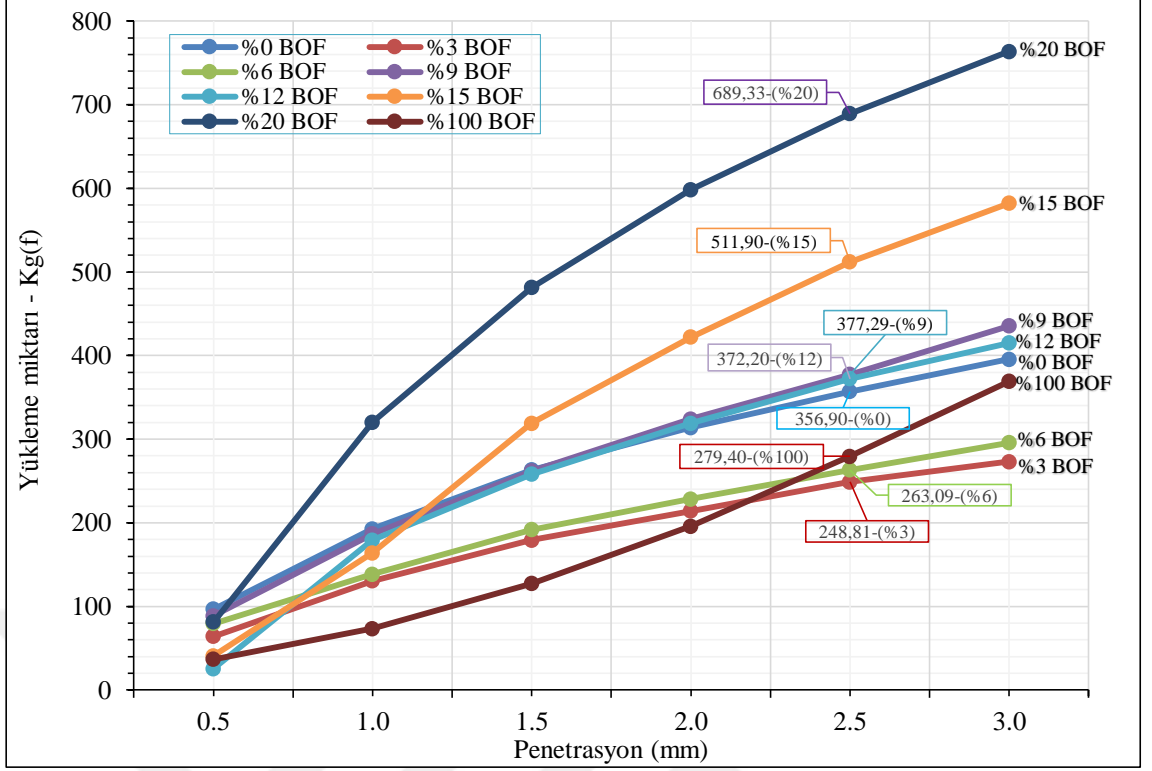
Donma-çözünme öncesi ve donma-çözünme sonrası taşıma gücü oranı (CBR₁ ve CBR₂) değerleri çizelge 4.13’de verilmiştir.

Çizelge 4.13. Donma-çözünme öncesi ve sonrası CBR değerleri

Penetrasyon (mm)	Proving Ring (0%BOF D.Ç Öncesi)		Proving Ring (0%BOF D.Ç Sonrası)	
	Reading (kN)	Düz Yük. / Load Kg(f)	Reading (kN)	Düz Yük. / Load Kg(f)
0.5	0.95	96.87	0.43	43.85
1.0	1.89	192.73	1.2	122.37
1.5	2.58	263.09	1.8	183.55
2.0	3.08	314.07	2.24	228.42
2.5	3.50	356.90	2.50	254.93
3.0	3.88	395.65	2.71	276.34
5.0	-	0.00	-	0.00
	Proving Ring (3%BOF D.Ç Öncesi)		Proving Ring (3 %BOF D.Ç Sonrası)	
0.5	0.63	64.24	0.63	64.24
1.0	1.28	130.52	1.28	130.52
1.5	1.76	179.47	1.72	175.39
2.0	2.10	214.14	2.01	204.96
2.5	2.44	248.81	2.26	230.46
3.0	2.68	273.28	2.42	246.77
5.0	-	0.00	-	0.00
	Proving Ring (6%BOF D.Ç Öncesi)		Proving Ring (6%BOF D.Ç Sonrası)	
0.5	0.78	79.54	0.8	81.58
1.0	1.36	138.68	1.41	143.78
1.5	1.88	191.71	1.88	191.71
2.0	2.24	228.42	2.26	230.46
2.5	2.58	263.09	2.61	266.15
3.0	2.90	295.72	2.9	295.72
5.0	-	0.00	-	0.00
	Proving Ring (9%BOF D.Ç Öncesi)		Proving Ring (9%BOF D.Ç Sonrası)	
0.5	0.87	88.72	3.06	312.03
1.0	1.83	186.61	8.05	820.87
1.5	2.57	262.07	9.52	970.77
2.0	3.18	324.27	11.57	1179.81
2.5	3.70	377.29	13.18	1343.99
3.0	4.27	435.42	14.25	1453.10
5.0	-	0.00	-	0.00
	Proving Ring (12% BOF D.Ç Öncesi)		Proving Ring (12% BOF D.Ç Sonrası)	
0.5	0.25	25.49	4.42	450.71
1.0	1.76	179.47	9.23	941.20
1.5	2.53	257.99	12.26	1250.17
2.0	3.13	319.17	14.20	1448.00
2.5	3.65	372.20	15.60	1590.76

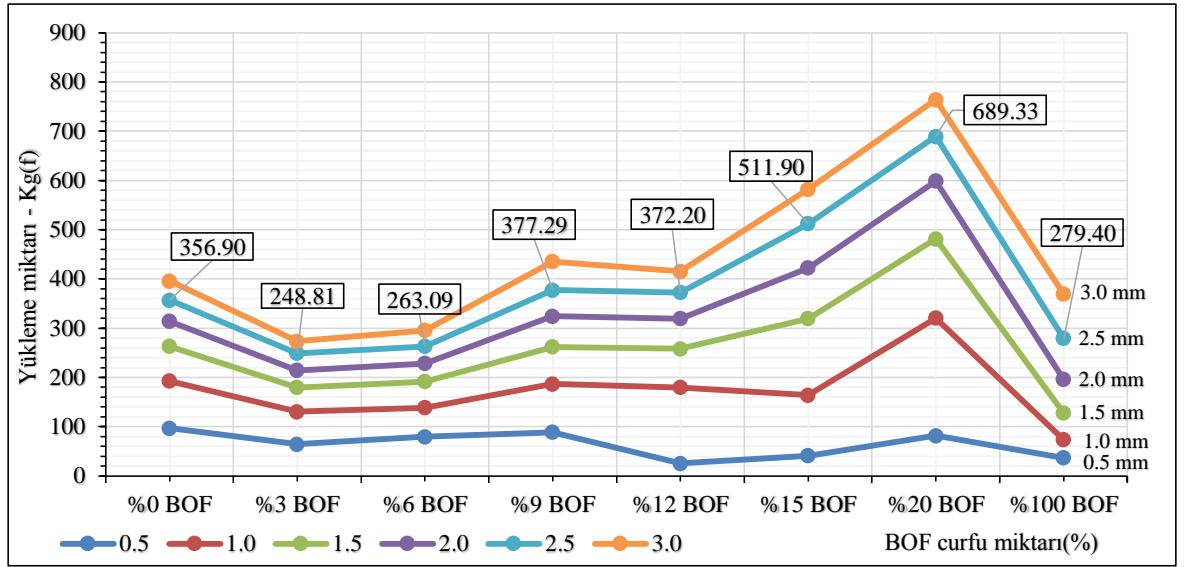
3.0	4.07	415.02	16.61	1693.75
5.0	-	0.00	-	0.00
	Proving Ring (15% BOF D.Ç Öncesi)		Proving Ring (15% BOF D.Ç Sonrası)	
0.5	0.4	40.79	4.4	448.68
1.0	1.61	164.17	10.72	1093.14
1.5	3.13	319.17	16.26	1658.06
2.0	4.14	422.16	20.73	2113.87
2.5	5.02	511.90	24.29	2476.89
3.0	5.71	582.26	26.74	2726.72
5.0	-	0.00	-	0.00
	Proving Ring (20% BOF D.Ç Öncesi)		Proving Ring (20% BOF D.Ç Sonrası)	
0.5	0.8	81.58	4.39	447.66
1.0	3.14	320.19	12.21	1245.07
1.5	4.72	481.31	20.25	2064.92
2.0	5.87	598.57	27.26	2779.75
2.5	6.76	689.33	32.98	3363.02
3.0	7.49	763.77	36.87	3759.69
5.0	-	0.00	-	0.00
	Prov. Ring (100% BOF D.Ç Öncesi)		Prov. Ring (100% BOF D.Ç Sonrası)	
0.5	0.36	36.71	0.59	60.16
1.0	0.72	73.42	1.94	197.82
1.5	1.25	127.46	4.44	452.75
2.0	1.92	195.79	7.54	768.87
2.5	2.74	279.40	10.31	1051.33
3.0	3.62	369.14	12.28	1252.21
5.0	7.76	791.30	-	0.00

Yukarıdaki tabloda kili zemin numunesi ve karışım numunelerinin donma-çözünme öncesi ve sonrası CBR değerleri verilmiştir. Penetrasyon (mm) miktarları 0.5 mm, 1.0 mm, 1.5 mm, 2.0 mm, 2.5 mm, 3.0 mm ve 5.0 mm olmak üzere çizelge 4.13’de hazırlandı. Önce donma-çözünme öncesi hazırlanan numunelere (CBR kaplarına konulmuş kil ve kil+BOF karışımına) CBR cihazına konularak (şekil 3.38) kN cinsinden yükleme yapılmış ve bu değer Kg(f)’e çevrilerek çizelge 4.13’de gösterilmiştir. Bulunan bu değerler arasından 2.5 mm veya 5.0 mm penetrasyon miktarı için yüksek olan değer alınarak CBR % değerleri hesaplanmıştır. CBR % miktarı değeri hesaplanırken çizelge 4.12’deki Standart Yük-Penetrasyon miktarı değerleri oranı kullanarak hesaplanmıştır. Ayrıca bu değerler ve grafik şekli gösterildi (çizelge ek 17 ve şekil ek 17).



Şekil 4.21. Donma-çözünme öncesi CBR_1 değeri (yük-penetrasyon)

Yukarıdaki Penetrasyon (mm)-yükleme miktarı (Kg(f)) donma-çözünme öncesi CBR değerleri kullanarak elde edilmiştir. Yukarıdaki grafiğe baktığımızda %0 BOF curufu karışım oranı 2.5 mm penetrasyon değeri 356.90 Kg(f), %3 BOF curufu karışım oranı 2.5 mm penetrasyon değeri 248.81 Kg(f), %6 BOF curufu karışım oranı 2.5 mm penetrasyon değeri 263.09 Kg(f), %9 BOF curufu karışım oranı 2.5mm penetrasyon değeri 377.29 Kg(f), %12 BOF curufu karışım oranı 2.5 mm penetrasyon değeri 372.20 Kg(f), %15 BOF curufu karışım oranı 2.5 mm penetrasyon değeri 511.90 Kg(f) ve 20% BOF curufu karışım oranı 2.5 mm penetrasyon değeri 689.33 Kg(f) olarak bulunmuştur. Bulunan değerlere göre killi zemin numunesine %9, %12, %15 ve %20 oranlarında BOF curufu eklendiğinde 100% killi (0%BOF) zemin numunesi basınç-penetrasyon değerine göre bir iyileşmenin olduğu gözlenmiştir. Yük-Penetrasyon değerlerinin batma miktarlarına bağlı olarak elde edilen grafik şekil 4.22’de gösterilmiştir.



Şekil 4.22. Donma-çözünme öncesi CBR_1 değeri (yük-BOF curufu (%))

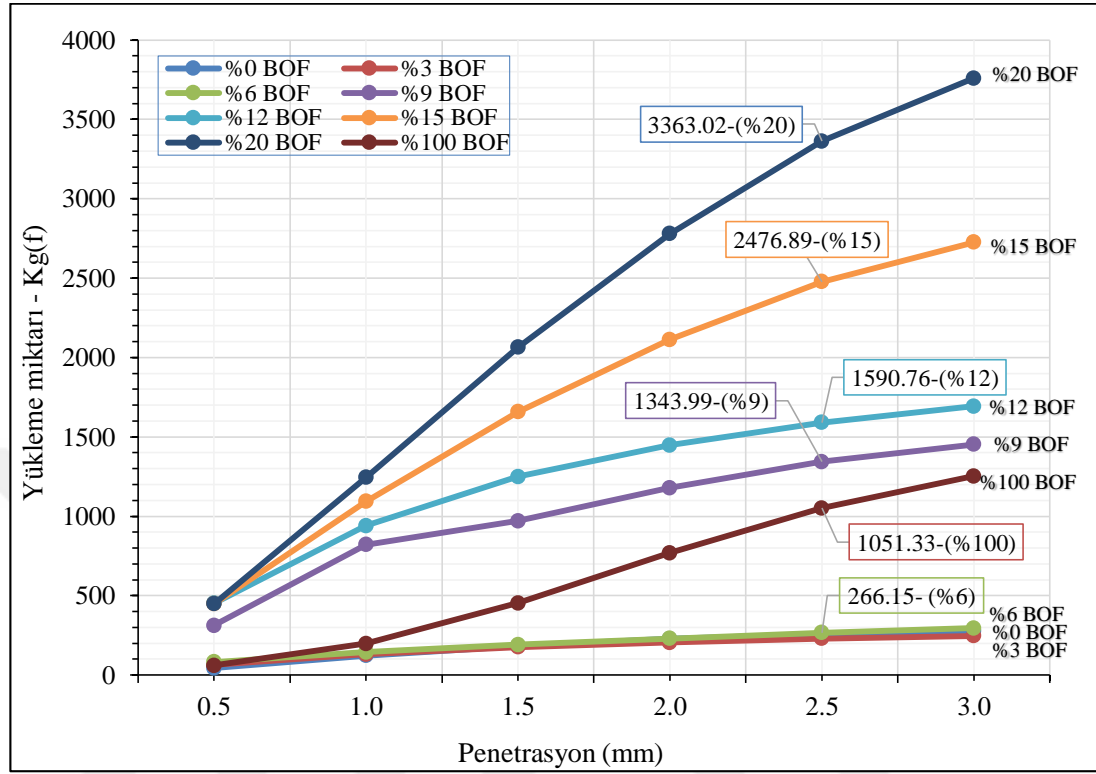
Yukarıdaki grafik değeri çizelge 4.13’de donma-çözünme öncesi yük-penetrasyon miktarı değerleri kullanılarak elde edilmiştir. Bu grafiğe de baktığımızda killi zemin numunesine %9, %12, %15 ve %20 oranlarında BOF curufu eklenildiğinde yük penetrasyon değerlerinde artışlar gözlenmiştir.

