

**ATIK KARBON KARASININ YÜKSEK
PLASTİSİTELİ KİL ZEMİNİN BAZI
GEOTEKNİK ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ**

Ayşe Tuğba ÖZTÜRK

**Yüksek Lisans Tezi
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı**

Geoteknik Bilim Dalı

Dr. Öğr. Üyesi Fatih IŞIK

2019

Her hakkı saklıdır

**ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**ATIK KARBON KARASININ YÜKSEK PLASTİSELİ KİL
ZEMİNİN BAZI GEOTEKNİK ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ**

Ayşe Tuğba ÖZTÜRK

**İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
Geoteknik Bilim Dalı**

**ERZURUM
2019**

Her Hakkı Saklıdır



T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürlüğü
TEZ ONAY FORMU






ATIK KARBON KARASININ YÜKSEK PLASTİSİTELİ KİL ZEMİNİN
BAZI GEOTEKNİK ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ

Dr. Öğr. Üyesi Fatih IŞIK danışmanlığında, Ayşe Tuğba ÖZTÜRK tarafından hazırlanan bu çalışma, 12/03/2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Geoteknik Bilim Dalı'nda Yüksek Lisans Tezi olarak **oybirliği / oy çokluğu (.../...)** ile kabul edilmiştir.

Başkan: Prof. Dr. A. Şahin ZAIMOĞLU

Üye : Doç. Dr. S. Banu İKİZLER

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Fatih IŞIK

İmza : 
İmza : 
İmza : 

Yukarıdaki sonuç;

Enstitü Yönetim Kurulu'nun **14.03/2019** tarih ve **..12..../..34.....** nolu kararı ile onaylanmıştır.


Prof. Dr. Mehmet KARAKAN
Enstitü Müdürü

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaklardan yapılan bildiriş, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak olarak kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

ATIK KARBON KARASININ YÜKSEK PLASTİSİTELİ KİL ZEMİNİN BAZI GEOTEKNİK ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ

Ayşe Tuğba ÖZTÜRK

Atatürk Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Geoteknik Bilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Fatih IŞIK

Günümüzde endüstrileşmeye ve dünya nüfusundaki artışa bağlı olarak oldukça fazla atık madde ortaya çıkmaktadır. Son yıllarda çevre bilincinin artmasıyla atıkların azaltılması ve diğer taraftan var olan atıkların geri dönüştürülmesi dünya çapında önemli bir konu haline gelmiştir.

Bu çalışmada, atık lastiklerin piroliz yöntemi kullanılarak geri dönüştürülmesi ile elde edilen karbon karasının (KK) yüksek plastisiteli kilin geçirimsizlik katsayısı üzerine olan etkisi incelenmiştir. Erzurum'un Oltu ilçesinden temin edilen kil zemine ağırlıkça %1, %3 ve %5 oranlarında karbon karası katılarak karışımlar elde edilmiştir. Karışımlar üzerinde standart ve modifiye kompaksiyon deneyleri yapılarak her iki sıkıştırma enerjisi içinde optimum su içeri ve maksimum kuru birim hacim ağırlık değerleri belirlenmiştir. Daha sonra karışımlar 0, 5 ve 10 çevrim donma-çözölmeye maruz bırakıldıktan sonra bu numuneler üzerinde düşen seviyeli permeabilite deneyi yapılmış ve geçirimsizlik katsayısı belirlenmiştir. Yapılan laboratuvar deney sonuçlarına göre genel olarak standart ve modifiye kompaksiyon enerjisi altında sıkıştırılan numunelerin arasında tüm donma-çözölmeye çevrim sayılarında (0-5-10 çevrimlerde) en düşük geçirimsizlik katsayısı değerini %1 KK katkılı numunelerin verdiği tespit edilmiştir.

2019, 63 sayfa

Anahtar Kelimeler: Atık lastik, karbon karası, kil, kompaksiyon, donma-çözölmeye, geçirimsizlik katsayısı

ABSTRACT

MS Thesis

EFFECT OF WASTE CARBON BLACK ON SOME GEOTECHNICAL PROPERTIES OF HIGH PLASTIC CLAY

Ayşe Tuğba ÖZTÜRK

Atatürk University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Civil Engineering
Department of Geotechnical

Supervisor: Assist. Prof. Dr. Fatih IŞIK

Nowadays, due to industrialization and the increase in the world population, a large amount of waste materials are generated. In recent years, with the increase of environmental awareness, waste reduction and recycling of existing wastes has become an important issue at the worldwide. In this study, the effect of carbon black obtained by recycling of waste tires by using pyrolysis method on hydraulic conductivity of CH clay was investigated. 1%, 3% and 5% by weight of carbon black were added to the clay soil obtained from Oltu district of Erzurum. Standard and modified compaction tests were performed on all mixtures and optimum water content and maximum dry unit weight values were determined in both compaction energies. After the mixtures were subjected to 0, 5 and 10 freeze-thaw cycles, falling head permeability tests were performed on these samples and the permeability coefficients were determined. According to the results of the laboratory tests, it was found that the %1 carbon black added sample gave the lowest permeability coefficient compacted under both standard and modified compaction energy and also at all freeze-thaw cycles (0-5-10).

2019, 63 pages

Keywords: Waste tire, carbon black, clay, compaction, freeze-thaw, permeability coefficient

TEŞEKKÜR

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum bu çalışma süresince her türlü yardım ve desteğini esirgemeyen tez danışmanım Sayın Dr. Öğr. Üyesi Fatih IŞIK'a içtenlikle teşekkürlerimi sunarım.

Verdiği burs ile tezimi destekleyen Torunlar GYO'ya teşekkürlerimi sunarım.

Her zaman, her konuda beni asla yalnız bırakmayan ve desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen sevgili aileme ve özellikle her zaman yanımda olan anneme teşekkürlerimi sunarım.

Ayşe Tuğba ÖZTÜRK

Şubat, 2019

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ	ix
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Amaç ve Kapsam.....	1
1.2. Kaynak Özetleri.....	2
2. KURAMSAL TEMELLER.....	9
2.1. Zeminlerde Donma-Çözülme	9
2.1.1. Zeminlerin donma-çözülme sonrası davranışı	12
2.1.1.a. Donma-çözülmenin zeminlerin fiziksel özelliklerine etkisi	12
2.1.1.b. Donma-çözülmenin zeminlerin mekanik özelliklerine etkisi.....	13
2.2. Katkı Malzemesi.....	14
2.2.1. Lastik ve lastiğin yapısı	14
2.2.2. Atık lastikler ve geri dönüşümü	17
2.2.3. Piroliz yöntemi	19
2.2.3.a. Piroliz verimini etkileyen faktörler.....	20
2.2.3.b. ÖTL'lerin pirolizi	22
2.2.4. Karbon karası	23
3. MATERYAL ve YÖNTEM.....	27
3.1. Deney Programının Tanıtımı	27
3.2. Materyal.....	27
3.2.1. Deneyde kullanılan malzemeler	27
3.2.2. Deneyde kullanılan aletler	29
3.3. Yöntem	31
3.3.1. Karışımların indeks özelliklerini belirlemede kullanılan yöntemler	31
3.3.2. Numunelerin sıkıştırılmasında kullanılan yöntem	35

3.3.3. Geçirimsizlik katsayısı	40
3.3.4. Temas açısı ölçümü	42
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA.....	44
4.1. Temas Açısı ve SEM Görüntüleri ile İlgili Bulgular	44
4.2. İndeks Özellikleri ile İlgili Bulgular	47
4.3. Kompaksiyon Deneyleri ile İlgili Bulgular	49
4.4. Permeabilite Deneyleri ile İlgili Bulgular	51
5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER	56
KAYNAKLAR	58
ÖZGEÇMİŞ	64

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

°C	Santigrat Derece
m ³	Metre Küp
g	Gram
I _p	Plastisite İndisi
i	Hidrolik Eğim
k	Geçirimlilik Katsayısı
m	Metre
LL	Likit Limit
w _{opt}	Optimum Su Muhtevası
PL	Plastik Limit
γ _{kmax}	Maksimum Kuru Birim Hacim Ağırlık

Kısaltmalar

ASTM	American Society for Testing Materials
BS	British Standard
KK	Karbon Karası
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
TS	Türk Standartları

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Donma kabarmasının şematik gösterimi	11
Şekil 2.2. Lastiğin yapısı.....	15
Şekil 2.3. Atık lastik	17
Şekil 2.4. Atık lastik depolama düzeni	18
Şekil 2.5. ÖTL geri dönüşüm şeması.....	23
Şekil 2.6. Karbon karası.....	24
Şekil 3.1. Deneyleerde kullanılan kil.....	28
Şekil 3.2. Deneyleerde kullanılan karbon karası	28
Şekil 3.3. Donma-çözünme cihazı	29
Şekil 3.4. Deneyleerde kullanılan kompaksiyon aleti	30
Şekil 3.5. Deneyleerde kullanılan kalıplar.....	30
Şekil 3.6. Özgül ağırlık deneyi aşamaları	32
Şekil 3.7. Hidrometre deneyi	33
Şekil 3.8. Düşen koni penetrasyon deneyi yapım aşamaları.....	34
Şekil 3.9. Plastik limit deneyi	35
Şekil 3.10. Sıkıştırılmış zeminde $w-\rho_k$ ilişkisi.....	37
Şekil 3.11. Standart kompaksiyon deneyi kalıbı ve tokmağı	38
Şekil 3.12. Standart kompaksiyon deneyi.....	39
Şekil 3.13. k_c geçirimlilik katsayısı belirleme yöntemleri	40
Şekil 3.14. Düşen seviyeli permabilite deney şeması	42
Şekil 3.15. Temsili katı yüzeyindeki sıvı damlasının temas açısı	42
Şekil 3.16. Sırasıyla hidrofilik, hidrofobik ve süper hidrofobik yüzeyler	43
Şekil 4.1. Temas açısı görüntüleri.....	45
Şekil 4.2. Karbon karası SEM görüntüsü	46
Şekil 4.3. %3 KK katkıli numune SEM görüntüsü.....	47
Şekil 4.4. KK içeriğine göre kıvam değerlerindeki değişim.....	48
Şekil 4.5. KK oranına göre maksimum kuru birim hacim ağırlık değişimi.....	50
Şekil 4.6. KK oranına göre optimum su içeriği değişimi	50
Şekil 4.7. KK oranı – Geçirimlilik katsayısı ilişkisi	52

Şekil 4.8. KK oranı – Geçirimsizlik katsayısı ilişkisi	54
---	----

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1. Binek ve kamyon lastiklerinin bileşimi ve ağırlıkları.....	16
Çizelge 2.2. Lastik ve diğer yakıtların enerji içerikleri bakımından karşılaştırılması	16
Çizelge 3.1. Standart kompaksiyon ve modifiye kompaksiyon deneyi arasındaki farklar	40
Çizelge 4.1. Temas açısı değerleri	45
Çizelge 4.2. KK içeriğine göre kıvam değerleri	48
Çizelge 4.3. Kompaksiyon deney sonuçları.....	49
Çizelge 4.4. Permeabilite deney sonuçları.....	52

1. GİRİŞ

1.1. Amaç ve Kapsam

Dünya nüfusunun son yıllarda şehirlerde yoğunlaşması ve tüketimin artması, atık miktarında da hızla artışa neden olmuştur. Çevre bilincinin artmasıyla birlikte atıkların depolanmasında daha sıkı standartlar uygulanmaya başlanmıştır. Günümüzde atıkların azaltılması, var olan atıkların hammadde olarak kullanılmasına dair atık yönetimi önemli konulardan biridir. Endüstriyel atıkların değerlendirilmesi ile çevre kirliliğinde, doğal kaynakların kullanımında ve maliyette azalma meydana gelecektir. Dolayısıyla bu konu hem ekonomiye hem de çevre kirliliğine fayda sağlayacaktır (Şahin 2013). Günümüzde, ömrünü tamamlamış taşıt lastikleri, fazla olmasının yanında, değersiz bir atık konumundadırlar (Sugözü ve Mutlu 2009).

Bu çalışmada, atık lastiklerden piroliz yöntemi ile elde edilen karbon karasının, Erzurum'un Oltu ilçesinden temin edilen CH kil zeminin bazı mühendislik özellikleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. Kile ağırlıkça %1, %3 ve %5 oranlarında karbon karası ilave edilerek karışımlar elde edilmiştir. Karışımların: optimum su muhtevaları, maksimum kuru birim hacim ağırlıklarındaki değişimler tespit edilmiştir. Daha sonra karışımlar 5 ve 10 çevrim donma-çözölmeye maruz bırakıldıktan sonra bu numuneler üzerinde düşen seviyeli permeabilite deneyi yapılarak geçirimsizlik katsayısı belirlenmiştir. Numuneler iki farklı enerji (standart proktor, modifiye proktor) ile sıkıştırılarak elde edilmiş ve her iki durum için de sonuçlar irdelenmiştir.

Yapılan deneysel çalışmada karbon karasının CH kilinin geçirimsizliğine etkisinin tespit edilmesi ve geçirimsizlik katsayısını düşürmek için kullanılıp kullanılmayacağı belirlenmesi amaçlanmaktadır.

1.2. Kaynak Özetleri

İklim, zeminin mühendislik özelliklerini etkileyen faktörlerden biridir. Zeminin muhteva ettiği suyun miktarı yağış, sulama, güneş etkisi vb. nedenlerle değişmekte olup, ortam sıcaklığındaki azalma ya da artış ile de donma-çözülme meydana gelmektedir (Işık 2014). Bu donma-çözülmenin zeminler üzerindeki etkisini araştırmak üzere birçok çalışmalar yapılmıştır.

Linell ve Kaplar (1959), yaptıkları çalışmalarda çeşitli oranlarda bentonit içeren zeminler kullanmışlardır. Bu zeminleri çeşitli donma-çözülmeye maruz bıraktıktan sonra bentonit miktarının fazla olduğu zemin numunelerinde kabarma miktarının azaldığını tespit etmişlerdir.

Andersland ve Anderson (1978), zemin muhtevsındaki suyun iklimsel nedenlerle buza dönüşmesi üzerinde yaptıkları çalışmada, suyun altıgen yapılı kafesinin açılmasıyla hacminin yaklaşık %9 arttığını tespit etmişlerdir. Oluşan buz kristallerinin büyüdükçe birbirleriyle ve zemin daneleriyle etkileşime geçtiğini belirtmişlerdir.

Yong *et al.* (1985), yapmış oldukları çalışmada, saf sodyum bentoniti donma-çözülmeye maruz bıraktıktan sonra mekanik özelliklerindeki değişimi incelemişlerdir. Sonuç olarak likit limit, özgül yüzey ve katyon değişim kapasitesinin yaklaşık %10 azaldığını saptamışlardır.

Wallace (1987), kullanılan zemine %0-6 arasında değişen oranlarda bentonit ilave edip, donma-çözülme sonrası permeabilite deneyi yapmıştır. Bu numuneleri 70 kPa'lık efektif hücre basıncı altında incelemiş ve yüksek efektif gerilme basıncının olduğu durumlarda donma-çözülmenin geçirimsizlik katsayısı artışına neden olmadığını belirtmişlerdir.

Broderick ve Daniel (1990), zemin geçirimsizliğinde sıkıştırma yöntemlerinin etkisini incelemek amacıyla çalışma yapmışlardır. Aynı zeminde hem standart hem de modifiye

proktor deneyi yapmışlardır. Sonuç olarak modifiye proktor yöntemiyle yapılmış sıkıştırmada, zeminin daha az geçirimli olduğunu tespit etmişlerdir.

Kim ve Daniel (1992), zeminin geçirimlilik katsayısı üzerinde donma-çözülmenin etkisini araştırmak için numuneleri 35 kPa'lık efektif gerilme altında, esnek duvarlı permeabilite deneyine tabi tutmuşlardır. Sıkıştırmayı optimum su muhtevasının kuru tarafında ve optimum su muhtevasında olmak üzere iki çeşit yapmışlardır. Kuru tarafta yapılan deney sonucunda donma-çözülmeden sonra geçirimlilik katsayısının 2-6 kat arasında arttığı bulunmuştur. Optimum su muhtevasında yapılan deneyde ise yaklaşık 100 kat arttığını tespit etmişlerdir.

Tester ve Gaskin (1992), kireçtaşı agregası ile kaolin, illit ve bentoniti farklı oranlarda karıştırarak donma-çözülme deneyine tabi tutmuşlardır. %2, %8 ve %14 oranlarını kullanarak yaptıkları karışımları standart kompaksiyon enerjisiyle sıkıştırmışlardır. İnce dane oranının artmasıyla donma-kabarmanın hızının da arttığını belirlemişlerdir. Kaolinin en hızlı kabardığı, daha sonra illitin ve nispeten en yavaş kabarmasının da bentonitte olduğunu tespit etmişlerdir. Brandl (2008) yaptığı çalışmada donma-kabarmanın hızının yalnızca bu orana bağlı olmadığını ve zemin minorolojisinin de etkili olduğunu belirlemiştir.

Othman ve Benson (1993) yaptıkları çalışmada sürşarj yükünün donma-çözülme sonrasında geçirimlilik katsayısına etkisini incelemişlerdir. Sürşarj yükü arttıkça geçirimlilik katsayısı değerlerindeki düşüşlerde azalma olduğu belirlenmiştir. Donma-çözülme sonrasında ölçülen geçirimlilik katsayısı değeri 80 kPa'nın üzerindeki sürşarj yüklerinde donma-çözülme öncesinde çok değişmediği belirlenmiştir.

Eigenbrod (1996), yaptığı çalışmada 30-50 arası likit limit değerlerine, 16-25 arası plastik limit değerlerine sahip dört çeşit kili, 4 kPa büyüklüğünde konsolide ettiği numuneler üzerinde uyguladığı donma-çözülme deneyi yapmıştır. Likit limit değerinin donma-çözülme çevriminin artmasıyla azaldığını belirlemiştir.

Viklander (1998) yaptığı çalışmada kullandığı ince daneli zemin numunelerini 15 farklı sıklıkta yerleştirmiş ve 18 kez donma-çözölmeye tabi tutmuşlardır. Boşluk oranı 0.25-0.56 değerlerine sahip numuneleri -3°C 'de en az 4 gün boyunca dondurup, $+20^{\circ}\text{C}$ 'de çözdürölmüşür. Sonuçlar incelendiğinde boşluk oranının en fazla olduğu numunelerde geçirimlilik katsayılarında 1.4-30 kat arttığı gözlenmiştir.

Konrad ve Samson (2000), yaptıkları çalışmada farklı oranlarda oluşturdukları kaolin-silt karışımını tek donma-çözölmeye bırakmışlardır. %25, %35 ve %50 oranlarına sahip karışımlarda kil oranının artmasıyla geçirimlilik katsayısında da artış olduğunu belirlemişlerdir.

Yıldız ve arkadaşları (2004), yüksek plastisiteli Aksaray kili ve düşük plastisiteli Doğanhisar kili üzerinde çalışmalar yapmışlardır. İki kili de 28 gün küre tabi tuttuklarında Aksaray kilinin 15 kat, Doğanhisar kilinin ise 3 kat serbest basınç mukavemetinin arttığını tespit etmişlerdir. Donma-çözölmeye çevrimlerinden sonra ise bu değerleri %10-%15 arasında düşüş gözlenmiştir.

Erol (2007), Turgutlu yöresinden tedarik ettiği silt zemine ile C sınıfı uçucu kül ve portland çimentosu belli oranlar dahilinde, optimum su muhtevalarında karıştırarak kıvam limitlerini belirlemiş, standart proktor, serbest basınç ve donma-çözölmeye deneyleri yapmıştır. %10 uçucu kül ilavesi ile zeminin likit limiti ve plastisite indisi artmakta, daha büyük uçucu kül oranlarında likit limit değeri sabitlenirken plastik limit artışının devam etmekte olduğunu, bunun sonucunda plastisite indisi önce arttıktan sonra azalışa geçtiğini tespit etmiştir. En büyük serbest basınç dayanımı değerini en fazla katkı malzemesi yüzdesine sahip numuneden elde etmiştir. Belli oranları aşmamak kaydıyla ne kadar çok uçucu kül ve çimento ilave edilirse zeminin dayanımı o kadar artmakta olduğunu belirlemiştir.

Brandl (2008) yaptığı çalışmada sürşarj yükünün, donma-kabarmasına etkisini araştırmıştır. %98 kompaksiyon sıklığına sahip, %1'i 0.002mm dane çapını geçmeyen oranda hazırlamış olduğu karışımlarla deneyini gerçekleştirmiştir. 0.02 mm boyutundan

küçük %3, %8 ve %13 oranlarına sahip karışımlarla üç çeşit zemin numunesini kullanmıştır. Deney sonuçlarına göre sürüşürj yükü arttıkça, kabarma miktarı azalmaktadır.

Li ve arkadaşları (2012), yaptıkları çalışmada siltli kil zemin numunesini standart proktor enerjisiyle sıkıştırıp 100-300 kPa'lık basınçlar ve toplam 31 donma-çözölme çevrimi uygulayarak konsolidasyonsuz-direnajsız (UU) üç eksenli basınç deneyi gerçekleştirmişlerdir. Çevrimde donma 16 saat -30°C, çözölme 8 saat +30°C değerlerinde uygulanmıştır. Donma-çözölmeye maruz bırakılan numunelere üç eksenli basınç deneyi yapılmış ve mohr daireleri çizilerek kohezyon değerlerini saptamışlardır. Çevrimin miktarı arttığında kohezyon değeri düşmektedir.

Ghazavi ve arkadaşları (2010), yaptıkları çalışmalarda donma-çözölmenin serbest basınç mukavemeti ile ilişkisini incelemişlerdir. Gerilmenin olmadığı numunelerde çevrimin artmasıyla serbest basınç mukavemetinin düştüğü belirlenmiştir.

Paudel ve arkadaşları (2010), yaptıkları çalışmada ince daneli zeminlere çeşitli sayılarda donma-çözölme uygulayıp, konsolidasyon deneyi yapmışlardır. Donma-çözölme çevriminin artmasıyla konsolidasyon katsayısında da artış olduğu görölmüştür.

Jing ve arkadaşları (2013), yaptıkları çalışmalarda çeşitli plastisitelere sahip ve optimum su içeriklerinde sıkıştırılan 3 ayrı numuneyi 7 kez donma-çözölmeye maruz bırakmışlardır. Çevrim sonrasında numunelere 100-300 kPa'lık değerlerde değışen basınçlarda konsolidasyonsuz-drenajsız üç eksenli basınç deneyi yapmışlar ve mohr daireleri ile kırılmanın gerçekleştığı andaki kayma mukavemetinin değerlerinin tespitini yapmışlardır. Plastisite indisinin artmasıyla kayma mukavemetinde de artış olduğunu saptamışlardır.

Keskin ve arkadaşları (2017), yaptıkları çalışmada ince daneli zeminlerde katkı malzemesi (mermer tozu, pomza tozu ve kireç tozu) içeren ve içermeyen zeminleri donma-çözölmeye maruz kalmadan ve maruz kaldıktan sonraki serbest basınç

mukavemetinin değişimini incelemişlerdir. Kireç tozu katkısının serbest basınç mukavemeti değerinde önemli artışlar sağladığını belirlemişlerdir. Pomza tozu katkısının da serbest basınç mukavemet değerine olumlu etkisi olduğunu tespit ederlerken, mermer tozunun olumlu etkisinin olmadığını tespit etmişlerdir. Donma-çözölme etkisindeki numunelerde katkı içermeyen numunede %81, mermer tozu içeren numunede %37, pomza tozu içeren numunede %56 ve kireç tozu içeren numunede ise %73 seviyelerinde azalma gözlemlenmişlerdir.

Kireç, pomza, mermer atıkları, bitüm, çimento, uçucu kül, beton atıkları, talaş, ağaç kabuğu, çakıl ve endüstriyel atıklar vb. malzemeler killi zeminlerin mühendislik özelliklerinin iyileştirilmesi amacıyla kullanılan malzemeler olarak sayılabilir (Çimen vd 2016). Bu malzemelerin çeşitli yöntemlerle zeminler üzerindeki etkisini inceleyen birçok çalışma yapılmıştır.

Joshi ve arkadaşları (1975), kohezyonlu malzemelere Kansas'ın üç farklı santralinden temin ettikleri uçucu kül ile karıştırıp deneylere tabi tutmuşlardır. Sonuçlar kuru birim hacim ağırlığının azaldığını, optimum su muhtevasının arttığını, likit limitin azaldığını, plastik limitin ise arttığını göstermektedir.

Savran (1988), CH kili ile uçucu kül karışımı üzerinde hem standart hem de modifiye proktor deneyi yapmıştır. Standart proktor deneyi sonucunda uçucu kül miktarı arttıka kuru birim hacim ağırlığının azaldığı, optimum su muhtevasının arttığı tespit edilirken, modifiye proktor deneyinde kuru birim hacim ağırlığının daha fazla, optimum su içeriğinin daha az olduğu saptanmıştır.

Nicholson ve arkadalarının (1993), Hawaii kili ile uçucu kül karışımları ile çalışmalar yapmışlardır. Kullandıkları kil yüksek plastisiteli olduğundan işlenmesi ve sıkıştırılması zor bir malzemedir. Çalışma sonucunda %15 ve %25 oranında uçucu kül kullanıldığında kilin optimum su muhtevasının arttığı, kuru birim hacim ağırlığının ise azaldığı tespit edilmiştir.

Ersan (1996), zemini hem uçucu kül hem de uçucu kül-kireç karışımı ile karıştırıp, kıvam limitleri ve dane birim hacim ağırlığının değişimini incelemiştir. Çalışma sonucunda likit limitin ve plastik limitin arttığı, plastisite indisinin ve dane birim hacim ağırlığının azaldığını tespit etmiştir. Uçucu kül oranı arttıkça optimum su muhtevası artmış ve giderek sabitleşmeye yaklaşırken, maksimum kuru birim hacim ağırlık değeri azalmıştır.

Çokça (2001), zemine %0-%25 arasında değişen oranlarda uçucu kül ekleyerek deneyler yapmıştır. Uçucu kül miktarı arttıkça likit limitin, aktivitenin ve şişme potansiyelinin azaldığını tespit etmiştir.

Zorluer ve arkadaşları (2006), yaptıkları çalışmada atık depolama tabakalarında kullanılan atık mermer tozu katkılı geçirimsiz kil bölümünün donma-çözülme etkisine karşı davranışını incelemişlerdir. Kil tabakası olarak %10 bentonit + %90 Kaolin ve bunlara ek olarak %5, %10, %15 mermer tozu ilave etmişlerdir. Elde edilen numuneler 12 çevrime maruz bırakılıp oluşan dane kaybının deney başındaki ağırlığına oranı hesaplanmıştır. Dane kaybının en az olduğu değer, mukavemeti en yüksek olan değerdir. Yapılan çalışma sonucunda %5 oranındaki mermer tozu ilavesinin etkisinin olmadığı, %10 mermer tozu ilavesinde kayıp oranının %13,5 olduğu, %15'lik ilavede ise oranın %12,5 olduğu tespit edilmiştir. %15 atık mermer tozunun ideal karışım oranı olarak belirlenmiştir. Bu da atık mermer tozu ilavesi artışı ile mukavemet arasında doğru ilişki olduğunu saptamıştır.