Bulduğumuz değerler CBR_1 değeri olarak değerlendirilmiştir. Killi zemin-BOF curufu karışımı oranlarında önemli değerler elde edilmiştir ancak değerlendirmeye alınan bu killi zemin-BOF curufu karışım oranların donma-çözünme sonrası değerlendirilmesi gereklidir.

Yukarıdaki donma-çözünme değerleri yöntemi kullanılarak yeniden killi zemin numunesine %0, %3, %6, %9, %12, %15 ve %20 oranlarında BOF curufu eklenerek CBR kalıpları hazırlandı. Bu kalıplar suya doymun hale gelmesi için 3 gün (72 saat) suda beklemiştir. Suda beklerken kabarma miktarını tespit etmek için 0.001 mm duyarlılıkta bir manometre sabitlenmiştir (şekil 3.36). Suda küre tabi tutulduktan sonra CBR kalıbı numuneleri, bünyesinde fazla bulunan suyunun süzülmesi için bekletildi. Suyu süzülen numune donma-çözünme işlemi gerçekleştirmek üzere iklimlendirme cihazına konuldu. +22° C ve -17.5° C sıcaklık değerleri arasında 10 gün boyunca donma-çözünme işlemine tabi tutulmuştur. Deney aşamasında kabarma miktarlarını belirlemek üzere manometreler konulmuştur (şekil 3.36).

Şekil 4.23’de donma-çözünme sonrası CBR değerlerini göstermektedir. Gösterilen bu değerler +22° C ve -17.5° C sıcaklık değerleri arasında 10 gün boyunca donma-çözünme işlemine tabi tutulduktan sonra ve CBR deneyi yapıldıktan sonra bulunmuştur.

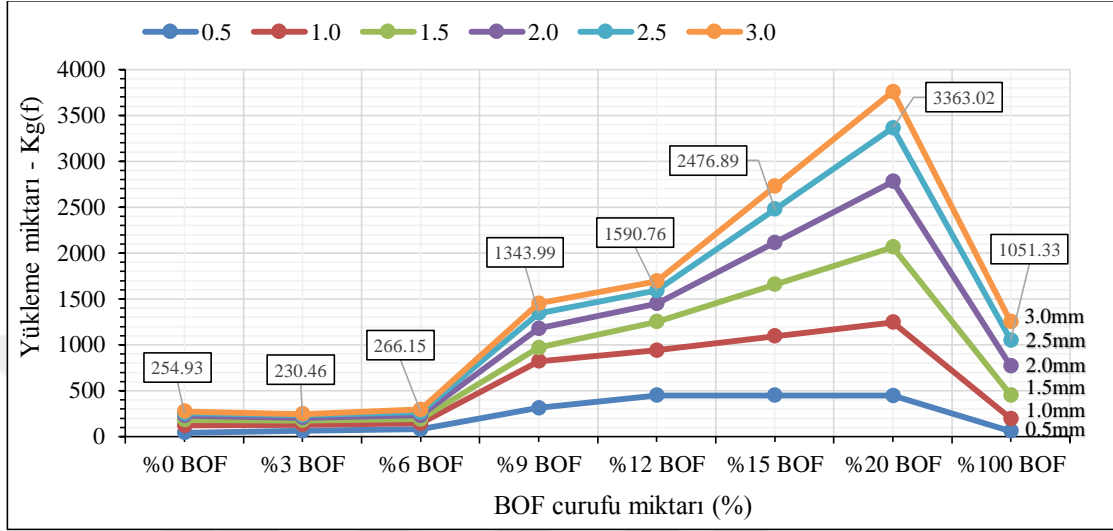
Bulunan bu değerler çizelge 4.13'de gösterilmiştir. Bu tablo değerlerine bakılarak aşağıdaki şekil 4.23 ve şekil 4.24 grafik şekilleri elde edilmiştir.



Şekil 4.23.Donma-çözünme sonrası CBR₂ değeri (yük-penetrasyon)

Yukarıdaki şekilde 2.5 mm yük-penetrasyon miktarları değerleri temel alınarak değerlendirme yapılmıştır. Değerleri incelendiğinde donma-çözünme işleminden sonra %100 killi zemin numunesinde CBR₂ yük-penetrasyon değerinde 254.93 Kg(f) değerine düşmüştür. CBR₁ yük-penetrasyon değeri 356.90 Kg(f) değeri olduğu gözlenmiştir. Şahit numunemizde 2.5 mm yük-penetrasyon değeri 101.97 Kg(f) yük penetrasyon değeri kaybı olmuştur. %6'lık BOF+killi zemin numunesi karışımında ise 3.06 Kg(f) yük-penetrasyon direnci artışı göstermiştir. Grafiğe genel olarak baktığımızda ise %9, %12, %15, %20 ve %100 BOF curufu eklenmiş Killi zemin numunelerinde donma-çözünme deneyi sonrası CBR₂ deneyi sonrası yük penetrasyon değerlerinde artışlar gözlemiştir.%6 BOF curufu yük-penetrasyon değer artışı 3.06 Kg(f), %9 BOF curufu yük-penetrasyon değer artışı 966.7 Kg(f), %12 BOF curufu yük-penetrasyon değer artışı 1218.56 Kg(f), %15 BOF curufu yük-penetrasyon değer artışı 1964.99 Kg(f), %20 BOF curufu yük-penetrasyon değer artışı 2673.69 Kg(f) ve %100 BOF curufu yük-penetrasyon değer artışı ise 771.93 Kg(f) olarak gözlenmiştir.

Şekil 4.24’de killi zemin numunesi-BOF curufu miktarı yük-penetrasyon miktarına göre çizelge 4.13’de gösterilen her bir penetrasyon değeri için (0.5 mm, 1.0 mm, 1.5 mm, 2.0 mm, 2.5 mm, 3.0 mm ve 5.0 mm) zemin numunesinde ilerleme miktarına gösterdiği direncin eğrisi gösterilmektedir.



Şekil 4.24. Donma-çözünme sonrası CBR₂ değeri (yük-BOF curufu (%))

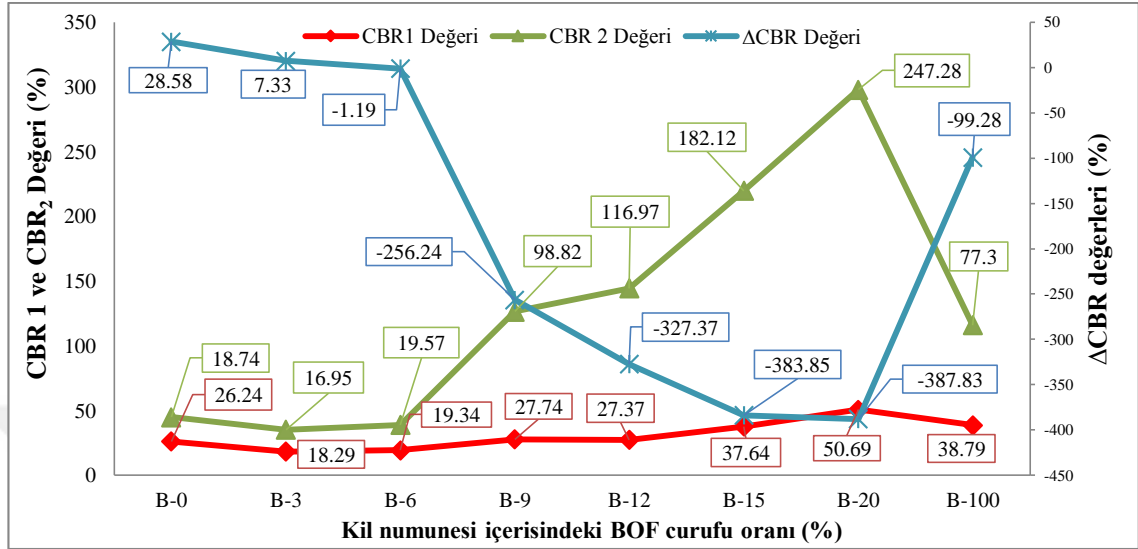
Yukarıdaki grafiğe bakıldığında 2.5 mm Penetrasyon miktarı değeri için %6, %9, %12, %15, %20 ve %100 BOF curufu eklenmiş zemin numunesinde artışlar gözlenmiştir. Bu değerler arasında CBR₂ deneyi Yük-Penetrasyon değerleri arasında en iyi karışım oranı %9, %12, %15 ve %20 oranlarında olduğu gözlenmiştir.

Çizelge 4.14. ΔCBR Değerinin mutlak değer tablosu.

Numune NO	Donma Çözünme Öncesi CBR ₁ Değeri	Donma Çözünme Sonrası CBR ₂ Değeri	$\Delta CBR = \frac{CBR_1 - CBR_2}{CBR_1} \times 100$
B-0	26.24	18.74	28.58
B-3	18.29	16.95	7.33
B-6	19.34	1.57	-1.19
B-9	27.74	98.82	-256.24
B-12	27.37	116.97	-327.37
B-15	37.64	182.12	-383.85
B-20	50.69	247.28	-387.83
B-100	38.79	77.3	-99.28

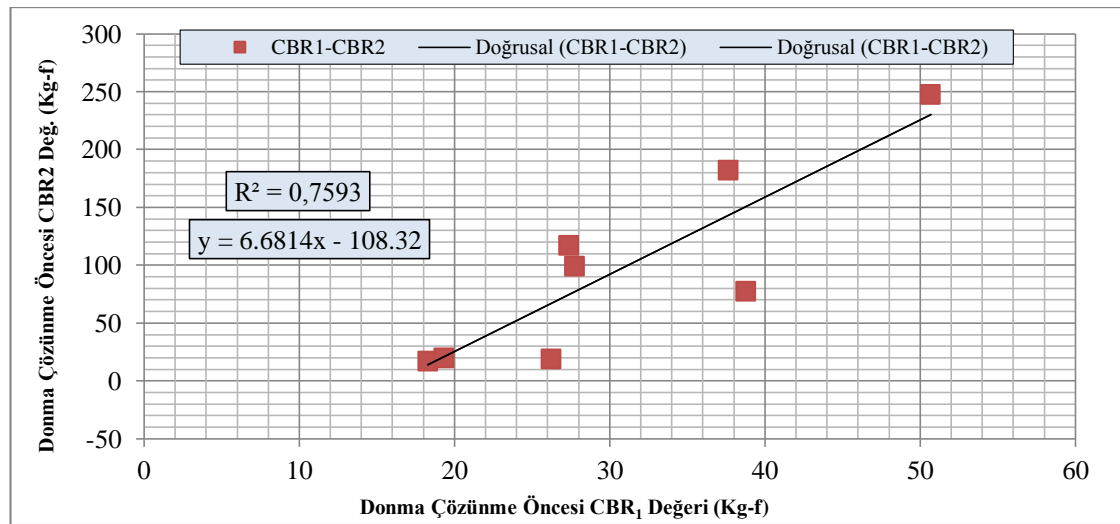
Okunan yük değerlerine göre penetrasyon değerleri bulunmuştur ve her bir killi zemin BOF curufu karışım oranı içi ayrı ayrı CBR değerleri de bulunmuştur. Bu değerler

arasındaki yüzde farkı (Δ CBR) değeri çizelge 4.14’de gösterilmiştir ayrıca donma-çözünme öncesi CBR deneyi değerleri ve donma-çözünme deneyi değerleri de hesaplanarak çizelge ek 17’de gösterilmiştir.



Şekil 4.25. ASTM D 5918 CBR deneyinde kabarma yüzde (%) miktarı arasındaki ilişki

Çizelge 4.14’den yararlanarak yapılan bu çizelgede donma-çözünme öncesi CBR (CBR_1) değeri, donma-çözünme sonrası CBR (CBR_2) değerlerini ve Δ CBR değerlerinin grafik değerlerini göstermektedir. Bu grafikten de görüldüğü gibi İSDEMİR A.Ş BOF curufu killi zemin numunesi ile karıştırıldığında en iyi sonucu %12, %15 ve %20 oranlarındaki karışımlardan elde etmektedir.



Şekil 4.26. Kabarma miktarı arasındaki ilişki (Doğrusal Grafik)

Şekil 4.26'da donma-çözünme öncesi ve donma-çözünme sonrası CBR değerleri arasındaki kabarma miktarları arasındaki ilişki incelenmiştir. Buna göre R^2 değeri 0.759 olarak bulunmuş, denklemin değeri ise $y=6.681x-108.32$ olarak bulunmuştur.

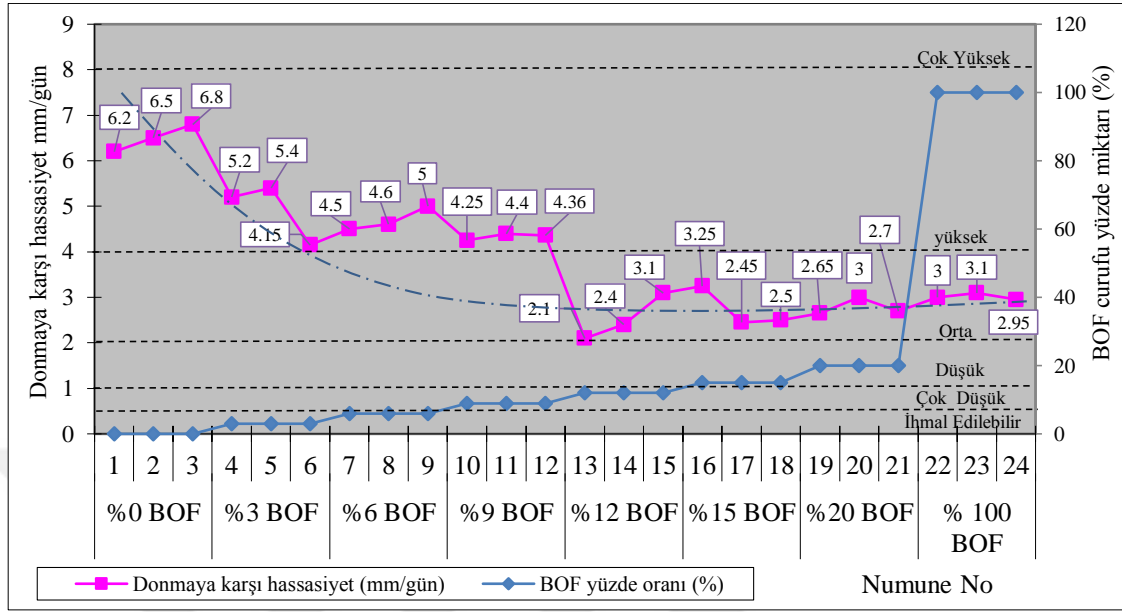
Numunelerin donmaya karşı hassaslıkları Freitag ve McFadden (1997) tarafından belirlenen sınıflandırma sistemine göre numunelerin donmaya karşı hassaslıkları aşağıda hem çizelge hem de şekil olarak verilmiştir. Donma kabarma miktarları Freitag ve McFadden (1997) çizelge 3.4 ve çizelge 3.5 harmanlanarak belirlenmiştir (çizelge 4.15).

Çizelge 4.15. Numunelerin donmaya karşı hassaslığı (Freitag ve McFadden, 1997).

BOF Miktarı	Numune No	Donma Kabarma Hızı (mm/gün)	Donmaya Karşı Hassaslığı
%0 BOF Şahit Numune	1	6.2	YÜKSEK
	2	6.5	YÜKSEK
	3	6.8	YÜKSEK
%3 BOF	4	5.2	YÜKSEK
	5	5.4	YÜKSEK
	6	4.15	YÜKSEK
%6 BOF	7	4.5	YÜKSEK
	8	4.6	YÜKSEK
	9	5	YÜKSEK
%9 BOF	10	4.25	YÜKSEK
	11	4.4	YÜKSEK
	12	4.36	YÜKSEK
%12 BOF	13	2.1	ORTA
	14	2.4	ORTA
	15	3.1	ORTA
%15 BOF	16	3.25	ORTA
	17	2.45	ORTA
	18	2.5	ORTA
%20 BOF	19	2.65	ORTA
	20	3	ORTA
	21	2.7	ORTA
% 100 BOF Kontrol Numune	22	3	ORTA
	23	3.1	ORTA
	24	2.95	ORTA

Çizelge 4.15'e göre BOF curufu miktarı arttıkça donmaya karşı hassasiyeti de azalmakta olduğu gözlenmektedir. Çizelge 4.15 incelendiğinde donmaya karşı hassasiyete genel olarak azalma gözlenmektedir. Donmaya karşı hassasiyet %12, %15, %20 BOF curufu eklenmiş numunede en aza inmektedir. %0 (şahit numune), %3 ve %6

BOF curufu eklenmiş numune karışımlarında ise şahit numuneye göre donmaya karşı hassasiyette çok az bir değişme olsa da gözlenmektedir.



Şekil 4.27. Numunelerin donma hassaslığı (Freitag ve McFadden, 1997).

Şekil 4.27’de BOF curufu killi zemin numunesi karışım oranlarına göre donmaya karşı hassasiyet değerlerini göstermektedir. Bu tablo Freitag ve McFadden (1997) tarafından hazırlanan donmaya karşı hassasiyet değerlerinden faydalanarak hazırlanmıştır. (çizelge 3.5) çizelge 3.14’de kesikli yatay çizgiler (-----) çizelge 3.5’deki verilen değerler donma hassasiyet sınırlarını göstermektedir. Şekil 4.27’de yatay eksen (x eksen) numune numaralarını ve BOF curufu ve killi zemin numunesi karışım oranlarını ifade etmektedir. Sol taraftaki dikey eksen (+y₁ eksen) malzemelerimizin donmaya karşı hassasiyet (mm/gün) değerlerini göstermektedir. Sağ taraftaki dikey eksen ise (+y₂ eksen) numunelerdeki BOF curufu karışım oranını ifade etmektedir. Grafikteki değerler incelendiğinde BOF curufu ile karıştırılmış killi zemin malzemesinde donmaya karşı hassasiyette genel olarak bir azalma görülmüştür. Yine de en iyi sonucu %12, %15 ve %20 oranlarında BOF curufu eklenmiş killi zemin numunelerinde olduğu gözlenmiştir. %12 BOF curufu eklenmiş numunelerin içinde en iyi sonucu 2.1 mm/gün kabarma miktarı ile 13 Nolu %12 BOF numunesinde elde edilmiştir. %15 BOF curufu eklenmiş killi zemin numunesinde en iyi sonuç 2.5 mm/gün kabarma miktarı ile 18 Nolu %15 BOF numunesinde elde edilmiştir. %20 BOF curufu eklenmiş killi zemin numunesinde en iyi sonuç 2.65 mm/gün kabarma miktarı ile 19 Nolu %20 BOF numunesi de elde edilmiştir. Kabarma miktarları azaldıkça taşıma kapasitesi artacağından CBR öncesi ve CBR sonrası

basınç değerleri de bu yüzde oranları için taşıma kapasitesinde artış olduğu gözlenmiştir (şekil 4.21, şekil 4.22, şekil 4.23 ve şekil 4.24).

Deneyin genel olarak değerlendirmesi ise aşağıda verilmiştir.

- ASTM D 5918 Deneyi kapsamında yapılan donma-çözünme öncesi ve donma çözünme sonrası CBR deneyleri sonuçlarına göre, İskenderun kil numunesine %12, %15 ve %20 oranında BOF curufu katıldığında zenim mukavemet testlerinde en yüksek basınç mukavemeti değerine bu oranlarda ulaşmaktadır (şekil 4.21, şekil 4.23).

- ASTM D 5918 Deneyinde kil numunesine %3, %6, %9, %12, %15, %20 ve %100 BOF eklenmiş B-0, B-3, B-6, B-9, B-12, B-15, B-20 ve B-100 numunesi üç gün suda bekletilmiş numunelerde donma-çözünme sırasında en fazla kabarma miktarı 6.8 mm/gün ile B-0, B-3 ve B-6 (şekil 4.27) gözlenirken 2.1 mm/gün ile en az kabarma B-12, B-15 ve B-20 de gözükmemektedir (şekil 4.27).

- Numunelere ASTM D5918 standardında 120 saat donma-çözünme uygulandığında B-0, B-3 ve B-6 (şekil 4.25, şekil 4.26) numunelerinde zemin basınç (CBR) %19.34'den daha yüksek bir değere ulaşmamıştır. BOF curufu oranı arttıkça CBR yüzde değeri artarken en iyi değerler. %247 oranına çıkmaktadır. B-12 (%116.97) B-15 (%187.12) ve B-20 (%247) olarak gözlenmiştir.

5. NUMUNELERİN MİNERALOJİK ARAŞTIRMASI

5.1. Makro Yapı Araştırması:

Püskürtme yöntemi ile SEM’de görüntülenecek numunelerin yüzeyi Altın-Paladyum ile kaplanarak iletken olmayan yüzeyleri iletken hale getirilmesi sağlandı. Şekil 5.1’de görüldüğü gibi, numuneler kaplanma aşamasında vakum altına alındı ve numunenin özelliğine göre değişen akım ve süre ayarı yapılarak, Au-Pd tabakası ile kaplanması sağlandı.



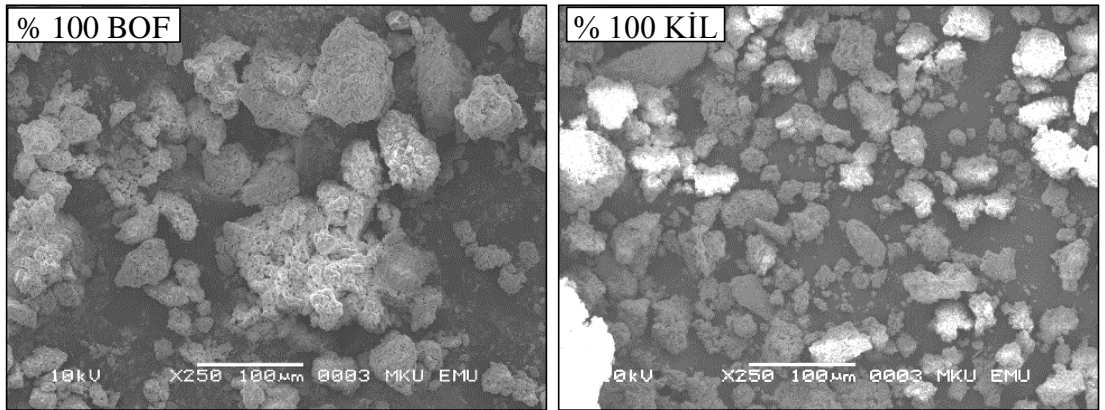
Şekil 5.1. Numunelerin Au-Pd tabakası ile kaplanması

Bu çalışmada şekil 5.1’de görüldüğü gibi, JEOL JSM-5500LV marka SEM cihazı kullanılmıştır. Hızlanma gerilimi: 0.3~30 kV; Yüksek vakum modunda çözünürlük: 3.0 nm (hızlandırıcı voltaj 30 kV, WD 8 mm); Büyütme: X5-X300000; Prob akımı: 1 pA - 1 μ A; Elektron kaynağı: Saçak tipi tungsten filament; Aztek yazılımı ile Oxford EDS dedektörü’ne sahiptir.



Şekil 5.2. JEOL JSM-5600LV marka SEM cihazı analiz çalışması

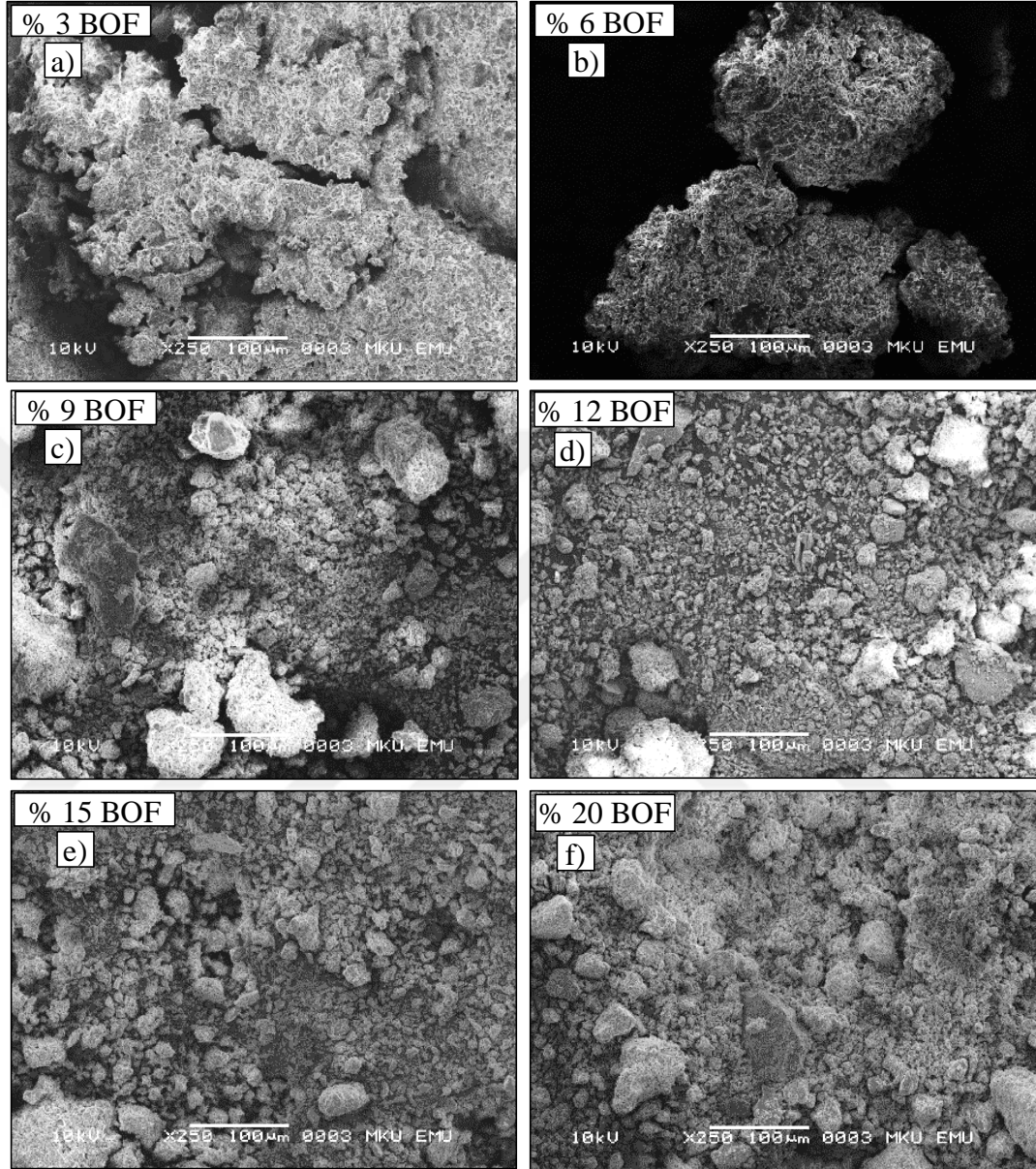
Belli oranda (%3, %6, %9, %12, %15 ve %20) BOF curufu karıştırılmış kil malzemesinden (6 adet) elde edilen numuneler 250X defa büyütülerek SEM elektronik mikroskop ile incelenmeye tabi tutulmuştur. SEM elektronik mikroskobu ile BOF curufu ve kil karışımı numunelerin şekilleri, köşeleri ile yüzey ve tane yapıları incelenmiştir.