Şahin (2013), atık lastik ve bentonit eklenmiş silis dumanının geçirimsiz örtü malzemesi olarak kullanımını araştırmak için çeşitli oranlardaki karışımlar üzerinde yaptığı bir dizi deneyler sonucu bentonit miktarının artmasıyla geçirimsizliğin önemli derecede azaldığını, kauçuk miktarının artmasıyla ise azaldığını tespit etmiştir. Bunun nedeninin ise kauçuk sıkışırken hava boşluklarını bünyesinde daha çok tutmasıdır. Bu boşluklarda suyun geçişini kolaylaştırarak artırmaktadır. Bunun aksine bentonit bu hava boşluklarını bünyesine su alarak şişmekte ve tüm boşlukları doldurmakta böylelikle su geçişine

engel olmaktadır. Silis dumanı için suyla reaksiyona girip sertleşmesi nedeniyle geçirimsizliği düşürmektedir.

Sezer ve arkadaşları (2017), yaptıkları çalışmada puzolanik çimento, kireç ve uçucu kül malzemelerini farklı oranlarda bentonit içeren kumlu zemine ekleyerek incelemeler yapmışlardır. Çalışma sonucunda bentonit oranının artmasıyla kirecin dayanıma etkisinin arttığını, puzolanik çimentonun etkisinin ise uçucu küle göre daha yüksek dayanım değeri sağladığını belirlemişlerdir.

2. KURAMSAL TEMELLER

2.1. Zeminlerde Donma-Çözülme

Su donduğunda hacmi yaklaşık %9 artar. -22°C 'deki buz, hacmindeki artıştan dolayı 207 MPa'ya kadar basınç oluşturur ve bu basınç kayanın dağılmasına neden olabilir (Tsytovich 1975). Su zeminin ya da kayaların içine sızıp, sıcaklığın 0°C 'nin altına indiği durumlarda buz kristaline dönüşür ve genleşir. Sıcaklık değeri 0°C 'nin üstünde bir değere ulaştığında ise oluşan buz kristalleri eriyerek su haline geri döner. Bu şekilde tekrarlanma işlemine donma-çözülme denir (Nasirpur 2014). Zemindeki su muhtevasının değişimi ile ıslanma-kuruma, hava sıcaklığındaki değişimi ile de donma-çözülme meydana gelir. Bu olaylar zeminin şekillenmesine veya bozulmasına neden olur. Zeminlerin mevsime dayalı maruz kaldığı sıcaklık ve nem değişiklikleri fiziksel ve daha birçok özelliklerini etkilemektedir. Donma-çözülme iklimsel şartlara bağlıdır (Özgan vd 2012).

İnce danelerden oluşan zemin donduğu zaman suyun buz merceğine dönüşmesi gözeneklerin en büyüğünde olur. Suyun var olma potansiyelinin en fazla olduğu gözenek bu büyük gözenektir. Küçük gözeneklerde bulunan su ise daha sonra donar. Bu hâl zeminin içinde çatlak oluşumuna sebep olur (Nasirpur 2014). Chamberlain *et al.* (1990), donan zeminde yaptıkları çalışmada aldıkları kesitleri TEM (taramalı elektron mikroskobu) ile incelediklerinde zeminin dokusunda büyük değişikliklerin olduğu sonucuna varmışlardır.

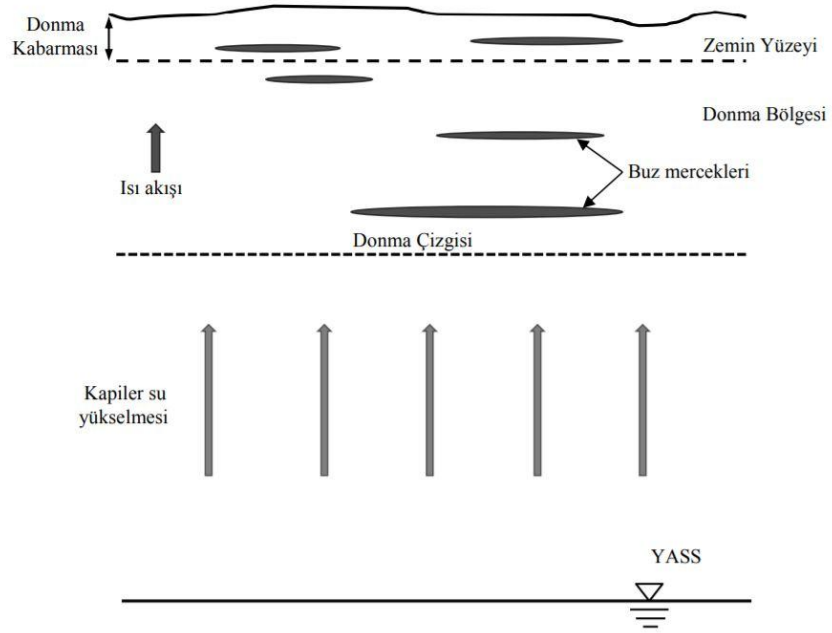
Soğuk iklim koşulları etkisindeki zeminlerde donma kabarması oluşur ve bu zemindeki suyun buz mercıklarına dönüşmesiyle meydana gelen hacim artışıdır. Yeryüzünde soğuk iklim koşullarının etkili olduğu birçok bölge donma olayına maruz kalır ve bu durum mühendislik uygulamalarına olumsuz etki etmektedir. İnşa edilen tüm yapılar zemine oturacağı için donmanın önemi büyüktür. Zeminin donma esnasında ve

sonrasında nasıl davranacağını bilmek, gereken önlemler ile olumsuz durumların önüne geçilmesi geoteknik mühendisliği konularındandır (Nasirpur 2014).

Zemindeki kabarmanın nedeni donmanın sonucu suyun buza dönüşmesi ile oluşan hacim artışıdır. Zemindeki zemin artışının tek sebebi suyun hacminin artması değildir. Donduğunda hacmi azalan sıvı içeren zeminlerde donma-çözölmeye maruz bırakılan zeminlerde de hacim artışı gözlenmektedir. Bunun nedeninin sıvı hareketinin zeminin içinden donmuş bölgeye doğru taşınmasından ve sıvının burada buz mercekleri oluşturmasından kaynaklanmaktadır (Işık 2014).

Zeminin yüzeye yakın bölgelerinde hava sıcaklığının donma sıcaklığı altına düşmesiyle zemindeki su, buza dönüşür ve donma kabarması meydana gelir. Zeminde bulunan su kapileritenin de etkisiyle yüzeye doğru hareket eder ve donmuş bölge olarak isimlendirilen bölgedeki buz merceklerinde artışa neden olur. Donma kabarmasını yeraltı su seviyesinin derinliği, zeminin boşluğunda bulunan su miktarı ve sızma suyunun varlığı etkileyen faktörlerdir (Mitchell 1976).

Donma kabarmasının şematik olarak gösterimi Şekil 2.1’de gösterilmiştir. Kapileritenin ve ısı akışının etkisiyle buz mercekleri hacminde artış olur ve kabarma meydana gelir. Donmaya maruz zemindeki mevcut tabakalar; donmuş zemin, donma bölgesi ile donmamış zemindir. Donmuş zemin ile donmamış zemin arasındaki bölgeye donma bölgesi denmektedir ve son buz merceğinin oluşmuş olduğu yere kadardır (Işık 2014).



Şekil 2.1. Donma kabarmasının şematik gösterimi (Işık 2014)

Zeminin içerdiği suyun buz merceklerine dönüşebilmesi ve donma kabarmasının oluşması için zeminin donmaya karşı hassas olması, yeterli su miktarına sahip olması ve ortamdaki sıcaklığın ise donma sıcaklığının altında olması gerekmektedir (Kim *et al.* 1992).

Donan zeminlerde ortam sıcaklığı arttıkça mevcut buz mercekleri eriyerek suya dönüşür. Bu su zemindeki dane diziliminin daha gevşek duruma gelmesine neden olup, taşıma kapasitesinde düşüğe neden olur. Bu durumda donma olayının ardından zemin oturma ve deformasyonlara maruz kalır. Donma-çözülme ardından zeminin geçirimsizlik katsayısı, sıkışabilirliği ve mukavemeti gibi mühendislik özelliklerinde meydana gelecek değişiklikler önemlidir. Donma olayında donmuş tabakanın drenajı engellenmesinden dolayı zeminde mukavemet azalır, çatlaklar ve bozulmalar oluşur. Bu durum yol ve geoteknik mühendisliğinde sorun oluşturmaktadır. Donma olayı, neden olduğu sorunların çözülmesi için geoteknik mühendisliğinin konusu olmuştur (Nasirpur 2014).

2.1.1. Zeminlerin donma-çözülme sonrası davranışı

Tamamen donmuş, kısmen donmuş ve mevsimsel donmanın görüldüğü bölgeler soğuk iklim koşullarının görüldüğü bölgelerdir. Mevsimsel donmanın gerçekleştiği bölgelerde yıl içinde birkaç defa donma-çözülme gerçekleşmektedir. Donma-çözülmenin sonrasında ya da birçok tekrarlı durumda zemin hem fiziksel hem de mekanik açıdan etkilenir. Donma-çözülme hem alt yapılara hem de üst yapılara etki ettiğinden geoteknik mühendisliğin konularından olmuştur (Andersland and Ladanyi 1994).

Zeminlerde çözülmenin mühendislik parametrelerine etkisi birçok araştırmacının inceleme konusu olmuştur. Zeminde bulunan boşluklardaki suyun donmasıyla hacminde %9'luk artış meydana gelir. Bu durum zemindeki boşluklarda da hacim artması anlamını taşır. Zemin danelerinin birbirinden uzaklaşması ile yapısal olarak daha boşluklu ve daha az sıklığa sahip bir hâl alır. Oluşan bu yeni durum zeminde fiziksel ve mekanik değişimlere neden olmaktadır. Meydana gelen değişimleri araştırmacılar zemin mukavemetinde ve geçirimsizlik katsayısında değişen durumlar olarak belirtmişlerdir. Donma- çözülme sonrasında oluşan değişiklikleri fiziksel ve mekanik olarak iki şekilde incelenebilir (Işık 2014).

2.1.1.a. Donma-çözülmenin zeminlerin fiziksel özelliklerine etkisi

Zeminde meydana gelen donma olayında hacim artışı meydana gelirken, buzun erimesiyle de dane dizilimi değişir. Danelerin değişen dizilimi zeminin fiziksel özelliklerinde önemli değişikliklere neden olmaktadır. Geçirimsizlik katsayısı, boşluk oranı ve kıvam limitleri değişmektedir (Kim *et al.* 1992).

Donma olayından sonra oluşan buzun erimesiyle dane diziliminde meydana gelen değişiklikler geçirimsizlik katsayısını da değiştirmektedir. Buzların çözülmesinden sonra kılcal çatlaklar oluşur. Oluşan kılcal çatlaklar zemin içinden su geçişinin artmasına neden olmaktadır. Zemindeki suyun sızması donma-çözülme öncesine nispeten daha kolaydır. Bu nedenden dolayı donma-çözülme çevrim sayısı arttıkça geçirimsizlik

katsayısının da artması beklenir. Geçirimsizlik katsayısı değerleri 2 – 6 kat oranlarında artar. Geçirimsizlik katsayısındaki önemli artış ilk çevrimde meydana gelir, sonrasındaki çevrimlerde artış miktarı azalmaktadır (Kim *et al.* 1992).

Doğal ya da sıkıştırılan zeminlerdeki deney sonuçlarına göre donma-çözülmeden önce mevcut olan 10^{-8} - 10^{-12} m/sn mertebelerindeki geçirimsizlik katsayısı, 10^{-8} m/sn değerine inmektedir. Sürşarj yükü de geçirimsizlik katsayısına etki etmektedir. Sürşarj yükü arttıkça geçirimsizlik katsayısı değerlerindeki düşüşlerde azalma olmaktadır (Othman *et al.* 1994).

Zeminlerin boşluk oranları değiştikçe donma-çözülme sonrası geçirimsizlik katsayısı değerleri değişmektedir. Boşluk oranı fazla olan zeminlerde geçirimsizlik katsayıları artmaktadır. Zeminlerde donma-çözülme çevrim sayısı arttıkça boşluk oranı doğru orantılı bir şekilde artmamaktadır (Viklander 1998).

Likit limit değeri, donma-çözülme çevriminin artmasıyla azalır (Eigenbrod 1996).

2.1.1.b. Donma-çözülmenin zeminlerin mekanik özelliklerine etkisi

Zeminin fiziksel ve mekanik özellikleri; tamamen donmuş, kısmen donmuş ve mevsime bağlı sıcaklık farkları olan iklimsel nedenlere bağlı olarak değerlendirilmektedir. Tamamen donmuş zeminlerdeki bileşenler; buz, dane ve az oranda havadır. Zeminin davranışı içerdiği buz oranına ve zeminin sıcaklığına bağlıdır. Tamamen donmuş zemindeki mukavemet buzun, danenin ve buz-dane arasındaki etkileşim sebebiyle oluşan mukavemetten oluşmaktadır (Cruzda and Hohman 1997). Sıcaklığın mevsime bağlı olarak değiştiği bölgelerin zeminlerinde ise yıl içinde donma-çözülme birçok defa tekrarlanır. Oluşan durum zeminlerdeki geçirimsizliği, taşıma gücünü ve bunun gibi mühendislik özelliklerine etki etmektedir. Yol dolgularında, boruların geçtiği hatlarda ve yapıların temel zeminlerinde donma-çözülme etkili ve önemli olmaktadır (Işık 2014).