Şekil 5.3. Katkısız BOF curufu ve Kil numunelerin mikro yapıları (250X)

Şekil 5.3'deki BOF curufu ve Kil numunelerini incelediğimizde, BOF curufu tanelerinin daha iri boyutta olduğu, daha büyük yüzey dokularına sahip olduğu görülmektedir. BOF curufunda, düzensiz şekillere sahip plaka halinde parçacıklar da gözlenebilmektedir. BOF curufu bünyesinde bulunan CaO ve MgO bileşikleri bağlayıcı

özelliğini artırıcı yönde etkisi olmaktadır. BOF curufu tanecikleri, Kil taneleri arasındaki boşlukları doldurarak, kilin iç bünyesindeki tane boşluklarını azaltmaktadır.



Şekil 5.4. BOF curufu ve Kil katkılı numunelerin tane yapıları (250X)

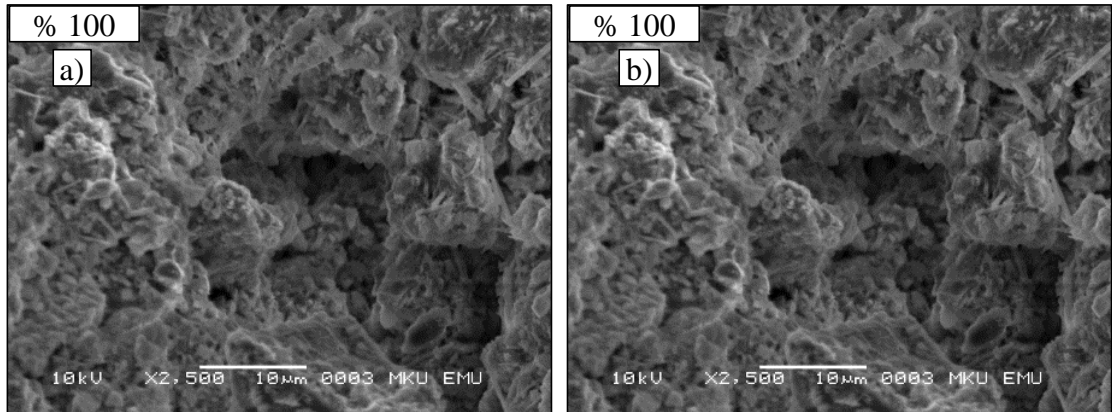
Genel olarak, kil malzemesi içerisinde BOF curufu miktarı arttıkça tane yapılarının daha dolgun kompakt bir yapıya sahip olduğu gözlemlenmiştir. Numunelerdeki tanelerin birbirine bağlılığı, özellikle %12, %15 ve %20 oranlarında BOF curufu karışmış kil numunelerinde daha belirgin olarak görülmektedir (şekil 5.4-d, e, f).

5.2. Mikro Yapı Araştırması:

Belli oranda (% 3, %6, %9, %12, %15 ve %20) BOF curufu karıştırılmış kil malzemesinden elde edilen numuneler 2500X defa büyütülerek SEM elektronik mikroskop ile araştırmaya tabi tutulmuştur. SEM elektronik mikroskobu ile BOF curufu ve kil karışımı numunelerin mikro yapıları incelenmiştir.

Şekil 5.5’de BOF curufu ve Kil numunelerini SEM görüntülerini incelediğimizde, BOF curufu tanelerinin daha iri boyutta olduğu görülmektedir. Kil mineralleri saf bir şekilde bulunmayıp genellikle içerisinde alüminyum silikatlarla beraber, demir, magnezyum, potas, kalsiyum, sodyum, kuvars gibi kil olmayan safsızlıklar ilede birlikte bulunmaktadır. Birçok kil mineralleri, organik madde ve suda çözünebilen tuzları da içerebilmektedir. Kil oluşumunda ana kayaç, etkili olduğu kadar, taşıma, yıkama, kimyasal reaksiyonlar da etkili olmaktadır. Killerin mikro yapılarının araştırılmasında; bu minerolojik ve jeolojik özellikleri ön plana çıkmaktadır.

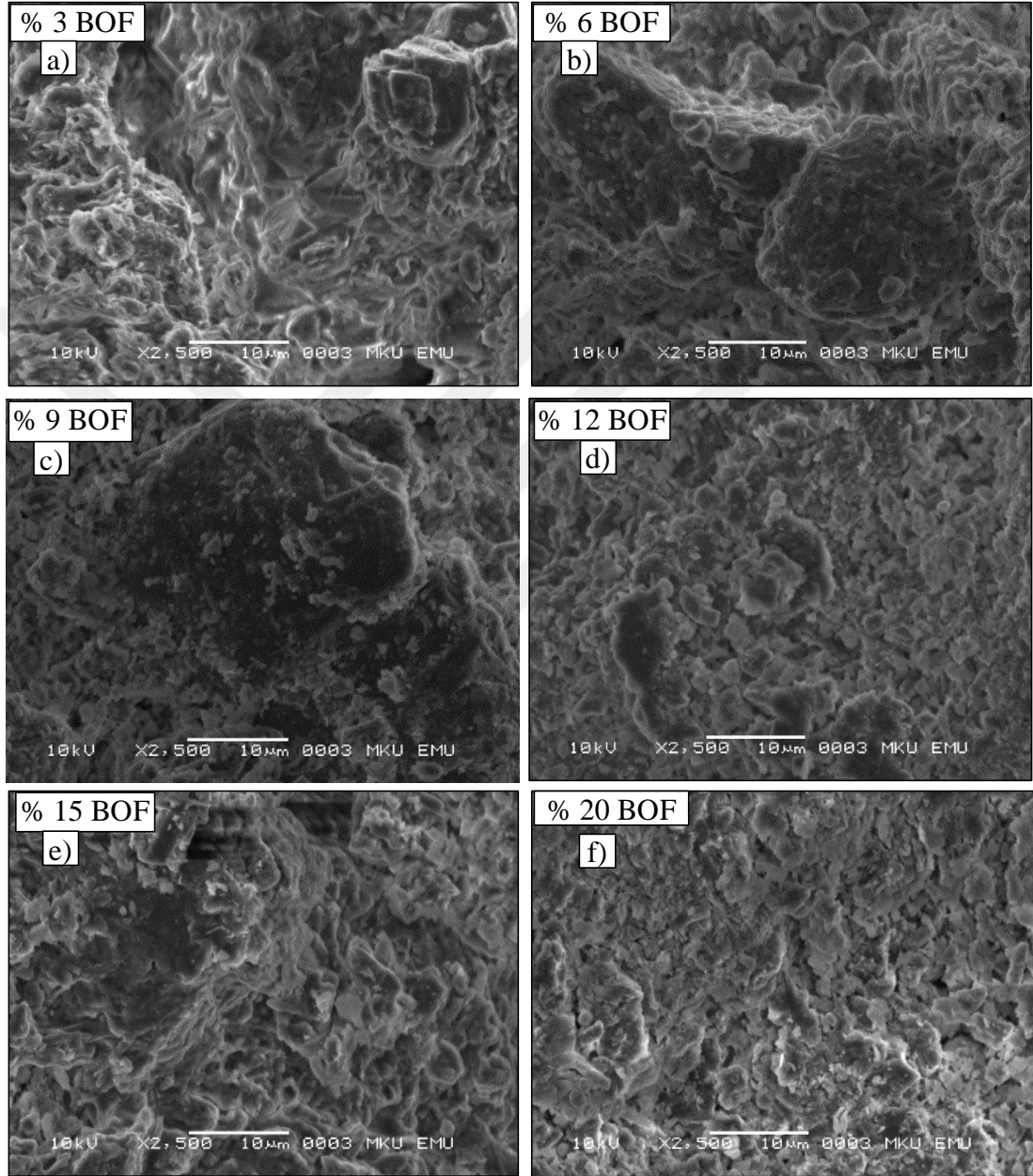
Mikro yapı incelemesinde, SEM altında incelenen BOF curufu tanelerinin çoğu, düz, kristal yapılar ile son derece pürüzlü yüzey dokularına sahip olduğu görülmüştür (şekil 5.5-a). Sıkıştırılmış kilin kayma dayanımındaki artışın, donma ve çözünme çevrimi sırasında oluşan bağlar sayesinde olduğu sonucuna varılmıştır.



Şekil 5.5. Katkısız BOF curufu ve Kil numunelerin mikro yapıları, 2500X

Kilin şişmesi üzerinde içerisinde bulunan minerallerin, önemli bir etkisi olduğu değerlendirilebilir. Allam and Sridharan [27] killerin, donma ve çözünme çevrimin etkisini araştırdıkları çalışmalarında, sıkıştırılmış kilin kayma dayanımındaki artışın, donma ve çözünme çevrimi sırasında oluşan bağlar sayesinde olduğu sonucuna varmışlardır. Collins [28] SEM kullanarak, şişen zeminlerin mikro yapısını incelediği

çalışmasında; genişleyen zeminlerin şişme davranışını değerlendirmede kilin mikro yapısının belirlenmesinin önemli bir faktör olduğunu göstermiştir. Birçok araştırmacı tarafından, mikro yapı zeminin mühendislik davranışını etkileyen temel bir faktördür denilmektedir [29, 30].



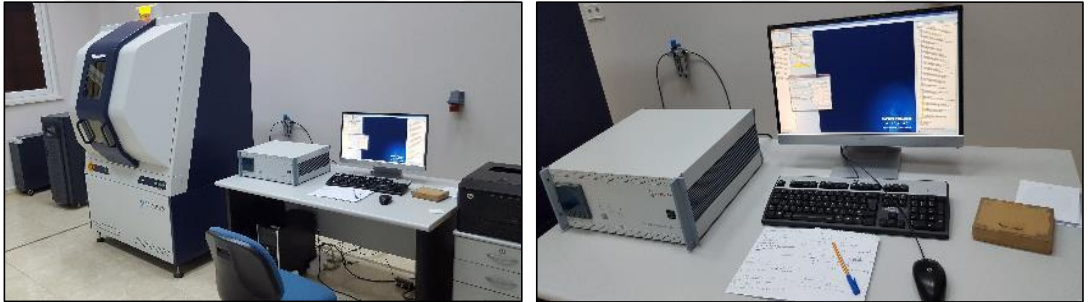
Şekil 5.6. BOF curufu ve Kil katkılı numunelerin tane yapıları (2500X)

Çevrim öncesi ve sonrası örneklerde oluşan mikroyapısal değişimi görmek için özellikle karşılaştırmaya esas olması amacıyla, % 3, %6, %9, %12, %15 ve % 20 BOF curufu katkılı numunelere X-Ray ve SEM analizleri yapılmıştır. SEM analizi sonuçlarına baktığımızda, %3, %6, %9, %12, %15 ve % 20 BOF curufu katkılı örnekler açısından

değerlendirildiğinde, BOF curufu miktarı arttıkça numunede de çevrim sonrasında daha kümeleşmiş ve yoğun bir yapı bütünlüğü görülmektedir. BOF curufunun dayanımı artırıcı etkisi TS EN 1367-1 (şekil 4.11), TS EN 1367-2 (şekil 4.16) ve ASTM D 5918 (şekil 4.27 ve çizelge 4.13) test çalışmalarında görülmüştür. Bünyesinde %9 ve daha fazla BOF curufu içeren numunelerin SEM resimleri donma-çözünme çevrim sonrası için incelendiğinde (Şekil 5.6-c, d, e, f); %3 ve %6 katkısız numuneye (Şekil 5.6-a, b) oranla daha yoğun ve kümeleşmiş tane yapıları oluştuğu görülmektedir.