İnce daneli zeminlerin boşlukları daha çok su muhteva ettiklerinden donma-çözülmeden daha çok etkilenmektedir. Muhteva edilen bu su, donma sıcaklığının altında buza dönüşür ve hacmi yaklaşık %9 artar. Sıcaklığın yükselmesiyle oluşan buz erir, zeminde çatlaklar oluşur. Donma-çözülme sayısı arttıkça çatlaklarda da artış oluşur ve mukavemette düşüş gerçekleşir (Yıldız vd 2004). Çevrim sayısı arttıkça serbest basınç mukavemeti azalmaktadır (Ghavazi *et al.* 2010).

Diğer taraftan, donma-çözülmeye maruz kalan zeminlerde kohezyon değerlerinde değişim meydana gelmektedir. Donma-çözülme çevrim sayısı arttıkça zeminin kohezyon değerleri azalmaktadır (Li *et al.* 2012).

Çözülme sonrası geçirimsizlik katsayısındaki artış konsolidasyonun parametrelerinde de değişime neden olmaktadır. Geçirimsizlik katsayıları arttığında konsolidasyon oturmaları artar (Işık 2014). Donma-çözülme çevriminin artmasıyla konsolidasyon katsayısında da artış olmaktadır (Paudel *et al.* 2010).

2.2. Katkı Malzemesi

Zeminlerin mühendislik özellikleri üzerindeki etkisini incelemek amacıyla birçok katkı malzemesi incelenmiştir. Bu çalışma kapsamında atık lastiklerin proliz yöntemiyle ayrıştırılması sonucu oluşan karbon karası (KK) kullanılmıştır.

2.2.1. Lastik ve lastiğin yapısı

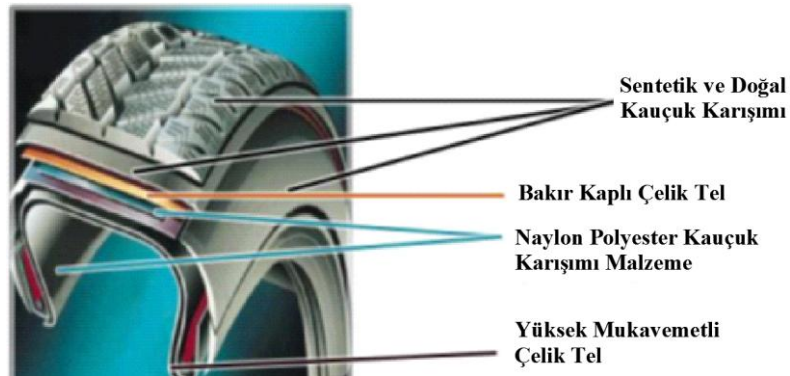
Lastiği, Türk Dil Kurumu farklı şekillerde tanımlamaktadır. Bu tanımlar, ayakkabı üzerine giyilen kauçuktan pabuç, kauçuktan yapılmış ayakkabı, kauçuktan yazı silgisi ve taşıtların jantlarına yerleştirilen elastiki tekerlek bandajı seklindedir (TDK). Teknik anlamda ise lastik, belli bir süre içinde belli bir sıcaklık ve basınç altında pişirilmiş, genellikle içerisinde bulunan hava ile motorlu veya motorsuz nakil araçlarının yere sürtünmesi ile hareketini başlatan, hızlandıran ve durmasını sağlayan, kullanım

yerlerine göre çeşitli ebatlarda, tiplerde ve yapılarda olabilen kauçuk hava yastığıdır (Yakaboylu 2010).

Karmaşık yapıları olan araç lastikleri kauçuk temelli malzemelerdir. Araç lastiklerinin yol ile arasındaki sürtünme nedeniyle aşınmaya maruz kalırlar. Bu nedenle zamanla ağırlıklarının %10-20'sini kaybederler. Lastiğin bulunduğu taşıtın türüne göre ağırlık kaybı değişiklik göstermektedir. 6.5 kg otomobil lastiğinde kayıp yaklaşık 1 kg olurken, 53 kg'lık kamyon lastiğinde kayıp 8-10 kg'dır (İmamoğlu 2012).

Kauçuk 18. yüzyılda Avrupa'da ortaya çıkmış ve ilk kez silgi, yapışkan ve hortum yapımında kullanılmıştır. Doğal kauçuk günümüzde ise otomobil parçalarında, lastiklerinde ve günlük hayattaki pek çok eşya, alette kullanılmaktadır. İlk olarak bitkilerden sıvı fazda elde edilen doğal kauçuk pıhtılaştırılıp, farklı proseslerden geçirilerek kullanım için hazır hale getirilmiştir (Vahapoğlu 2006).

Charles Goodyear tarafından vulkanizasyonun keşfi, otomobil tekerlerini kaplamasıyla lastik üretimi başlamış oldu. Otomobil lastiklerinin ilk şekli dolgu biçiminde olurken daha sonra içi basınçlı hava içeren biçimde üretilmiştir. Lastiği oluşturan kauçuk; doğal ve yapay karışımlardan oluşmaktadır. Mukavemetinin yüksekliğini sağlaması amacıyla naylon, tekstil elyafı, çelik tel de bulunmaktadır. Bunların dışında kimyasal koruyucular ve kimyasal yağlar da kullanılır. Lastiğin yapısı Şekil 2.2.'de gösterilmektedir (Emiroğlu 2006).



Şekil 2.2. Taşıt lastiğinin yapısı (Emiroğlu 2006)

Lastik bileşeninde doğal-yapay kauçuk, karbon karası, çelik tel, bez kuşak, dolgu maddeleri, hızlandırıcılar ve ozonlaştırmayı önleyen kimyasallar bulunmaktadır (Yakaboylu 2010). Çizelge 2.1’de iki tür lastik için yaklaşık ortalama bileşimler verilmiştir.

Çizelge 2.1. Binek ve kamyon lastiklerinin bileşimi ve ağırlıkları (Batır 2002)

Bileşim (Ağır. %’si)	Binek Lastiği (Ağır. %’si)	Kamyon Lastiği (Ağır. %’si)
Doğal kauçuk	14	27
Yapay kauçuk	27	14
Karbon karası	28	28
Çelik	9,6-15	9,6-15
Bez kuşak, dolgu maddeleri, hızlandırıcılar, ozonlaştırmayı engelleyici maddeler	16-17	16-17
Ortalama Ağırlık (kg)	6,5-10	54

Araç lastikleri organokimyasal bileşenler içerdiğinden ısı değerleri yüksektir. Bu nedenlerden dolayı kontrolsüz şekilde yakıldıklarında hava kirliliğine neden olurlar. Çizelge 2.2’de araç lastikleri ve diğer yakıtlar alt ısı değerlerine göre karşılaştırılmıştır. Alt ısı değer, bir yanma tepkimesinde oluşan suyun buhar fazında olması durumunda açığa çıkan ısı enerjisidir. Çizelgede de görüldüğü gibi lastik, doğal gazdan az, kömürden fazla alt ısı değerine sahiptir (Çetişli 2013).

Çizelge 2.2. Lastik ve diğer yakıtların enerji içerikleri bakımından karşılaştırılması (Çetişli 2013)

Yakıt	Alt Isıl Değer (MJ/kg)
Islak odun	10
Taş kömürü	29
Araç lastiği	32
Doğal gaz	46

2.2.2. Atık lastikler ve geri dönüşümü

Lastikler araçtan söküldükten sonra "Kullanılmış Lastik" veya "Ömrünü Tamamlamış Lastik" (ÖTL) olarak isimlendirilmektedirler (Şekil 2.3). Araçlardan sökülen bazı lastiklerin yasal sınır şartlarında diş sayısı mevcut olması halinde ya da kaplanarak uzmanların da onayı ile tekrar araç lastiği olarak kullanılması mümkündür. Bu sınıfın dışında kalan ÖTL'ler ise enerji geri kazanımı için değerlendirilir. ÖTL'lerin geri dönüşümü hem ekonomi hem de çevre açısından büyük önem taşımaktadır (Anonim 2015). TÜİK'in 2016 verilerine göre Türkiye'de trafiğe kayıtlı araç sayısı; 20 milyon 98 bin 994, yıllık ortalama ÖTL ise 300.000 tondur (Anonim 2016).



Şekil 2.3. Atık lastik (Anonim 2017)

ÖTL'lerin depolanma şekli diğer katı atıklardan farklıdır, ön işlemlerden geçirilmelidir. Boyutlarının küçültülmesi için boyut küçültme işlemlerinden geçirilmesi gerekir. İşlemden geçmeden stoklanmaları durumunda sağlığa ve çevreye zarar veren hayvan ve haşerelere barınak sağlanmasına neden olurlar (Şekil 2.4). Ayrıca depo alanlarında büyük çaplı yangınlar için potansiyel oluşturmasına sebep olur (Adhikari *et al.* 2000).

Atık lastik yönetimi ile ilgili olarak her ülkede farklı uygulamalar söz konusudur. AB ülkelerinde düzenli depolama alanlarına gönderilen lastik oranları giderek azalmış ve 2006 yılında sıfırlanmıştır (Juma *et al.* 2006). ÖTL'ler depolanmadan bütün ya da parçalanmış-granül şekillerde çeşitli alanlarda kullanılabilirler (Ünlü 2006). Parçalanmamış halde kullanım alanlarına örnek olarak parklar, gemilerin karaya

yanaşma noktaları, otomobil ve araçların park etme alanları, yolların stabilizasyonlarında, erozyon önleme gibi alanlar verilebilir. Granül ÖTL'lerin kullanım alanına örnek olarak ise otomotiv, spor, inşaat sektörü verilebilir (Gönüllü 2004).



Şekil 2.4. Atık lastik depolama düzeni (Anonim 2010)

ÖTL'ler üzerinde yakma ve piroliz yöntemleri geliştirilerek madde ve enerji geri kazanımı sağlanmaktadır. ÖTL üzerine ısıl işlem uygulanması birçok sorunu bertaraf eden bir çözümdür (Gönüllü 2004).

ÖTL'ler bütün olarak yakıldıklarında bazı yakıtlara göre yüksek ısıl değere sahip olduklarından Amerika ve Avrupa ülkelerinde çimento fabrikalarının yakıtı olarak kullanılmaktadırlar. Türkiye'de de ÖTL'nin yakıt olarak kullanılması için lisans alan çimento fabrikaları vardır (Ünlü 2006).

Yakma işlemi sonucu kurşun ve kadmiyum tuzu içeren kül oluşur. İçerdiği tuzlardan dolayı külün uzaklaştırılması ve depolanması durumlarında çeşitli sorunlara neden olmaktadır. Yanma işlemi 400°C'nin üstündeki sıcaklıklarda devam ettiğinde ekzotermik reaksiyonlar gerçekleştiği için sistemin sıcaklığı kendiliğinden artmaktadır. Yanma işlemi sürecinde ısı ve buhar oluşur. Bunlar endüstriyel uygulamalarda elektrik üretimi için ya da ısı ihtiyacını karşılamak için kullanılabilir. SO₂, H₂S, HCl, vb.

toksik gazlar insan sağlığı için zararlı gazlardır ve bu gazlar yanma süreci sonunda oluşurlar. Yanma tam gerçekleşmezse de bu durumda is oluşur. Bu tip ısı işlemlerin avantajları olduğu gibi dezavantajları da vardır. Maksimum ısı geri kazanımı, az kirletici emilasyonu, az güç üretim maliyeti bu yöntemin avantajları arasında gösterilebilirken, yatırım-işletme maliyetinin fazla olması, bacadan çıkan gazın arıtma süreci için yapılan harcamalar, işlemi gerçekleştirebilecek operatör bulmanın zor olması dezavantajlarından bazılarıdır. Verim de birçok faktörden etkilenmektedir. Yakma fırınının tasarımı, ısı verim, kullanılan yakıtın fiziksel özellikleri gibi etmenler verimi etkileyen faktörlere örnek olarak verilebilir (Sharma *et al.* 1998).

ÖTL'ler için kullanılacak başka ısı yöntem ise piroliz işlemidir. ÖTL'ler oksijensiz ortamlarda yüksek sıcaklıkta parçalanarak piroliz işlemine tabi tutulurlar. Piroliz işlemi ayrıntılı olarak Bölüm 2.2.3'de açıklanmıştır. Bu yöntemle kazanılan ürünlerin hacmi %50 oranında azalır, kalan kısmı ise enerjiye dönüşmektedir. Piroliz işlemi sonunda oluşan ürünler enerji ihtiyacını karşılamak amacıyla yakıt yerine kullanılabilirler. ÖTL'ler piroliz işlemine uğradıktan sonra sırasıyla %33, %35, %12, %20 oranlarında katı, sıvı, metal fraksiyonlar, gaz ürünler oluşmaktadır (Sharma *et al.* 1998).