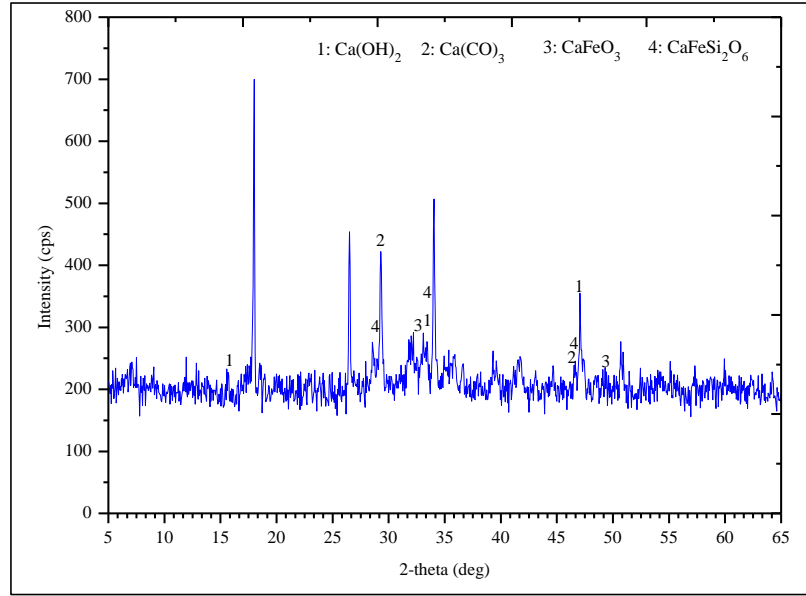
5.3. X-Işını Difraksiyon Analizi (XRD):

XRD çalışması için, her bir numuneden hazırlanan örnekler X-Ray difraktometre cihazıyla deneye tabi tutulmuş ve kil minerali tipleri belirlenmiştir. Mineralojik faz analizi, 6 adet BOF curufu katkılı kil numuneleri üzerinde optik mikroskop çalışmasına paralel olarak gerçekleştirildi. BOF curufu katkılı numune örnekleri Rigaku SmartLab marka X-ışını difraksiyon cihazı ile araştırıldı (şekil 5.7). XRD analizleri, Cu K α radyasyonu ($\lambda_{Cu} = 0,1540$ nm) ve 5° ile 90° arasında değişen 2 θ açıları ile bilgisayar kontrollü bir Bruker AXS D8 Advance Difraktometre kullanılarak gerçekleştirildi.



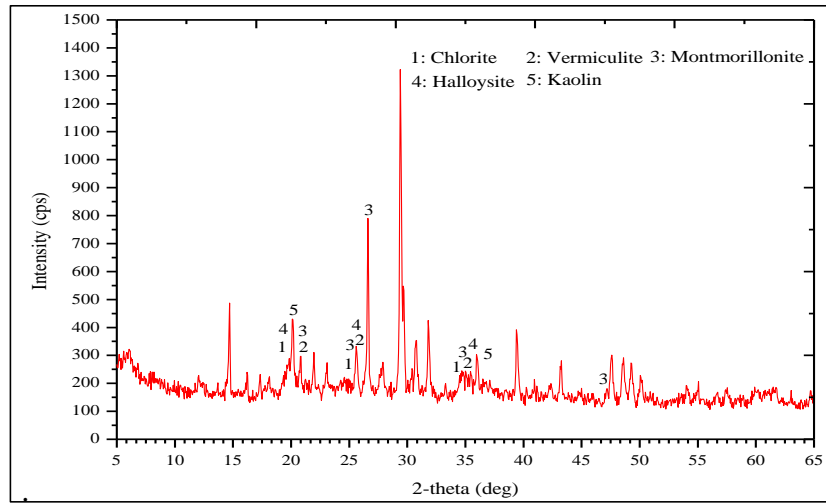
Şekil 5.7. XRD Analiz çalışması

Laboratuar şartlarında, optimum su muhtevasında sıkıştırılarak hazırlanan %3, %6, %9, %12, %15 ve %20 BOF curufu katkılı örnekler (6 adet) üzerinde donma ve çözünme döngüsünün öncesinde ve sonrasında şişme miktarı ile mikro yapıyı incelemek amacıyla; SEM analizi ile birlikte XRD analizleride yapılmıştır (şekil 5.8, şekil 5.9 ve şekil 5.10).



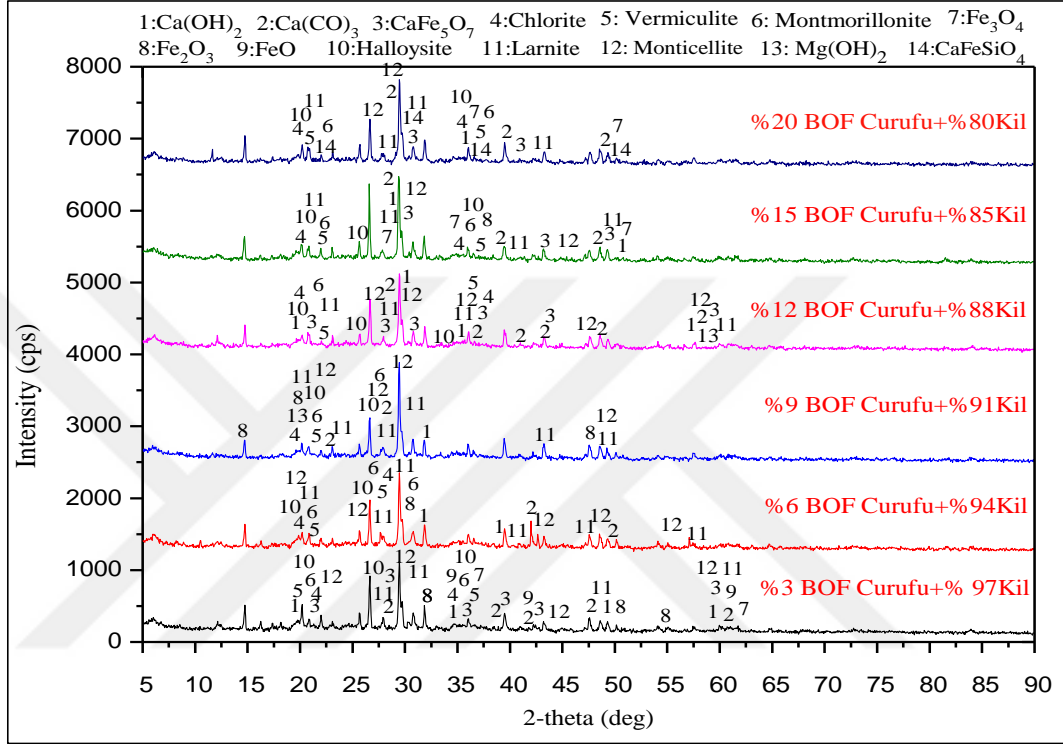
Şekil 5.8. Katkısız BOF Curuf numunesinin X-Işını Difraktogramı (çevrim sonrası).

BOF çelikhane fırın cürufu numunesinin ana bileşenleri tayin edilmiş ve sonuçları şekil 5.8’de gösterilmiştir. Dene sonuçlarına göre ana bileşenler kalsiyum oksit (CaO), silisyum dioksit (SiO₂), Alüminyum oksit (Al₂O₃) ve demir (Fe) bileşenleridir. BOF curuflarında yukarıda belirtilen bileşenlerin yanında alüminyum oksitler (Al₂O₃), magnezyum oksitler (MgO) ve diğer bileşenlerin de varlığı düşük oranlarda tespit edilmiştir. XRD analizinde temel bağ yapılar olarak kalsiyum ve silisyumlu bileşikler ile kalsiyum ve demirin silikatlı bileşikleri bulunmuştur. Kil numuneleri üzerinde yapılan XRD analizleri şekil’69 da verilmiştir.



Şekil 5.9. Katkısız Kil numunesinin X-Işını Difraktogramı (çevrim sonrası).

Kil numuneler üzerinde yaptırılan XRD analiz sonuçlarında (şekil 5.9) killerin bünyelerinde kil minerallerine ve bazı gölgelerde kil olmayan minerallerin (kalsit, kuvars, vs.) bulunduğu görülmüştür. Kil numunesi XRD analizinde, klorit, kaolin, vermiculit, montmorillonit ve halloysite minerallerine rastlanmıştır.



Şekil 5.10. BOF Curufu katkılı Kil numunelerinin X-Işını Difraktogramı (çevrim sonrası).

SEM analizleri sonuçlarında ve XRD kayıtlarından da görüldüğü gibi; donma-çözünme döngüsü sırasında tanelerin yeniden düzenlenerek nispeten yapı bütünlüğünü artırdığı ve bunun sonucunda oluşan aglomerasyon neticesinde sıvı ile etkileşimde bulunacak mevcut yüzey alanlarının düşüşüne bağlı olarak, sıvı ile temas edecek yüzey alanındaki azalmalar neticesinde çevrimle orantılı şişme potansiyelinde düşüş gözlenmiştir.

XRD ve SEM analizi sonuçları değerlendirildiğinde, BOF curufu katkılı numuneler, çevrim öncesine oranla aglomerasyon neticesinde kümeleşerek daha büyük tane yapısına sahip olduğu görülmüştür. Donma ve çözünme döngüsünün bu etkisi %12, %15 ve %20 BOF curuf ilaveli numunelerde daha da belirgin görülmektedir. Dayanımı

artırıcı etki daha çok, farklı oranda ilave edilen BOF curufu numunelerinin bağlayıcı ve tane boşluklarını doldurma etkisinden kaynaklandığı söylenebilir.

Killi zeminlerin şişme potansiyeli üzerinde çevrimin etkisi araştırıldığında; çevrim sayısındaki artışa bağlı olarak yüksek şişme potansiyeline sahip zeminin şişme yeteneği, BOF curufu katkısı ile killi zemindeki artan aglomerasyon yapısı ile ilişkili olarak azalmıştır. Kilin şişme özelliği, numunelerin sıkıştırma durumuna ve özellikle bünyesindeki major kil mineral tipine bağlı olarak değiştiği sonucu çıkarılabilir. Killerin donma-çözünme mekanizmasını anlamak için nicel olarak killerin mikro yapısının değerlendirilmesi uygun olacaktır.



6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada killi zeminlerin değişken iklim koşullarında üzerinde taşıdıkları inşaat yapılarının ve inşaat malzemelerine (tünel, yol satıh kaplamaları vs.) olumsuz etkilerinin (kırılma, kabarma vs.) iyileştirilmesi amaçlanmıştır. Bu çalışmada killi zemin malzemelerine %3, %6, %9, %12, %15 ve %20 oranlarında BOF curufu ilave edilip mevsimsel donma çözünme doğal şartları laboratuvarında oluşturularak TS EN 1367-1 (Hava ortamında), TS EN 1367-2 (% 150 MgSO₄, %5 BaCl₂'lü sulu çözeltisi) ve ASTM D 5918 (Su ortamında zemin kabarma) donma çözünme testleri seri olarak, sistematik bir şekilde klimatik test kabini cihazında iklimlendirme çevrimi (10 defa tekrarlanarak-İD-300 Nüve Klimatik Test Kabini) yapılmıştır. (çizelge 3.11) Bu çalışma kapsamında zeminlerin normal şartlar altında karşılaşacakları hava ortamında donma-çözünme, tuzlu ortamda donma-çözünme ve sıvı ortamda donma çözünme olmak üzere 3 farklı ortam laboratuvar şartlarında oluşturularak her deney grubu için elde edilen en iyi sonuçlar (İklim ve Şartlarına göre) üzerinde araştırma yapılmıştır. Yapılan üç farklı deney aşaması için 21'er adet olmak üzere toplam 63 deney numunesi hazırlanmış ve her deney en iyi sonucu almak için en az 3'er defa tekrarlamıştır. Böylece hazırlanan test numune adedi toplam 3 deney ve proktor gibi bağlı deneyler ile birlikte 252 adet numune hazırlanmıştır.

Yapılan çalışmalar sonucunda BOF curufunun Killi Zemin numuneleri ile belirli oranlarda (%3, %6, %9, %12, %15 ve %20) katıldığı Killi zemin numunelerinin mukavemet dirençlerinde bir iyileşme olduğu gözlenmiştir. Ancak yapılan deneylerde tuzlu ortamda donma-çözünmede, hava ortamında donma-çözünmede ve zemin mukavemet dirençlerinde iyileşmelerin gözlendiği Kil+BOF curufu karışım oranları aralığı %9 ile %20 aralığı arasında olduğu gözlenmiştir. Yapılan deneylere göre iyileşmelerin olduğu aralıklara baktığımızda;

1) İSDEMİR A.Ş. Çelikhane curuflarının TS EN 1367-1'e göre (Hava ortamında D.Ç) killi zeminlerde ve kuru ortam şartlarında çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışma kapsamında yaşlandırma ve zemin mukavemet direnci testinde iyileşmelerin olduğu aralık %12, %15, %20 oranlarında olduğu gözlenmiştir. Malzeme talebi için, çevre ve iklim şartları tablosu oluşturulduğunda istenilen F kategorisine ulaşmak mümkündür (çizelge 4.4). En iyi F kategorisi değerine killi zemin numunesine %20 BOF curufu eklendiğinde gözlenmiştir. (şekil 4.11)

2) Killi zemin numunesine TS EN 1367-2'ye göre (Tuz+Su'lu ortamda D.Ç) killi zemin numunesinin Sulu ve tuzlu ortamda donma-çözünme çalışmaları yapılmıştır.

Yapılan mukavemet testlerine göre en iyi direncin gösterildiği BOF+killi zemin numunesi aralığı %12, %15 ve %20 arasında olduğu gözlenmiştir (şekil 4.16)

3) Zeminlerin kabarma miktarı deneyi olan ASTM D 5918 deneyinde CBR (zeminlerin taşıma gücü oranı deneyi) ve kompaksiyon (su muhtevası) deneyi olmak üzere iki adet deney yapılmıştır. Donma-çözünme öncesi ve donma-çözünme sonrası CBR deneylerinde en iyi zemin mukavemet direncini Killi zemin numunelerine %12, %15 ve %20 oranları arasında BOF curufu eklenildiğinde gözlenmiştir (şekil 4.25).