2.2.3. Piroliz yöntemi

Piroliz, biyokütlenin oksijensiz ortamda, yüksek sıcaklıklarda ısıtılıp katı, sıvı ve gaz ürünlere dönüştürülmesi işlemidir. Biyokütlenin bileşimi, piroliz işleminin gerçekleştiği sıcaklık değeri, ısıtmanın hızı, alıkonma süresi oluşan ürün miktarını değiştirmektedir. Bu etkilerden alıkonma süresi katı ve gaz ürünün verimini etkilerken, düşük sıcaklık değeri katı ürünün, yüksek sıcaklık değeri ise gaz ürün verimini arttırmaktadır. Pirolizin gerçekleşmesi sırasında CO, CO₂, H₂, C₂H₄, C₂H₆, gazları ile az miktarda da su buharı oluşmaktadır. Sıvı ürünün verimini artırmanın etkili yolu piroliz yönteminin hızlı olmasıdır. Ortalama 500°C sıvı ürün veriminin en fazla olduğu sıcaklık değeridir. Ani piroliz (flash) yönteminin kullanılması durumunda ise aynı sıcaklık değerinde %80 sıvı ürün verimine ulaşılması mümkündür (Hicks *et al.* 1983).

Isıtmanın hızı piroliz sınıflandırmalarına neden olur; yavaş ve hızlı piroliz. Yavaş piroliz kömürün üretiminde kullanılmış yöntemdir ve ısıtma hızı düşüktür (0,1-1°C/dk). Hızın düşüklüğü katı haldeki ürünlerin daha çok olmasına neden olur (Demirbaş and Arin 2002). Reaktördeki gazlar uzun süre içerde durduğu için reaksiyonlara girerek katı ürünlere dönüşmek için imkân bulurlar (Çetişli 2013).

Hızlı pirolizde ısıtma hızının değeri yüksek (10-200°C/dk) olup, sıvı ve gaz ürünler üretmede verimli yöntemdir (Demirbaş and Arin 2002). Saniyeler içinde gerçekleşen bir işlemdir. Bridgwater ve arkadaşlarının (2003) yaptıkları çalışmalarda hızlı piroliz özellikleri özetlenip, süreçler tanımlanmış, akışkan yataklı reaktörlerin uygun olduğu tespit edilip önerilmiştir. Bu yöntemde en verim alınan ürün çeşidi sıvıdır. Optimum sıcaklık değeri ise 500°C'dir (Hicks 1983).

2.2.3.a. Piroliz verimini etkileyen faktörler

Piroliz verimini etkileyen sıcaklık başta olmak üzere pek çok etmen vardır. Bunlar sıcaklık, ısıtma hızı, reaksiyon süresi, basınç, parçacık boyutu, piroliz ortamı, katalizör ve reaktör geometrisi olarak sıralanabilir (Taşcı 2010).

Uçucu maddenin miktar ve bileşimini etkileyen önemli etmen piroliz sıcaklığıdır. Piroliz başlıca üç safhadan oluşur. Birinci safha 100-300 °C arasında meydana gelir. Bu safhada uçucu maddenin çıkışı fazla olmayıp, genellikle karbonoksitler ve su oluşmaktadır. Bozunmanın ikinci safhasında bütün uçucu maddenin %75'i açığa çıkmaktadır. Üçüncü aşama ise genellikle kömür için geçerlidir. Bu son aşamada katı ürün oluşumuyla birlikte ikinci bir gazlaştırma meydana gelmektedir. Bunu takiben yoğunlaşmayan gazlardan özellikle hidrojen oluşmaktadır (Hicks *et al.* 1983).

Diğer bir faktör ise ısıtma hızıdır. Yavaş pirolizde ısıtma hızı 1-10°C/dk mertebesinde dir. Hızlı pirolizde ise 102°C/sn'den fazladır. Hızlı pirolizin yavaş pirolize göre avantajlarından biri uçucu ürün veriminin yüksek olmasıdır, çünkü yavaş pirolizde oluşan uçucu ürünler ikincil, üçüncül parçalanma reaksiyonları verebilmektedir. Hızlı

pirolizin bir diğ er avantajı ise bozunmanın ve bozunma ürünlerinin kontrolü açısından dır. Çünkü yavaş ısıtma koşullarında bozunma ürünlerinin kontrol edilmesi güçtür (Erşahan ve Şara 1996).

Yapılan çalışmalarda reaksiyon süresinin de piroliz ürün dağılımına etkisi olabileceğ i tespit edilmiştir. Maksimum sıvı ürün verimine 600°C’de ulaşılır ve reaksiyon süresi 35 dakikadan 5 dakikaya indirilirse sıvı verimini %16’dan %27.6’ya yükselir (Rahman vd 2001).

Diğ er taraftan, piroliz ürün dağılımında basınç uçucu madde verimini etkileyen etmenlerdendir. Yüksek basınç parçalanma reaksiyonlarını hızlandırır ve böylece hafif hidrokarbon gazlarının artmasına neden olur. Düşük basınçta da katran ve hafif yağların verimlerinin daha yüksek olduğunu Hicks *et al.* (1983) yaptığı çalışmada tespit etmişlerdir.

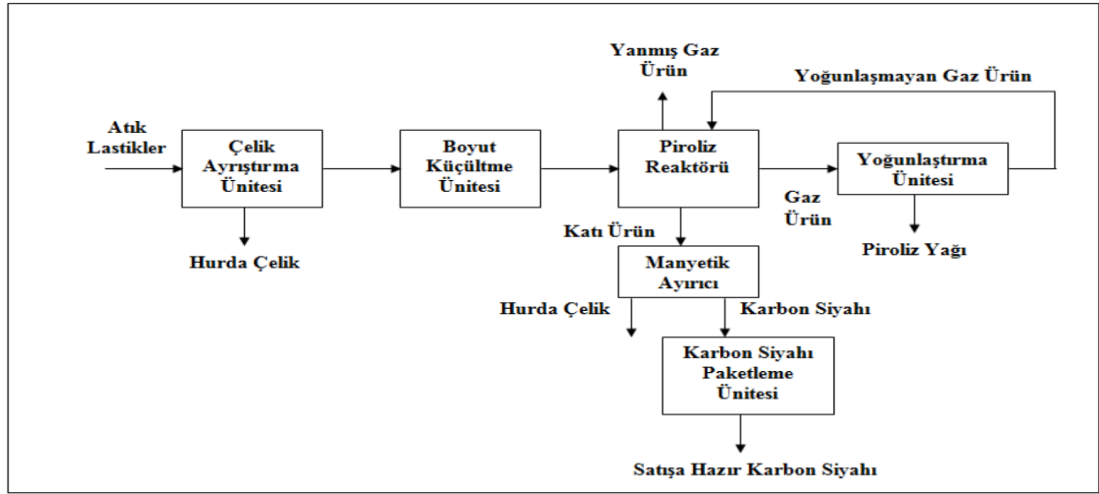
Parçacık boyutu piroliz verimini etkileyen bir diğ er etmendir ve bu ısıtma hızıyla ilgilidir. Boyutu büyük parçalar daha yavaş ısınacağı için, ortalama partikül büyüklüğü sıcaklıkları daha düşük olacaktır. Bu durumda uçucu veriminin daha düşük olması beklenir. Partikül büyüklükleri küçük olduğ unda düzgün bir şekilde ısınacaktır. Kömür tanecikleri üzerinde yapılan çalışmalarda 50 mikron altındaki tanecik boyutunun verime etkisi olmadığı tespit edilmiştir (Hicks *et al.* 1983).

Ürün dağılımı ve yapısını etkileyen parametreden biri de pirolizin gerçekleştiğ i ortamdır. Piroliz, normal, hidrojen (hidropiroliz), sürükleyici gaz (N₂, He gibi) ve su buharı gibi ortamlarda gerçekleştirilebilen bir yöntemdir. Sürükleyici gaz kullanımında N₂, He, Ar gibi gazlar tercih edilmektedir. Piroliz esnasında piroliz buharı oluşur ve sürükleyici gaz bu buharı hızlı bir şekilde polimerleşme, ısıl parçalanma ve yoğunlaşma gibi ikincil reaksiyonlara girmeden uzaklaştırarak ve sıvı ürün veriminde artış elde edilmesini sağlar (Hicks *et al.* 1983).

Hızlı pirolizden elde edilen ürünler, katalizörlerin etkisiyle daha faydalı ürünlere dönüştürülebilmektedir. Zeolit katalizörlerinin eklenmesiyle piroliz buharları katalitik olarak parçalanır ve benzin, dizel yakıt ve diğer hidrokarbon ürünler elde edilmektedir. Katalizi etkileyen önemli parametreler; katalizörün yüzey alanı, gözenek genişliği ve asitliliği gibi özellikleridir (Williams and Chishti 2000).

2.2.3.b. ÖTL'lerin pirolizi

Piroliz işleminden sonra elde edilen ürünler katı, sıvı ve gaz fazdadır. ÖTL'lerin pirolizi sonrasında da üç halde ürün elde edilir. Piroliz işleminde oluşan katı ürünün adı char'dır. ÖTL'nin char'ı karbon karası ve aktif karbondur. Piroliz sonrası ürünün ortalama %37'si char'dır. Oluşan char'ın yaklaşık %10-15'i kül içerdiğinden direkt kullanıma uygun değildir. ÖTL'lerin parçaları birbirlerinden ayrılmadan pirolize tabi tutulması, char'ın içinde kontamine şekilde naylon, keten, tel bulunmasına yol açabilir. Böyle durumlarda charın karbon karası olması ve bu şekilde kullanılması zor olmaktadır. Filtre ederek, buhar aktivasyonu ya da asit muamelesi gibi çeşitli yöntemlerin kullanılmasıyla oluşan char karbon karası kalitesine ulaşabilir. Oluşan karbon karası boyalarda, plastikten yapılan eşyaların üretilmesinde kullanılabilir (Şekil 2.5). Aktif karbon şeklinde kullanılması içinse yüzey alanının artırılması gerekir. Bu ise 800-1000°C'de kimyasallar veya gazların kullanımıyla aktivasyon yapılmasıyla olur (Juma 2006). İşlemler sonrası oluşan aktif karbonun kullanım yerleri ise uçucu inorganik ve organiklerin uzaklaştırılmasını sağlamak, zehirleyici bileşiklerin uzaklaştırılması, içme suyu arıtımı tesislerinde kullanılan klorun giderilmesini sağlamada, pillerin üretilmesi gibi alanlardır (Zabaniotou *et al.* 2003).



Şekil 2.5. ÖTL geri dönüşüm şeması (Yakaboylu 2010)

Piroliz işleminden sonra hem suyun içinde çözünebilen molekül ağırlıkları az olan organik sıvı bileşikler, hem de suyun içinde çözünemeyen molekül ağırlıkları fazla olan sıvı bileşikler (biyo-yakıt) oluşur (Taşçı 2010). ÖTL'lerin içerdiği uçucu organik bölümleri pirolize maruz kaldığında oluşan ürünler sıvı ile gaz fazdadır (Laresgoiti *et al.* 2000). 500'den 700°C'ye kadar olan sıcaklık aralığında sıvı ürünün baskınlığı olurken, bu sıcaklığın üstündeki değerlerde gaz ürünün baskınlığı artar. ÖTL pirolizinden oluşan sıvılar yakıt ya da kimyasal üretimde kullanılırlar (Murugan *et al.* 2008).

Piroliz sonucu oluşan gaz ürünlerin ısıl değeri ortadır ve yakıt olarak güç santrali, ısıtma işlemi gibi amaçlarla kullanılmaktadır (Williams and Chishti 2000). ÖTL pirolizinden oluşan gazların kullanımı da benzer amaçlarıdır ve bunlar karbonmonoksit (CO), karbondioksit (CO₂), hidrojen sülfür (H₂S), metan (CH₄), etan (C₂H₄), propan (C₃H₆), propen (C₃H₆), büten (C₄H₈) ve (C₄H₆)'dir. Bu gazların yaklaşık ısıl değerleri 30-40 MJ/m³ civarındadırlar (Laresgoiti *et al.* 2000).

2.2.4. Karbon karası

Karbon karasının tarihi M.Ö. 3. yüzyıla uzanır. Hintliler ve Çinliler karbon karasını mürekkep olarak kullanmışlardır (Donnet *et al.* 1993). Hidrokarbonlar kısmi yanmaya

ya da ısı parçalanmaya maruz bırakıldıklarında oluşur. Yapı bakımından grafit benzemekte olan karbon taneleridir (Şekil 2.6). Halk ağzında “is karası” diye isimlendirilmiştir (Yakaboğlu 2010).



Şekil 2.6. Karbon karası

Karbon karası çeşitli sanayi dallarında hem hammadde hem de katkı şeklinde kullanılmaktadır. Kauçuktan üretilen maddelerde kullanıldığında türü ve miktarı ile değişen oranlara bağlı olarak dayanıklılık ve renk açısından katkı sağlar (Çetişli 2013). Karbon karası vulkanizasyonun gerçekleştiği süreçte eklendiğinde, kauçuktaki zincirlerden bazıları kırılır. Kırıldığında oluşan radikallere karbon karası bağlanır ve karbon-polimer bağı oluşur. Karbon karası vulkanizasyonun hızını artırır, kauçuktaki sertliği azaltarak şekil değiştirmesinde oluşacak kopmayı engeller (Yakaboğlu 2010).

Karbon karasının dünyada 1920'lere kadar yıllık kullanım miktarı ortalama 9000 ton iken, 1956 yılında on kat arttığı belirlenmiştir (Akyıldız 2011). Dünyada üretilen karbon karası miktarının yaklaşık %90'ı araç lastiği olarak kullanılmaktadır. Lastiğin yırtılma direncini artırır, aşınma özelliğini iyileştirir (Donnet *et al.* 1993). Karbon karası yapısal olarak sert ve yumuşak olarak sınıflandırılabilir. Sert karbon karası lastiğin sürtünme ve aşınmaya en çok maruz kalan kısmı olan sırt ve topuk bölgelerinde, yola temas eden kısımda kullanılır. Yumuşak olan türü ise yanak ve gövde adı verilen kısımlarda kullanılmaktadır (Yakaboğlu 2010).