Yapılan donma-çözünme deneylerine göre killi zemin numunesine BOF curufu eklenildiğinde zemin mukavemetinde ve aşınmalarına karşı dirençte en iyi karışım oranlarının %12 ile %20 arasındaki değerlerde olduğu gözlenmiştir. Bu değerlere baktığımızda;

1) TS EN 1367-1 deneyi için (hava ortamında donma çözünme) %12 BOF curufu eklenildiğinde killi zemin numunesin aşınma miktarını ortalama olarak %1.31'e kadar iyileştirme yaptığı gözlenmiştir (çizelge 3.11, şekil 4.11). Bu aşınma miktarındaki azalma F kategori değerlerine baktığımızda F2 kategori değerine denk gelmektedir (çizelge 4.4). Bu kategori değerini ise oluşturulan çevre ve iklim şartı tablosunda incelediğimizde (çizelge 4.6), Atlantik iklim şartlarında, tuzlu ortam (doygun tuz-yol satıh kaplamasında) değerlendirilebilir demektir. F2 kategorisinde ki değer F3, F4 ve X ile gösterilen çevre ve iklim şartlarında da değerlendirilebilir demektir.

2) TS EN 1367-2 deneyi için (tuzlu ve sulu ortamında donma çözünme) %15 BOF curufu eklenildiğinde killi zemin numunesin aşınma miktarını ortalama olarak % 20.49'a kadar iyileştirme yaptığı gözlenmiştir.(çizelge 4.7, şekil 4.16). Bu aşınma miktarındaki azalma Ms kategorik değerlerine baktığımızda Ms25 kategori değerine denk gelmektedir (çizelge 4.8). Bu kategorik değerini ise oluşturulan çevre ve iklim şartı tablosunda incelediğimizde (çizelge 4.9) Atlantik iklim şartlarında, tuzlu ortam (doygun tuz-yol satıh kaplamasında) değerlendirilebilir demektir. Ms25 kategorisindeki değer Ms25, Ms35 ve X ile gösterilen çevre ve iklim şartlarında da değerlendirilebilir olduğunu göstermektedir.

3) ASTM D5918 deneyi kompaksiyon ve CBR olmak üzere iki deney aşamasını içermektedir. Kompaksiyon deneyine göre hazırlanan numuneler için optimum su muhtevası belirlendi. Bu oran %100 kil numunesi için Kuru birim hacim ağırlığı (γ_{kmaks}) 1.58 gr/cm^3 ve optimum su muhtevası ise (ω_{opt}) %17 olarak bulunmuştur. (şekil 4.17) kompaksiyon deneyinde bulunan değerleri ise CBR deneyindeki numuneler için kullanıldı.

4) CBR zeminlerin taşıma gücü oranı deneyinde ise kompaksiyon deneyinde elde edilen su muhtevasına göre killi zemin BOF curufu karışımı hazırlandı ve donma çözünme öncesi zemin mukavemet değerleri test cihazı ile ölçüldü (şekil 3.36). Yapılan karışım oranlarına göre en iyi değer %20 BOF curufu+killi zemin karışım oranında 2.5 mm penetrasyon miktarı için 689.33 Kg(f) yüke mukavemet göstermiştir. (şekil 4.19, şekil 4.20) donma çözünme sonrası 2.5 mm penetrasyon miktarı için, 3363.02 Kg(f) yük kuvvetine mukavemet göstermiştir (şekil 4.21, şekil 4.22). Δ CBR ilişkisine baktığımızda bu değer %387.83 olarak bulunmuştur (çizelge 4.14, şekil 4.25). %20 oranında killi zemin BOF curufu karıştırılmış zemin numuneleri için kabarma miktarlarına baktığımızda 19 nolu numunede 2.65 mm, 20 nolu numunede 3 mm ve 21 nolu numunede 2.7 mm olarak bulunmuştur. (çizelge 4.15, şekil 4.27).

Yaptığımız bu çalışmayı genel olarak incelediğimizde, killi zemin numunelerine BOF curufu eklendiğinde donma-çözünme çevriminde genel olarak aşınmalarda, zemin mukavemet direncinde, donmaya karşı hassasiyette, tuzlu ortalama donma-çözünme aşınmalarına karşı dirençte ve ayrıca hava ortamında donma-çözünme aşınmalarına karşı dirençte dayanım arttırıcı özellik gösteren sonuçlara varılmıştır.

BOF curufunun zeminlerde iklim aşınmalarının verdiği korozif etkilerin azalma sebebini daha iyi anlayabilmek için mineralojik yapısında incelenmiştir. BOF curufunun ve testlerde belirlenen oranlarda (%3, %6, %9 %12, %15, %20) killi zemin+BOF curufu karışımı numuneleri üzerinde mineralojik ve kristalogrofik yapının difüzyon bağı ile daha sağlam bir boşluk dolgusu sağlayarak kompakt bir yapı elde edildiği gözlenmiştir. Bunun en iyi örneği %12 ile %20 oranlarında kil+BOF curufu karışımlarında olduğu gözlenmiştir (şekil 5.6).

KAYNAKLAR

- [1] Bilen M, 2010, “Çelikhane Curuflarından Liç-Karbonatlaştırma Prosesi ile Kalsiyum Karbonat Kazanılması”, Yüksek lisans tez çalışması, Çukurova Üniversitesi, Adana.
- [2] Zaimoğlu A.S. (2010). “Freezing-thawing Behavior of Fine-Grained Soils Reinforced with Polypropylene Fibers”, Cold Regions Science and Technology, 60, 63-65.
- [3] UK Environment Agency, 2010, “Waste Exemption Review - Getting Ready for Change” (v0.1, March 2010).
- [4] UK Environment Agency, 2011, “The Regulation of Materials Being Considered under the Waste Protocols Project” (v.13 September 2011).
- [5] Akbulut, H., Gürer, C., “Atık Mermerlerin Asfalt Kaplamalarda Agregata Olarak Değerlendirilmesi” İmo Teknik Dergi, 2006 3943-3960, Yazı 261.
- [6] Kaya, G., Turan, S., “Yüksek Fırın Curufunun Seramik Sektöründe Katma Değeri Yüksek Ürünlerin Eldesinde Değerlendirilmesi” Mühendis Ve Makine - Cilt: 45 Sayı: 536
- [7] Bilge T., 2001, Yüksek Fırın Curufu Katkısının Kil Zeminlerin Stabilizasyonuna Etkisinin Araştırılması, T.C. BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi
- [8] Türk Standartları (2003) “Deneyleri Donmaya ve Çözünmeye Karşı Direncin Tayini”, (TS EN 1367-1), Ankara.
- [9] TS EN 1367-2., 2003, “Magnezyum Sülfat Deneyi”, Türk Standartları, Ankara.
- [10] Zaimoğlu A. Ş., Hattatoğlu F., 2013, “Yüke Maruz İnce Daneli Zeminlerin Donma-Çözünme Davranışı”, Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 19 (3), 177-120.
- [11] <http://www.nuve.com.tr/tr/products/id-300-climatic-test-cabinet>
- [12] Türkiye Teknoloji Geliştirme Vakfı, 2012, “İskenderun Körfezi’nde Endüstriyel Simbiyoz Projesi ve Türkiye’de Demir-Çelik Sektörü Atıklarının Ekonomiye Kazandırılması”, Ankara
- [13] Türkiye Teknoloji Geliştirme Vakfı, 2012, “İskenderun Körfezi’nde Endüstriyel Simbiyoz Projesi ve Türkiye’de Demir-Çelik Sektörü Atıklarının Ekonomiye Kazandırılması”, Ankara
- [14] Zaimoğlu A. Ş., Yetimoğlu T., 2011, Liquid and Plastic Limits of Fine-Grained Soils Treated with Ice, Snow, and Vapor”, Turkish J. Eng. Env. Sci. 35, 217 – 223.
- [15] Bölükbaşı Ö. S., Demir U. ve Uçar A. (2012). “Enriched BOF Slag Used at Isdemir Sinter Plant”, 16th International Metallurgy & Materials Congress, IMMC, İstanbul.
- [16] Karpuzcu M., Çelikhane Curuflarının Geri Kazanımı, (Curuflar Atık mı – Yan Ürün mü Kaynak mı - TOBB Türkiye Demir ve Demir Dış Metaller, Meclis Danışmanı), 1-4.

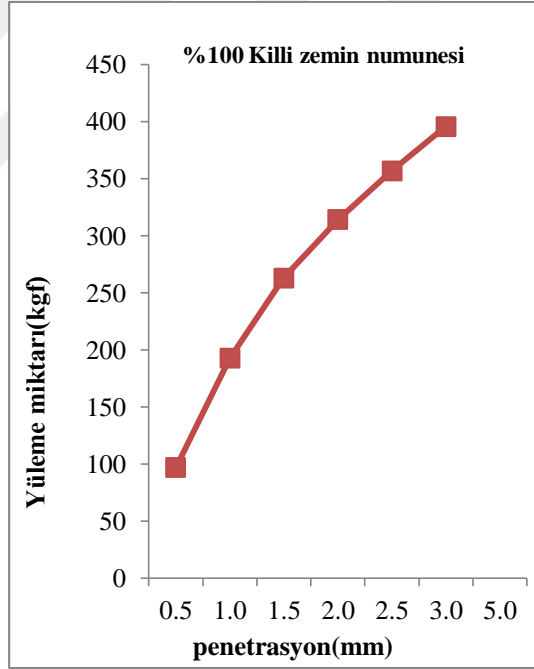
- [17] Beycioğlu A., Başığıt C. ve Subaşı S. (2008). “Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanımı ile Geri Kazanılması ve Çevresel Etkilerinin Azaltılması”, Çevre Sunumları Sempozyumu, Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli.
- [18] Erol A. (2007), “C Sınıfı Uçucu Kül Katkılı Siltlerin Dayanım ve Donma-Çözünme Direncinin Deneysel Olarak İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [19] Mumcu A., Arısoy C. ve Şeşen M.K., 2001., “Sinter Üretiminde Bazik Oksijen Fırını (BOF) Curufunun Kullanılmasının Etkileri”, I. Ulusal Demir-Çelik Sempozyumu ve Sergisi, Zonguldak.
- [20] Işık A., 2014, “Sıkıştırılmış Zeminlerde Donma-Çözünme Olayının Deneysel İncelenmesi”, Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ, İstanbul.
- [21] TS 1900, 1987, “CBR Deney Standardı”. İnşaat Mühendisliğinde Zemin Laboratuvar Deneylei, Ankara.
- [22] Demir S., Kılıç M., 2010, “Şişen Zeminlerin Tanımlanması ve Zemin İyileştirme Yöntemleri”, Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Toprak Bölümü, Tokat.
- [23] YILMAZ I., KARACAN E., 1998, “Zeminlerin şişme özellikleri”, Cumhuriyet Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, 58140 Sivas.
- [24] Meslekî Eğitim Ve Öğretim Sisteminin güçlendirilmesi Projesi(Megep),2006, İnşaat Teknolojisi Agrega Deneylei- 2, Ankara.
- [25] BATMAN A., 2015, “Öğütülmüş Kuvvars Kumunun kilin Mukavemet Özelliklerine Etkisinin Araştırılması”, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü yüksek lisans tezi, Erzurum.
- [26] ÜNVER E., Eylül 2015, “Problemlili Kil Zeminlerin Uçucu Kül İle İyileştirilmesi” Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü yüksek lisans tezi, Eskişehir.
- [27] M.M. Allam and S. Sridharan, “Effect of wetting and drying on shear strength” J. Geotechnical Engineering Div., ASCE, Vol. 107, No. 4, pp. 421-438, 1981.
- [28] K. Collins, “Characterization of expansive soil microfabric.” In Proceedings of the 5th International Conference on Expansive Soils, Adelaide, South Australia, May 1984, pp. 37-41, 1984.
- [29] R. Push, “Unfrozen water as a function of clay microstructure”, Engineering Geology, Vol.13, pp. 157-162, 1979.
- [30] J.K. Mitchell, Fundamentals of Soil Behavior, 2nd edn. Wiley, New York, 1993.

EKLER

EK-1: Donma-çözünme öncesi CBR değerleri;

Çizelge Ek 1. %100 Killi zemin numunesi CBR değerleri

Penetrasyon (mm)	Proving Ring		
	Reading (kN)	Düz Yük. / Load Kg(f)	Ters Yük. / Load Kg(f)
0.5	0.95	96.87	
1.0	1.89	192.73	
1.5	2.58	263.09	
2.0	3.08	314.07	
2.5	3.50	356.90	
3.0	3.88	395.65	
5.0	-	0.00	

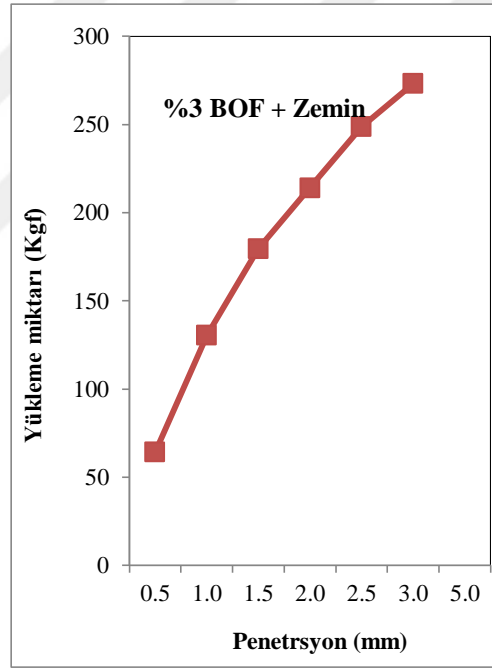


Şekil Ek 1. %100 killi zemin numunesi

%100 killi zemin numunesi CBR oranı %26.24 olarak bulunmuştur.