Elektrografik özellikli fotokopi makinesinin ve yazıcılarının verimli çalışabilmesi için elektrik yükünün uygun seviyede olması gerekmektedir. Karbon karası xeografik tonerlerde boya maddesi olarak kullanılarak bu özelliğe olumlu etkide bulunmaktadır (Beheshti 2016).

Karbon karası üretimi prosesleri iki şekilde sınıflandırılabilir; yanma işleminin tamamen gerçekleşmediği yakma sistemi ve oksijensiz ısı bozunma işlemi. Karbon karasının üretimi için günümüzde en çok fırın yöntemi kullanılır. Kanal siyahı yöntemi, lamba yöntemi, termal yöntem, asetilen yöntemi olmak üzere dört farklı üretim şekli daha vardır (Kühner and Voll 1993).

Ağır aromatik yağın hammadde olarak kullanıldığı fırın yöntemi karbon karasının üretiminde en çok tercih edilen metottur. Doğal gazın ya da yağın yakılmasıyla oluşan sıcaklık hammaddeyle karşılaşınca piroliz edilir, karbon karası ve gaz elde edilir. Hammadde sistemin içinde sıcak gazın etkisiyle buharlaşır ve gazın akışında hareket eder. Sistemin sıcaklığı 1300 ile 1650°C arasındadır. Pirolizin bitiminde elde edilen ürünler karbon, hidrojen, karbonmonoksit, karbondioksit, çok az hidrokarbondur. Karbon karası formunda oluşan ürün birincil reaksiyon bölümünde oluşur ve bu ürün filtrelendikten sonra siklon ayırıcılardan geçirilip uçucu gazlarından ayrılır ve kurutularak elde edilir. Tane boyutu ise yaklaşık 18-85 nm'dir (Parkash 2010).

Kanal siyahı yöntemi; hammadde olarak doğal gazın kullanıldığı ve bu hammaddenin eksik oksijenle yakılıp, dönen demir levhaların üstünde yoğunlaştırılması ile karbon karasının üretilmesi şeklindedir. Verimin düşük olduğu bir yöntemdir. Filtrenin kullanılmaması sonucunda çevreye ciddi zararlar verebileceğinden bu üretim şekli sınırlıdır. Yaklaşık 15 ile 40 nm boyutlarında ürün elde edilir. Bu özelliğinden dolayı plastiklerde kullanıldığında renk vericiliği çok fazladır ve dayanımı arttırır. En fazla kullanıldığı alanlar boya, vernik ve mürekkep üretimidir (Akyıldız 2011).

Lamba yöntemi, en eski üretim yöntemidir. Hammadde olarak yüksek karbon içeren reçine, yağ gibi materyaller kullanılır. Kanal siyahı yönteminde olduğu gibi eksik

oksijen ile yakılması sonucunda oluşur. Bu yöntemle üretilen karbon karasının boyutları 110 ile 120 nm arasındadır. Dayanım konusunda fazla katkısı olmadığından daha çok renk vermesi için kullanılmaktadır (Parkash 2010).

Isıl yöntem yüksek sıcaklık değerlerinde gerçekleştirilen bir üretim yöntemidir. 1300-1650°C sıcaklıkta doğal gazın hidrojen ve karbona kadar ayrılmasıyla elde edilir. Endotermik reaksiyonlar gerçekleştiğinden üretimin yapıldığı fırında soğumalar olmakta ve tekrar fırının ısıtılması gerekmektedir. Maliyetli bir yöntem olduğundan fazla tercih edilmemektedir. Ürünün boyutları nispeten büyüktür (150-200 nm) (Kühner and Voll 1993).

Asetilen yönteminde, asetilenin oksijensiz kapalı sistemde ısıl parçalanması ile karbon karası üretilir. Bu yöntemde egzotermik reaksiyonlar gerçekleşir. Meydana gelen bu ısıyı suyla reaktörlere yayılması sağlanır. Reaktörlerin ısınmasından sonra içeri giren hava nedeniyle karbon karası oluşumu durmaktadır. Hammaddenin bitimine kadar sürer. Üretilen karbon karası diğer yöntemlerden elde edilenlere nispeten daha saftır. Şekilleri küresel değildir. Kullanım yerleri antistatik lastik ve plastik uygulamalardır (Kühner and Voll 1993).

Pirolizden sonra elde edilen karbon karası piyasadakilere oranla oldukça ekonomik olduğundan dolgu ya da katkı malzemeleri şeklinde kullanmak için uygun bir maddedir. Lastik üretiminde, kablolarda, konvyor bantlarda, siyah poşetlerde vb. birçok endüstri uygulamalarında kullanılır (Çetişli 2013).

3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1. Deney Programının Tanıtımı

Bu bölüm, Materyal ve Yöntem alt başlıklarından oluşmakta olup, Materyal kısmında çalışma kapsamında kullanılacak olan malzemeler ve deneylerde kullanılan aletler tanıtılmıştır. Yöntem kısmında ise kullanılan malzemenin indeks özelliklerini, donma-çözülme uygulaması ve geçirimsizlik katsayısı tayini yöntemleri açıklanmıştır.

Deneylerde kullanılan ham kil, karbon karası ve bunların farklı kompozisyonları üzerinde yapılan deneyler Atatürk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Geoteknik laboratuvarı ve Erzurum MYO İnşaat laboratuvarında yapılmıştır.

Yapılan deneylerde ASTM (American Society for Testing and Materials) ve BS (British Standard) standartları dikkate alınmıştır.

Kilin geçirimsizliğine etkisini araştırmak için %1, %3 ve %5 oranında karbon karası ilave edilmiş, farklı enerjilerle sıkıştırma yapıp, farklı donma-çözülme çevrimlerine maruz bırakılmıştır. Toplam 24 numunede düşen seviyeli permeabilite deneyi yapılmıştır.

3.2. Materyal

3.2.1. Deneyde kullanılan malzemeler

a. Kil

Deneylerde kullanılan kil Erzurum'un Oltu ilçesinden elde edilmiştir. Kil üzerinde yapılan deneylerle malzemenin çeşitli özellikleri tespit edilmiş ve elde edilen sonuçlar Araştırma Bulguları bölümünde verilmiştir (Şekil 3.1).



Şekil 3.1. Deneyleerde kullanılan kil

b. Karbon karası

Kullanılan karbon karası Erzincan'da özel üretim yapan Prokom Madencilik firmasından temin edilmiştir (Şekil 3.2). Atık lastiklerin piroliz yöntemiyle ayrıştırılmasından elde edilen bir üründür (Megep 2011).



Şekil 3.2. Deneyleerde kullanılan karbon karası

3.2.2. Deneyde kullanılan aletler

a. Donma-çözülme cihazı

Donma-çözülme cihazı -25°C ile 60°C arasında değişen sıcaklıklarda otomatik olarak çalıştırılabilen bir alettir. Numuneler 6 saat -20°C 'de donmaya maruz bırakılmış ve 6 saat 20°C 'de çözdürülmüştür. Bu işlem çevrim olarak adlandırılmıştır. Yapılan bu çalışmada numuneler 5 ve 10 adet donma-çözülme çevrimine maruz bırakıldı. Çevrim sayılarının seçimi literatür doğrultusunda yapılmıştır. İlk çevrimlerde çoğu zemin numunelerinde mukavemet kaybı meydana gelmektedir (Zaimoğlu 2010; Ghazavi and Roustae 2010). Cihaz Şekil 3.3'de gösterilmiştir.



Şekil 3.3. Donma-çözünme cihazı

b. Kompaksiyon aleti

Kompaksiyon aleti değiştirilebilen tokmak ağırlığı ve yüksekliği ile hem standart hem de modifiye kompaksiyon deneyi yapmaya uygun bir cihazdır. Kompaksiyon aleti Şekil 3.4'de gösterilmiştir.



Şekil 3.4. Deneilerde kullanılan kompaksiyon aleti

c. Kalıplar

İç çapı 102 mm ve yüksekliği 117 mm olan, standartlarda belirtilmiş kalıplar kullanılmıştır (Şekil 3.5).



Şekil 3.5. Deneilerde kullanılan kalıplar (standart, modifiye)

3.3. Yöntem

3.3.1. Karışımların indeks özelliklerini belirlemede kullanılan yöntemler

a. Özgül Ağırlık Deneyi

ASTM D 854 (2000)'de çapı 4.75 mm'den (No.4 elek) küçük olan danelerin özgül ağırlığının belirlenmesi için, en az 250 ml hacmindeki veya daha yaygın olarak kullanılan 500 ml hacmindeki yoğunluk şişesinin kullanılması önerilirken, 4.75 mm'den daha büyük boyutlu olan daneler için ASTM C 127 (2001)'de Arşimed terazisi önerilmektedir. BS 1377:Part 2:1990:8.3'de, çapı 2.00 mm'den küçük olan danelerin özgül ağırlığının belirlenmesi için, 50 ml veya 100 ml hacmindeki yoğunluk şişesinin kullanılması önerilmekte, 2.00 mm'den daha büyük boyutlu olan daneler için ise 'Gaz Kavanozu' olarak adlandırılan bir yöntem önerilmektedir. TS 1900 (1997) ise büyük ölçüde BS 1377 ile uyumluluk göstermektedir (Orhan vd 2013).

Deneyde kullanılan kilin özgül ağırlığının tespiti için ASTM D 854 (2000) standardı kullanılmıştır. Çalışma kapsamında üretilen farklı oranlarda KK içeren karışımların özgül ağırlık tespiti KK'nın su yüzeyine yükselmesi nedeniyle yapılamamıştır. Deneyin yapım aşamaları Şekil 3.6'da gösterilmiştir.



Şekil 3.6. Özgül ağırlık deneyi aşamaları

b. Hidrometre yöntemi

0.075 mm'den daha küçük boyutlu olan zeminlerin dane boyutunun belirlenmesi için uygulanan ve bir çöktürme analizi olan hidrometre deneyinin genel prensipleri Stokes yasasına dayanmaktadır. Stokes yasasında, viskoz sıvı içinde düşen danelerin hızı danenin çapına ve süspansiyon halindeki daneler ile sıvının yoğunluğuna bağlıdır. Düşüş mesafesi ve zamanı bilindiği için danenin çapı hesaplanabilmektedir. Bu deney ASTM D422 (1999) standardına uygun olarak yapılmıştır (Şekil 3.7).

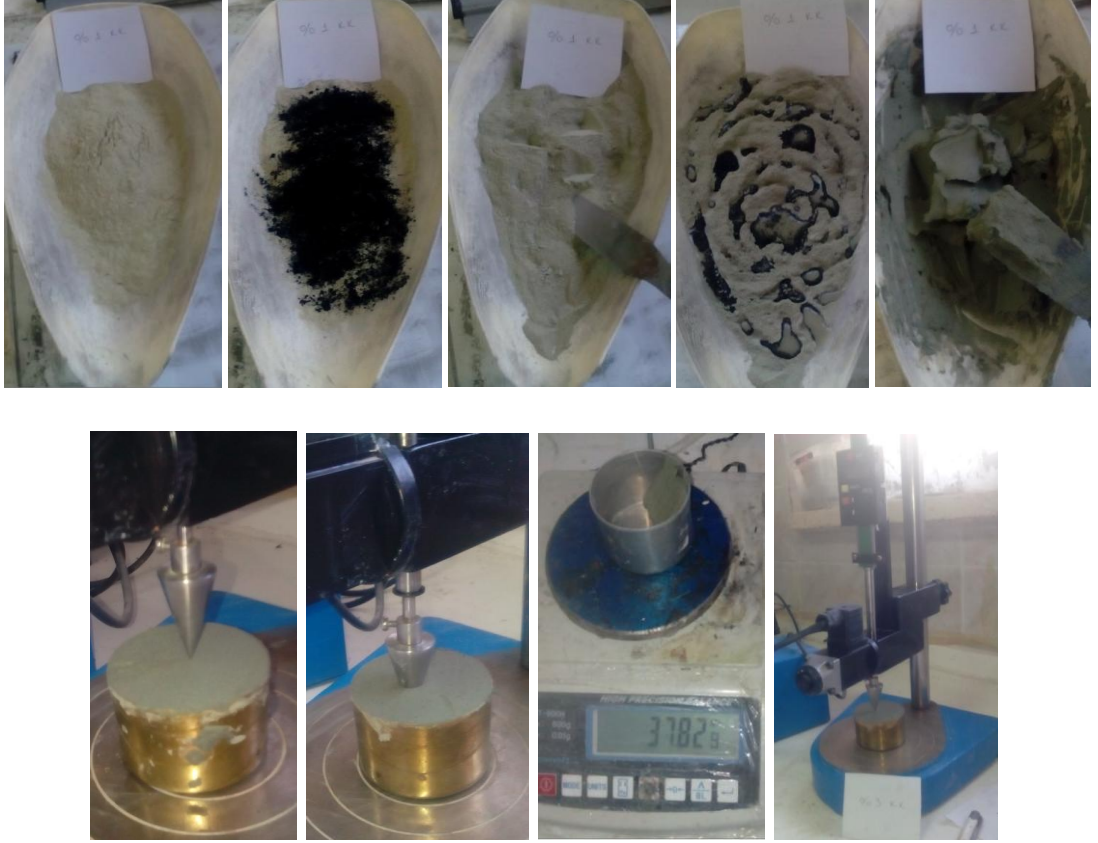


Şekil 3.7. Hidrometre deneyi

c. Likit Limit Deneyi

Likit limit (akma limiti), viskozitesi yüksek bir sıvı gibi, akıcı durumdaki zeminin plastik duruma dönüştüğü andaki su muhtevasıdır. Bir zemine ait likit limit, yaygın olarak kullanılan iki yöntemle (deneyle) belirlenebilmektedir. Bunlar Cassagrande yöntemi ve düşen koni penetrasyon yöntemi olarak adlandırılırlar. Bu tezde likit limit tayini için düşen koni penetrasyon yöntemi (BS 1377) tercih edilmiştir. Şekil 3.8’de düşen koni penetrasyon aleti ve deney aşamaları gösterilmektedir. Deneyde 400 mikronluk elekten geçen kısımdan 200 gr kil numune alınır, kuru ağırlıkça %1, %3 ve %5 KK ilave edilir, iyice karıştırılır, kuru karışımın üzerine su ilave edilir. Su ile homojen bir hamur kıvamına gelinceye kadar spatula ile iyice karıştırılır, hazırlanan numune metal deney kaba sıkıca ve içinde hava kabarcığı kalmayacak şekilde yerleştirildikten sonra, yüzeyi cetvelle tesviye edilir ve penetrometre aletinin tabanına konur. Koni, zeminin yüzeyini belli belirsiz çizecek bir düzeye kadar indirilir ve miknometre sıfırlanır. Daha sonra, koniyi serbest bırakan düğmeye 5 ± 1 saniye süreyle basılarak koninin zemin içerisine batmasına izin verilir. Süre sonunda son mikrometre

okuması (koninin batma miktarı, mm) yapılır. Koni kaldırılır, su içeriğini belirlemek üzere koni deliği civarından numune alınır ve su içeriği bulunur.



Şekil 3.8. Düşen koni penetrasyon deneyi yapım aşamaları

d. Plastik limit deneyi

Plastik limit, plastik ve yarı katı durumları birbirinden ayıran sınır su muhtevası olup zeminin plastik özelliğini koruduğu en küçük su muhtevası o zeminin plastik limitini verir. İnce daneli bir zemine, kırılmalara yol açmadan yoğrularak istenilen şekil verilebiliyorsa o zeminin plastik kıvamda olduğu kabul edilir.

Cam veya plastik düz bir yüzey üzerinde el ayası veya parmaklarla düzgün bir şekilde yuvarlanan zemin numunesi, 3mm çapında ve yaklaşık 10 mm uzunluğundaki bir silindir şeklini aldığı anda, su muhtevasından dolayı kırılıp çatlama meydana geldiği

andaki su içeriği, zeminin plastik limiti olarak adlandırılır. Plastik limit belirlemede çeşitli standartlar vardır. Bunlar; ASTM D -4318 (2000), BS 1377:Part 2:1990:5.3 ve TS 1900 (1997) (Orhan vd 2013). Bu tezde ASTM D-4318 (2000) standardı tercih edilmiştir. Şekil 3.9’da deney sonu elde edilen numune şekli gösterilmiştir.



Şekil 3.9. Plastik limit deneyi

3.3.2. Numunelerin sıkıştırılmasında kullanılan yöntem

Kompaksiyon deneyleri

Kompaksiyon, zeminlerin çeşitli yöntemler aracılığıyla tabaklar halinde serilerek, zeminin boşluk oranının azaltılması ve zemin danelerinin birbirine yaklaştırılmasıyla zeminin önceki haline göre daha sıkı hal almasını sağlayan mekanik işlemlere verilen isimdir (Önalp 2007). Kompaksiyon, zemin danelerinin daha sıkı yerleşmesini sağlar dolayısıyla zeminin boşluk oranını azaltılmış olur. Zemini oluşturan daneler ve daneler arasındaki su pratik olarak sıkışmazdır. Sıkıştırma, zemin danelerinin havayı sıkıştırması veya havanın dışarı çıkması sonucu oluşur ve boşluklar azalmış olur (Uzuner 2007). Kompaksiyonun amacı maksimum kuru birim hacim ağırlığı (bha) veren su içeriği değerin belirlenmesidir (Aytekin 2004). Proctor deneyi olarak da bilinen deney yöntemi 1933’te R.R.Proctor tarafından geliştirilmiştir (Bowles 1986). Proctor

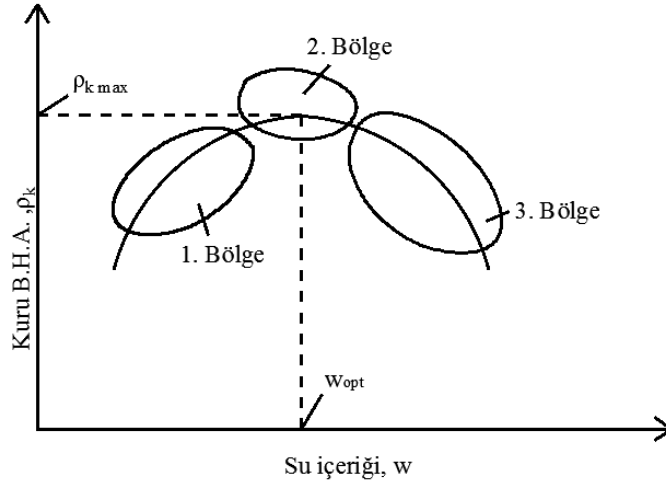
(1933), sıkıştırılmış yaş zeminde su içeriği ile o zemine ait kuru bha arasında Şekil 3.10'da gösterilen ilişkiyi belirlemiştir (Uzuner 2007).

Bir zemin belli bir sıkıştırma enerjisi ile farklı su muhtevalarında sıkıştırılması durumunda artan su muhtevası ile birlikte kuru yoğunluk önce artmakta olup, maksimum değere ulaştıktan sonra ise azalmaktadır. Kompaksiyon eğrisinin artan kısmı 1. Bölge, maksimum değerdeki kısmı 2. Bölge, azalan kısmı da 3. Bölge olarak adlandırılırsa, kuru yoğunluk–su içeriği arasındaki ilişkisi aşağıdaki biçimde özetlenebilir.

1. Bölge: Zeminde yeterli miktarda su bulunmadığından dolayı, daneler arası sürtünme kuvvetinden dolayı zemin daneleri daha az boşluklu biçimde yerleşmek için hareket edemezler (Uzuner 2007).

2. Bölge: Zemine daha fazla su ilave edilmesiyle zemin danelerini çevreleyen su filminin kalınlığı artar. Böylece zemin daneleri birbirleri üzerinden kolaylıkla kayma hareketi yaparak hareket edebilirler (Aytekin 2004). Bu sebeple bu bölgede (2. Bölge) sıkıştırma en yüksek değerde olup, kuru yoğunluk değeri en yüksek seviyeye ulaşmaktadır. Kuru yoğunluğun (sıkıştırmanın) en yüksek olduğu (maksimum kuru yoğunluk), ρ_{max} durumdaki su içeriğine optimum su içeriği (w_{opt}) denir (Uzuner 2007).

3. Bölge: Zemine daha fazla su eklenmesine devam edilmesi sonucunda zemin içerisindeki boşluklar su ile dolmaya başlar ve su sıkıştırılmaz olduğundan bir noktadan sonra yapılan su eklemeleri zeminin yoğunluğunu arttırmayacağı gibi yoğunluğun azalmasına sebep olacaktır (Uzuner 2007).



Şekil 3.10. Sıkıştırılmış zeminde $w-\gamma_k$ ilişkisi (Uzuner 2007)

Kompaksiyon deneyi, standart kompaksiyon ve modifiye kompaksiyon deneyi olarak iki farklı şekilde yapılmaktadır. Modifiye kompaksiyon deneyinin standart kompaksiyon deneyinden farkı, deney tokmağının ağırlığının ve düşüm yüksekliğinin artırılması, tabaka sayısının çoğaltılması esasına dayanmaktadır (Önalp 2002).

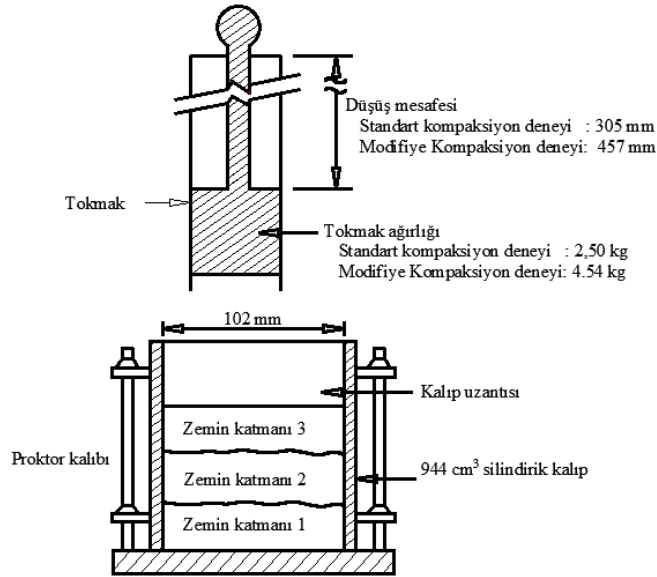
a. Standart kompaksiyon deneyi

Standart Kompaksiyon Deneyinde ASTM D 698 (1999) standardı kullanılmıştır. Bu standartta kullanılan metal silindir kalıp ölçüleri; iç çapı 102 mm, yüksekliği 117 mm'dir. Bu kalıbın üzerine, geçici olarak bir yaka (ek) eklenir (Şekil 3.11). Deneyde kurutulmuş, tanelenmiş birkaç kg'lık zemin kullanılmaktadır. Deneyde kullanılan numunelerde katkısız kil ve kil oranının kütlece %1, %3 ve %5 karbon karası ile karıştırılması sonucu oluşan karışımlar kullanılmıştır.

Deney aşamaları aşağıdaki şekildedir;

- 1) Sıkıştırılmak istenen zemin numunesi alınır ve standartta tanımlandığı şekilde deneye hazırlanır

- 2) Hazırlanmış zeminden bir kısım numune standart $9,44 \times 10^{-4} \text{ m}^3$ 'lük silindir çelik kalıba, kalıbın yaklaşık %40'ı doluncaya kadar yerleştirilir (Şekil 3.12).
- 3) Kalıp içerisindeki zemin, 305 mm yükseklikten düşen, özel 2,5 kg'lık tokmak ile 25 vuruş uygulayarak sıkıştırılır.
- 4) Hazırlanmış ikinci tabaka zemin, kalıp içine kabın yaklaşık %75'i doluncaya kadar yerleştirilir ve standart tokmak ile 25 vuruş uygulanarak sıkıştırılır.
- 5) Hazırlanmış üçüncü ve son tabaka zemin numunesi kalıp içerisine yerleştirilir ve aynı şekilde 25 vuruş ile sıkıştırılır. Böylece toplam 75 tokmak darbesi uygulanmış olur.



Şekil 3.11. Standart kompaksiyon deneyi kalıbı ve tokmağı (Uzuner 2007)

- 6) Kalıp içine sıkıştırılmış zemin numunesinin toplam hacmi tam olarak $9,44 \times 10^{-4} \text{ m}^3$ olacak şekilde tıraşlandıktan sonra kalıp ile birlikte tartılır ve kaydedilir.
- 7) Sıkıştırılmış numuneyi temsil eden bir parça üzerinde su muhtevası belirlenir. Daha sonra kuru yoğunluk hesabı yapılır.
- 8) Yukarıdaki adımlar farklı su muhtevalarındaki zeminler ile üç veya dört kez tekrarlanır (Coduto 2006).

Yukarıdaki adımların tekrar edilmesiyle elde edilen deney sonuçları, γ_k -w eksen takımına işaretlenerek, kompaksiyon eğrisi çizilir. Bu eğrinin tepe noktasındaki değerler ile, w_{opt} ve γ_{max} değerleri elde edilir (Uzuner 2007).



Şekil 3.12. Standart kompaksiyon deneyi

b. Modifiye kompaksiyon deneyi

II. Dünya Savaşı sırasında ağır nakliye uçaklarının iniş yapacağı hava alanlarında daha iyi sıkıştırma yapılması gerekliliği doğmuş olduğundan modifiye kompaksiyon deneyi geliştirilmiştir (Bowles, 1986). Her alanda olduğu gibi inşaat araç gereçlerinde ve yapım tekniklerinde de gelişmeler elde edilmiştir. Bu gelişmeler yüksek sıkıştırma enerjilerini ulaşılabilir kılmış, böylece laboratuvar deneylerindeki sıkıştırma enerjisinin arttırılması kaçınılmaz olmuştur (Yetimoğlu vd 2001).