Çizelge Ek 2. %97 Killi zemin numunesi+%3 BOF curufu

Penetrasyon (mm)	Proving Ring		
	Reading (kN)	Düz Yük. / Load Kg(f)	Ters Yük. / Load Kg(f)
0.5	0.63	64.24	
1.0	1.28	130.52	
1.5	1.76	179.47	
2.0	2.10	214.14	
2.5	2.44	248.81	
3.0	2.68	273.28	
5.0		0.00	

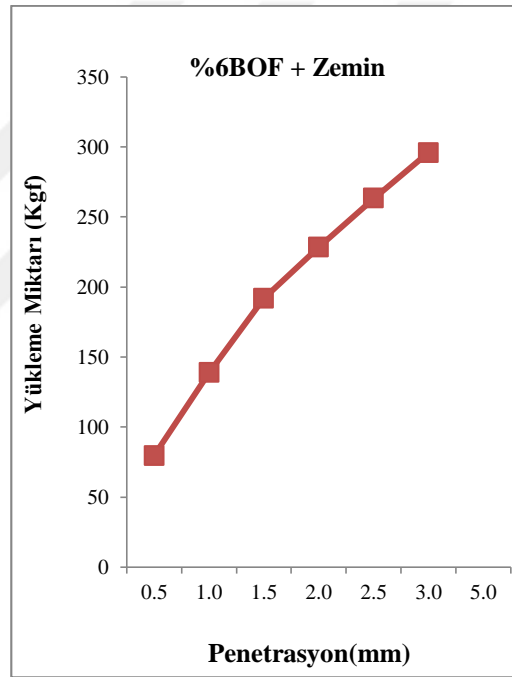


Şekil Ek 2. %97 Killi zemin numunesi+%3 BOF curufu

%97 Killi zemin numunesi+%3 BOF curufu CBR oranı %18.29 olarak bulunmuştur.

Çizelge Ek 3. %94 Killi zemin numunesi+%6 BOF curufu

Penetrasyon (mm)	Proving Ring		
	Reading (kN)	Düz Yük. / Load Kg(f)	Ters Yük. / Load Kg(f)
0.5	0.78	79.54	
1.0	1.36	138.68	
1.5	1.88	191.71	
2.0	2.24	228.42	
2.5	2.58	263.09	
3.0	2.90	295.72	
5.0	-	0.00	

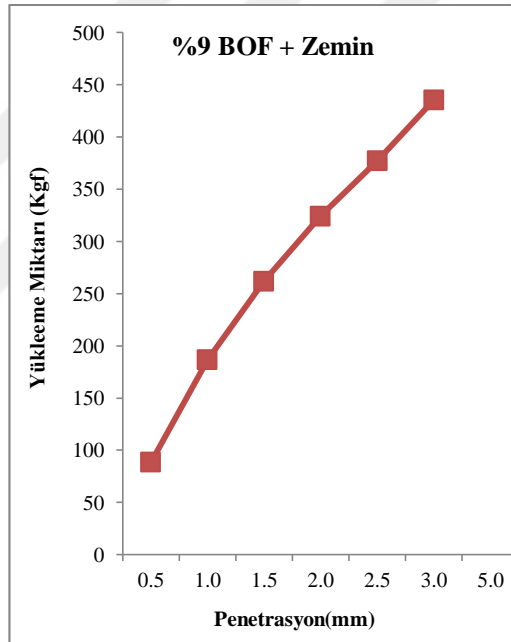


Şekil Ek 3. %94 Killi zemin numunesi+%6 BOF curufu

%94 Killi zemin numunesi+%6 BOF curufu CBR oranı %19.34 olarak bulunmuştur.

Çizelge Ek 4. %91 Killi Zemin numunesi+%9 BOF curufu

Penetrasyon (mm)	Proving Ring		
	Reading (kN)	Düz Yük. / Load Kg(f)	Ters Yük. / Load Kg(f)
0.5	0.87	88.72	
1.0	1.83	186.61	
1.5	2.57	262.07	
2.0	3.18	324.27	
2.5	3.70	377.29	
3.0	4.27	435.42	
5.0	-	0.00	

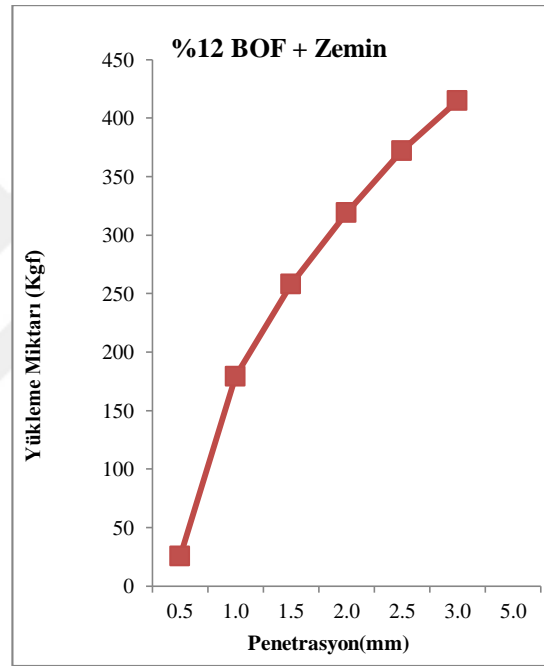


Şekil Ek 4. %91 Killi Zemin numunesi+%9 BOF curufu

%91 Killi Zemin numunesi+%9 BOF curufu %27.74 olarak bulunmuştur.

Çizelge Ek 5. %88 Killi zemin numunesi+%12 BOF curufu

Penetrasyon (mm)	Proving Ring		
	Reading (kN)	Düz Yük. / Load Kg(f)	Ters Yük. / Load Kg(f)
0.5	0.25	25.49	
1.0	1.76	179.47	
1.5	2.53	257.99	
2.0	3.13	319.17	
2.5	3.65	372.20	
3.0	4.07	415.02	
5.0	-	0.00	

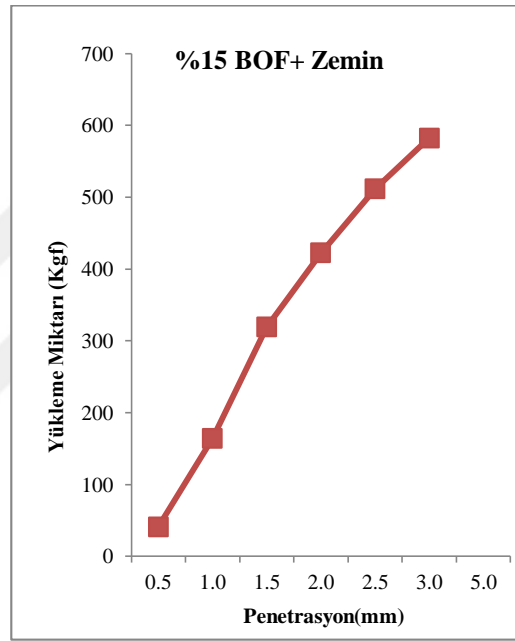


Şekil Ek 5. %88Killi zemin numunesi+%12 BOF curufu

%88Killi zemin numunesi+%12 BOF curufu %27.37 olarak bulunmuştur.

Çizelge Ek 6. %85 Killi zemin numunesi+%15 BOF curufu

Penetrasyon (mm)	Proving Ring		
	Reading (kN)	Düz Yük. / Load Kg(f)	Ters Yük. / Load Kg(f)
0.5	0.4	40.79	
1.0	1.61	164.17	
1.5	3.13	319.17	
2.0	4.14	422.16	
2.5	5.02	511.90	
3.0	5.71	582.26	
5.0	-	0.00	

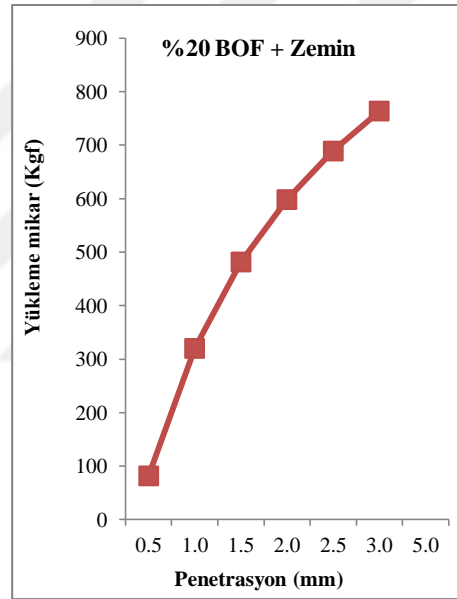


Şekil Ek 6. %85 Killi zemin numunesi+%15 BOF curufu

%85 Killi zemin numunesi+%15 BOF curufu %37.64 olarak bulunmuştur.

Çizelge Ek 7. %80 Killi zemin numunesi+%20 BOF curufu

Penetrasyon (mm)	Proving Ring		
	Reading (kN)	Düz Yük. / Load Kg(f)	Ters Yük. / Load Kg(f)
0.5	0.8	81.58	
1.0	3.14	320.19	
1.5	4.72	481.31	
2.0	5.87	598.57	
2.5	6.76	689.33	
3.0	7.49	763.77	
5.0	-	0.00	

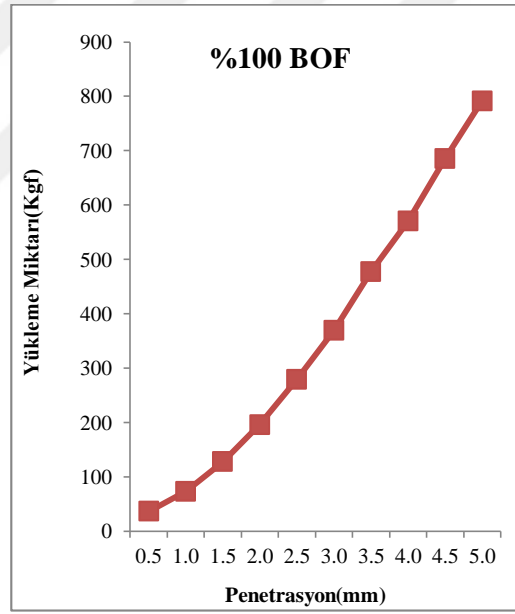


Şekil Ek 7. %80 Killi zemin numunesi+%20 BOF curufu

%80 Killi zemin numunesi+%20 BOF curufu %50.69 olarak bulunmuştur.

Çizelge Ek 8. %100 BOF curufu CBR değeri

Penetrasyon (mm)	Proving Ring		
	Reading (kN)	Düz Yük. / Load Kg(f)	Ters Yük. / Load Kg(f)
0.5	0.36	36.71	
1.0	0.72	73.42	
1.5	1.25	127.46	
2.0	1.92	195.79	
2.5	2.74	279.40	
3.0	3.62	369.14	
3.5	4.68	477.23	
4.0	5.59	570.02	
4.5	6.72	685.25	
5.0	7.76	791.30	



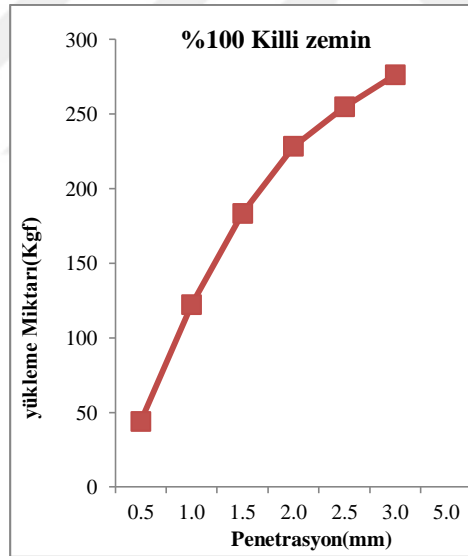
Şekil Ek 8. %100 BOF curufu CBR değeri

%100 BOF curufu %38.79 olarak bulunmuştur.

Donma-çözüne sonrası CBR değerleri sonuçları

Çizelge Ek 9. %100 Killi zemin numunesi CBR değerleri

Penetrasyon (mm)	Proving Ring		
	Reading (kN)	Düz Yük. / Load Kg(f)	Ters Yük. / Load Kg(f)
0.5	0.43	43.85	
1.0	1.2	122.37	
1.5	1.8	183.55	
2.0	2.24	228.42	
2.5	2.50	254.93	
3.0	2.71	276.34	
5.0	-	0.00	

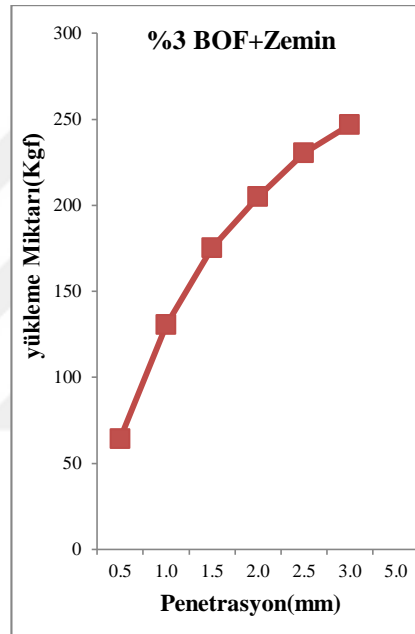


Şekil Ek 9. %100 Killi zemin numunesi CBR değerleri

%100 Killi zemin numunesi CBR değeri 18.74 olarak bulundu.

Çizelge Ek 10. %97 Killi zemin numunesi+%3 BOF curufu

Penetrasyon (mm)	Proving Ring		
	Reading (kN)	Düz Yük. / Load Kg(f)	Ters Yük. / Load Kg(f)
0.5	0.63	64.24	
1.0	1.28	130.52	
1.5	1.72	175.39	
2.0	2.01	204.96	
2.5	2.26	230.46	
3.0	2.42	246.77	
5.0	-	0.00	

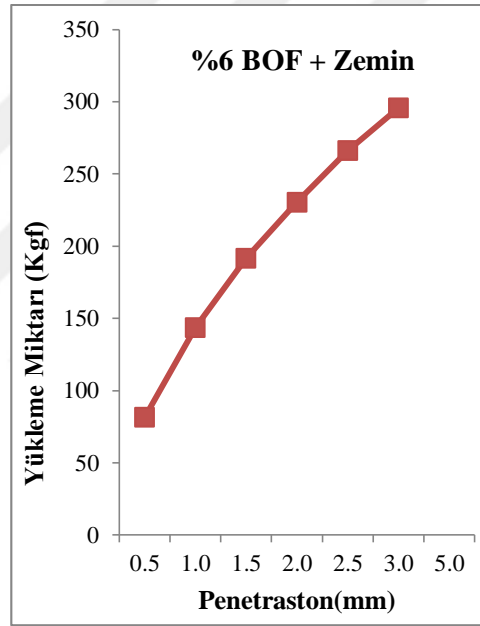


Şekil Ek 10. %97 Killi zemin numunesi+%3 BOF curufu

%97 Killi zemin numunesi+%3 BOF curufu donma-çözünme sonrası değeri 16.95'dir.

Çizelge Ek 11. %94 Killi zemin numunesi+%6 BOF curufu

Penetrasyon (mm)	Proving Ring		
	Reading (kN)	Düz Yük. / Load Kg(f)	Ters Yük. / Load Kg(f)
0.5	0.8	81.58	
1.0	1.41	143.78	
1.5	1.88	191.71	
2.0	2.26	230.46	
2.5	2.61	266.15	
3.0	2.9	295.72	
5.0	-	0.00	

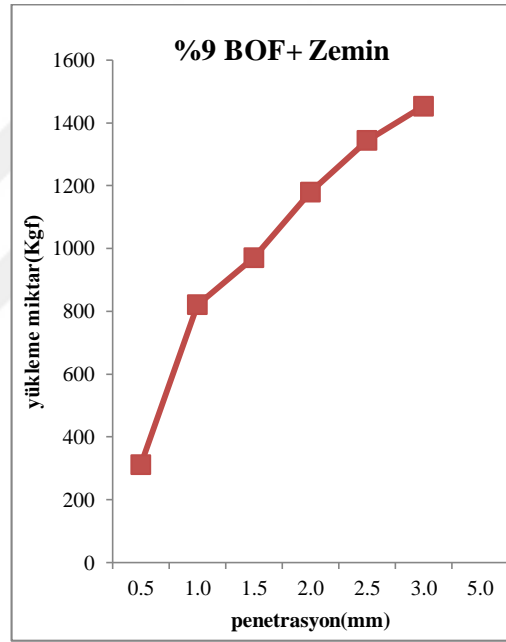


Şekil Ek 11. %94 Killi zemin numunesi+%6 BOF curufu

%94 Killi zemin numunesi+%6 BOF curufu Donma-çözünme sonrası değeri 19.57'dir.

Çizelge Ek 12. %91 Killi zemin numunesi+%9 BOF curufu

Penetrasyon (mm)	Proving Ring		
	Reading (kN)	Düz Yük. / Load Kg(f)	Ters Yük. / Load Kg(f)
0.5	3.06	312.03	
1.0	8.05	820.87	
1.5	9.52	970.77	
2.0	11.57	1179.81	
2.5	13.18	1343.99	
3.0	14.25	1453.10	
5.0	-	0.00	

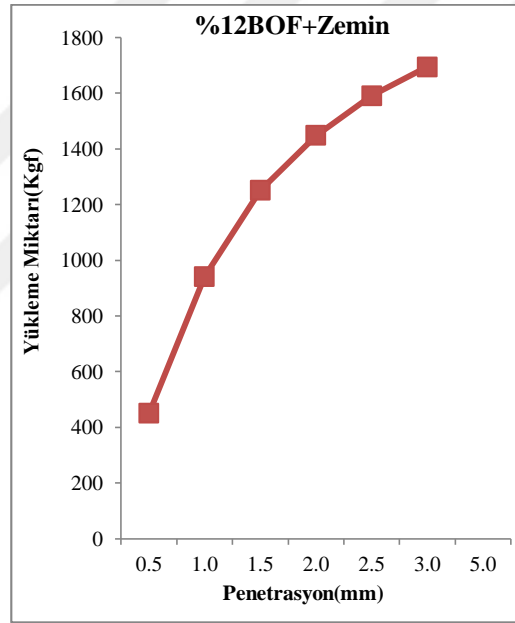


Şekil Ek 12. %91 Killi zemin numunesi+%9 BOF curufu

%91 Killi zemin numunesi+ %9 BOF curufu Donma-çözünme sonrası değeri 98.82'dir.

Çizelge Ek 13. %88 Killi zemin numunesi+%12 BOF curufu

Penetrasyon (mm)	Proving Ring		
	Reading (kN)	Düz Yük. / Load Kg(f)	Ters Yük. / Load Kg(f)
0.5	4.42	450.71	
1.0	9.23	941.20	
1.5	12.26	1250.17	
2.0	14.20	1448.00	
2.5	15.60	1590.76	
3.0	16.61	1693.75	
5.0	-	0.00	

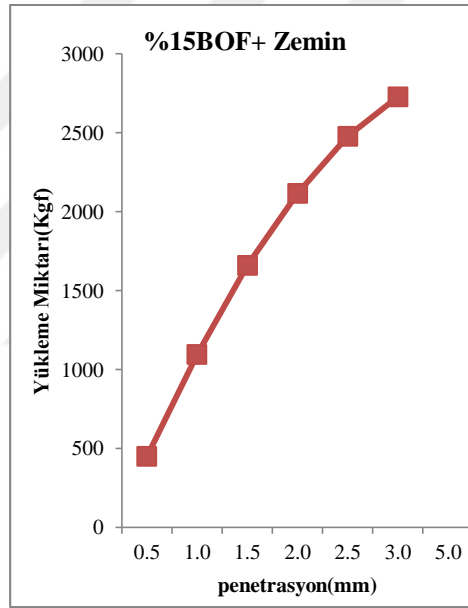


Şekil Ek 13. %88 Killi zemin numunesi+%12 BOF curufu

%88 Killi zemin numunesi+%12 BOF curufu donma-çözünme sonrası değeri 116.97'dir

Çizelge Ek 14. %85 Killi zemin numunesi+%15 BOF curufu

Penetrasyon (mm)	Proving Ring		
	Reading (kN)	Düz Yük. / Load Kg(f)	Ters Yük. / Load Kg(f)
0.5	4.4	448.68	
1.0	10.72	1093.14	
1.5	16.26	1658.06	
2.0	20.73	2113.87	
2.5	24.29	2476.89	
3.0	26.74	2726.72	
5.0	-	0.00	

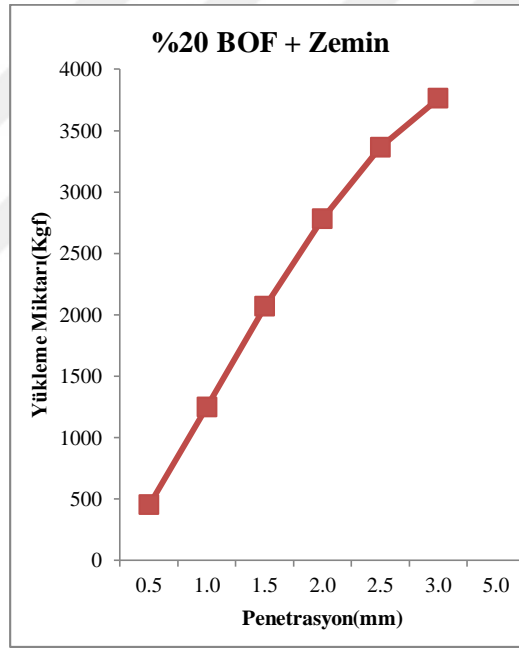


Şekil Ek 14. %85 Killi zemin numunesi+%15 BOF curufu

%85 Killi zemin numunesi+%15 BOF curufu donma-çözünme sonrası değeri 182.12'dir.

Çizelge Ek 15. %80 Killi zemin numunesi+%20 BOF curufu

Penetrasyon (mm)	Proving Ring		
	Reading (kN)	Düz Yük. / Load Kg(f)	Ters Yük. / Load Kg(f)
0.5	4.39	447.66	
1.0	12.21	1245.07	
1.5	20.25	2064.92	
2.0	27.26	2779.75	
2.5	32.98	3363.02	
3.0	36.87	3759.69	
5.0	-	0.00	

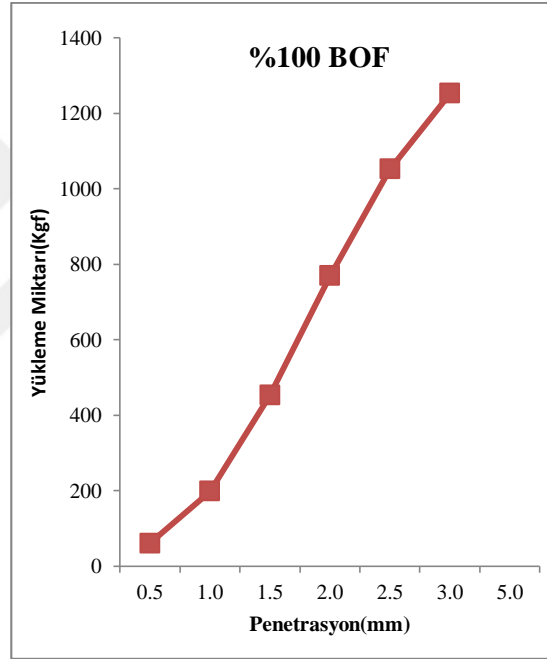


Şekil Ek 15. %80 Killi zemin numunesi+%20 BOF curufu

%80 Killi zemin numunesi+%20 BOF curufu donma-çözünme sonrası değeri 247.28'dir.

Çizelge Ek 16. %100 BOF curufu Donma-çözünme sonrası CBR değerleri

Penetrasyon (mm)	Proving Ring		
	Reading (kN)	Düz Yük. / Load Kg(f)	Ters Yük. / Load Kg(f)
0.5	0.59	60.16	
1.0	1.94	197.82	
1.5	4.44	452.75	
2.0	7.54	768.87	
2.5	10.31	1051.33	
3.0	12.28	1252.21	
5.0	-	0.00	



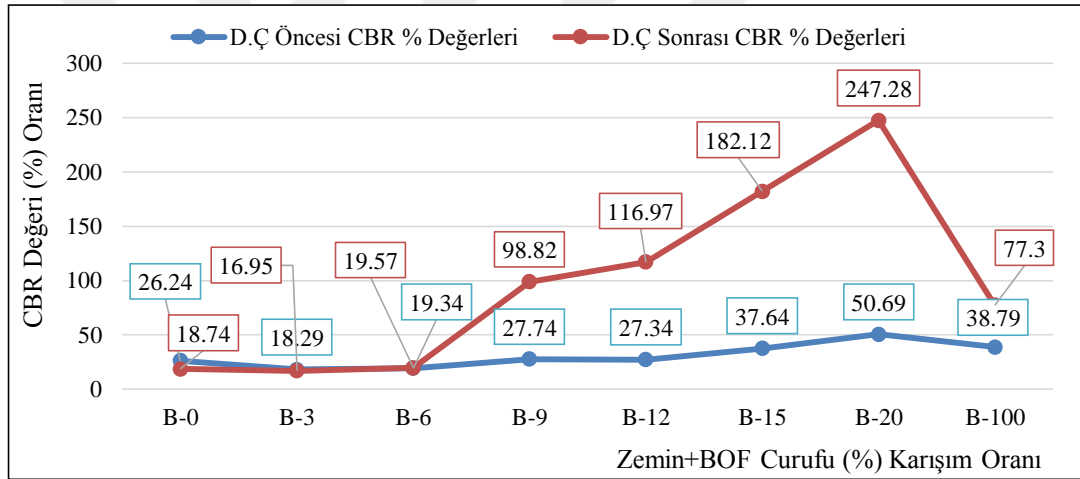
Şekil Ek 16. %100 BOF curufu donma-çözünme sonrası CBR değerleri

%100 BOF curufu Donma-çözünme sonrası CBR değeri 77.38 olarak bulundu.

EK-2. Donma-çözünme öncesi ve sonrası CBR % Değerleri

Çizelge Ek 17. Donma-çözünme öncesi ve sonrası CBR% oranları değeri tablosu

Donma çözünme öncesi ve sonrası CBR % değerleri		
Num. No:	D.Ç Öncesi CBR % Değerleri	D.Ç Sonrası CBR % Değerleri
B-0	26.24	18.74
B-3	18.29	16.95
B-6	19.34	19.57
B-9	27.74	98.82
B-12	27.34	116.97
B-15	37.64	182.12
B-20	50.69	247.28
B-100	38.79	77.3



Şekil Ek 17. Donma-çözünme öncesi ve sonrası CBR % değerleri

ÖZGEÇMİŞ

Yazar, 1985 yılında Mersin sağlık mahallesi'nde doğdu. İlkokul, Ortaokul ve liseyi Hatay'ın Erzin İlçesinde tamamladı. 2010-2014 yılları arsında T.C. Niğe Üniversitesi (Ömer Halisdemir Üniversitesi) Mühendislik Fakültesi Maden Mühendisliğinde tamamladı. 2014 yılında İleri Metalurji ve Malzeme teknolojileri Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans öğretimine başladı. Yüksek öğrenimi sırasında iki adet uluslararası hakemli makale yazdı.

Bir Mühendis olarak hedefi öğrendiği teorik bilgileri uygulayabileceği projelerde çalışmak, tecrübeli mühendislerle çalışıp daha tecrübeli halegelerek daha iyi porjeler geliştirmek ve mühendislik uygulamalarını tam anlamıyla kapsayıp aranan bir mühendis olmak tek isteğidir.