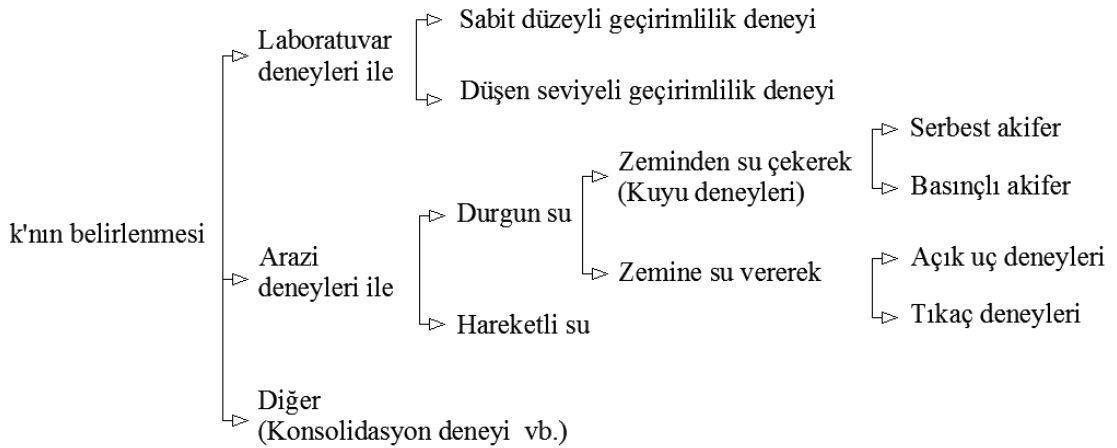
Modifiye kompaksiyon deneyi, standart kompaksiyon deneyi ile aynı adımlardan oluşur. Değişiklik olan kısımlar; tabaka sayısı, tokmak ağırlığı ve tokmak düşüş yüksekliğidir. Kullanılan kalıp ölçüleri her iki deneyde de aynıdır. İki deney arasındaki temel farklar Çizelge 3.1’de toplu olarak verilmiştir.

Çizelge 3.1. Standart kompaksiyon ve modifiye kompaksiyon deneyi arasındaki farklar (Coduto 2006)

	Standart Kompaksiyon Deneyi	Modifiye Kompaksiyon Deneyi
Standartlar	ASTM D 698, AASHTO T-99	ASTM D 1557 ve AASHTO T-180
Tokmak Kütlesi (kg)	2,50	4,54
Tokmak Düşü Yüksekliği (mm)	305	457
Zemin Katman Sayısı	3	5
Katman Başına Düşen Tokmak Düşüş Sayısı	25	25
Her Numuneye Uygulanan Enerji (kN-N/m ³)	600	2700

3.3.3. Geçirimsizlik katsayısı

Geçirimsizlik deneyleri arazi ve laboratuvar deneyleri olmak üzere iki şekilde yapılabilir (Uzuner 2007).



Şekil 3.13. k, geçirimsizlik katsayısı belirlenme yöntemleri (Kamiloğlu 2011)

Düşen seviyeli permeabilite deneyi

Geçirimsizliğin düşük olduğu (kil gibi), çok düşük geçirimsizlik katsayısı değerlerinin elde edildiği zeminlerde düşen seviyeli permeabilite deneyini kullanmak daha uygundur. Sabit seviyeli deneyde su takviyesi yapılırken, bu deneyde takviye yapılmaz. Hidrolik eğim sabit olmadığından düşen seviyeli deney sonucunun analizi daha karmaşıktır. Akış oranının sabit olmamasından ötürü, k için yeni bir formül üretmek gerekir. Deneyin başlamasından itibaren Δh_0 gibi bir yük ve t kadar zaman sonra da Δh_1 gibi bir yük kaybı olduğu göz önüne alınırsa aşağıdaki değerler elde edilir (Coduto 2004);

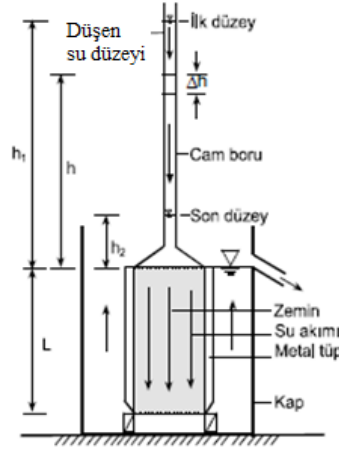
$$Q=kiA = k \left(\frac{\Delta h}{L} \right) A = -a \frac{d(\Delta h)}{dt} \quad (3.1)$$

$$\frac{kA}{L} \int_0^t dt = -a \int_{\Delta h_0}^{\Delta h_1} \frac{d(\Delta h)}{dh} \quad (3.2)$$

$$\frac{kAt}{L} = -a \ln \left(\frac{\Delta h_1}{\Delta h_0} \right) \quad (3.3)$$

$$k = \frac{aL}{At} \ln \left(\frac{\Delta h_1}{\Delta h_0} \right) \quad (3.4)$$

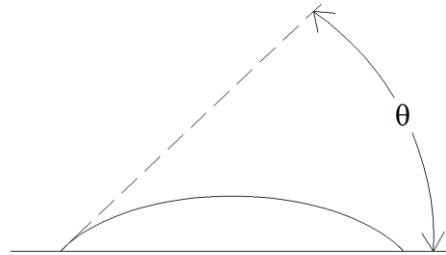
Deneyin, değişik iç çaplı borularla, değişik başlangıç su seviyeleriyle, farklı deney süreleriyle tekrarlanması ve k için bu deney sonuçlarının ortalama değer hesaplanması önerilir (Uzuner 2007). Düşen seviyeli permabilite deney şeması Şekil 3.14'de gösterilmiştir. Bu çalışmada kullanılan malzeme kil olduğundan düşen seviyeli permeabilite deneyi yapılması tercih edilmiştir.



Şekil 3.14. Düşen seviyeli permabilite deney şeması (Uzuner 2007)

3.3.4. Temas açısı ölçümü

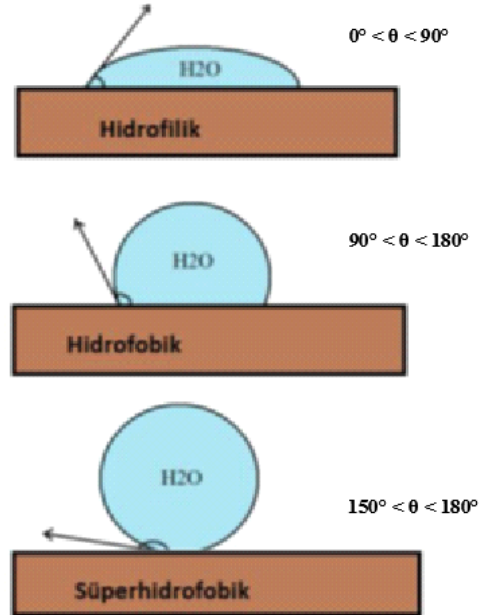
Katı yüzey ve temas halinde bulunduğu sıvı bir açı oluşturmaktadır (Şekil 3.15). Bu açıya temas açısı denir. Temas açısının büyüklüğü, sıvı moleküllerinin kendi arasındaki çekim kuvvetleri (kohezyon kuvvetleri) ile sıvı katı arasındaki çekim kuvvetlerinin (adezyon kuvvetleri) göreceli büyüklüğüne bağlıdır. Kohezyon kuvvetlerinin büyüklüğü, adezyon kuvvetlerinin büyüklüğünden ne kadar fazla ise, sıvı katı arasındaki temas açısı da o denli büyük olur. Diğer bir ifade ile büyük bir temas açısı sıvı-katı çekim kuvvetlerinin az olduğunun, küçük bir temas açısı ise bu kuvvetlerin büyük olduğunun bir göstergesidir (Akbulut 2008). Temas açısının büyüklüğüne etki eden diğer etkenler ise katı yüzeyinin düzlüğü ve temizliği, sıvının saflık derecesidir (Gürses ve Bayrakçeken 1996).



Şekil 3.15. Temsili katı yüzeyindeki sıvı damlasının temas açısı

Katı yüzey ile sıvı arasındaki açı $0^\circ < \theta < 90^\circ$ ise sıvı yüzey üzerinde yayılma eğilimindedir. Bu yüzeyler su seven (hidrofilik) yüzeyler olarak tanımlanır. Açı $90^\circ < \theta < 180^\circ$ ise bu yüzeyler genel olarak su itici (hidrofobik) yüzeyler olarak tanımlanır. θ , $150^\circ - 180^\circ$ arasında değiştiğinde bu yüzeylere süper su itici (süperhidrofobik) yüzeyler denir (Çabuk 2012).

Sıvı ile katı yüzey arasında oluşan şekillerin nasıl isimlendirildiği Şekil 3.16'da gösterilmektedir.



Şekil 3.16. Sırasıyla hidrofilik, hidrofobik ve süper hidrofobik yüzeyler (Çabuk 2012)

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

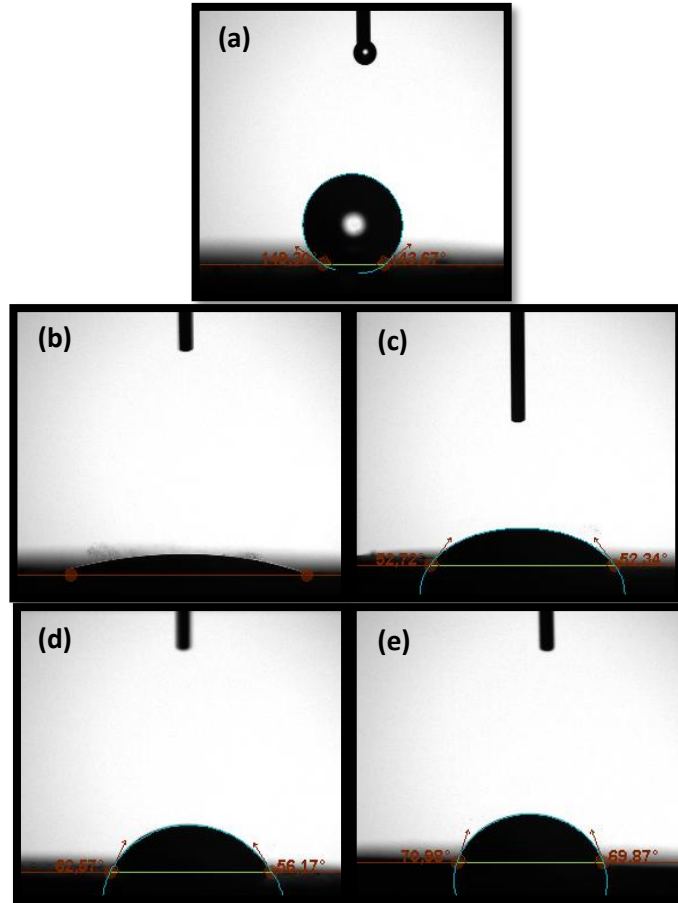
Bu bölümde ömrünü tamamlamış lastiklerin pirolizi sonucu elde edilen karbon karasının (KK) katkısız, %1, %3 ve %5 oranlarında kil ile karıştırılması sonucu elde edilen numuneler üzerinde yapılan deney sonuçları verilmiştir. Çalışma sonucunda elde edilen bulgular aşağıda dört başlıkta sunulmuştur. Birinci başlıkta Atatürk Üniversitesi DAYTAM'da karbon karası ve karışımlar üzerinde yapılan görüntü (SEM ve temas açısı) analizleri verilmiştir. İkinci ve üçüncü başlıklarda KK katkısının kil zeminin sırasıyla indeks özelliklerine ve kompaksiyon parametrelerine etkisi verilmiştir. Dördüncü ise başlıkta KK'nın ince daneli zeminlerde donma-çözülme çevrimi öncesi ve sonrası geçirimsizlik katsayısının değişimi belirlenmiştir.

4.1. Temas Açısı ve SEM Görüntüleri ile İlgili Bulgular

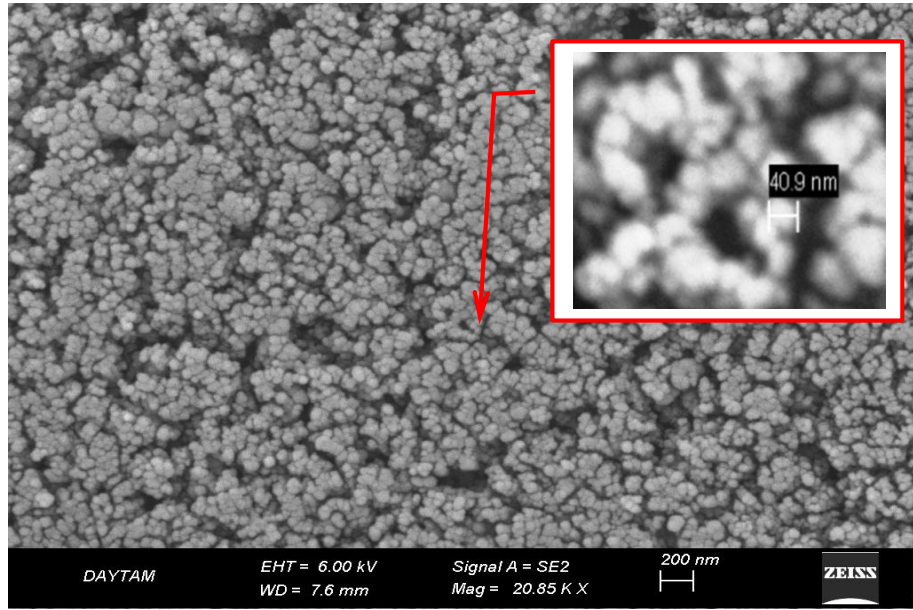
Karbon karası ve katkılı kil numuneler üzerinde yapılan temas açısı analizinden elde edilen sonuçlar Çizelge 4.1'de özetlenmiş olup analizden elde edilen görüntüler ise Şekil 4.1'de verilmiştir. Saf karbon karası üzerinde yapılan analizden, temas açısı değerlerinin ortalama olarak 146° olduğu tespit edilmiştir (Şekil 4.1.a). Bu değer, Bölüm 3.3.5 ve Şekil 3.18'de açıklandığı gibi, karbon karasının süper su itici (süper hidrofobik) bir malzeme olduğunu göstermektedir. Şekil 4.1.b incelendiğinde katkısız kil numunenin temas açısı değeri analizlerden belirlenememiş oluşu ve temas açısını tespit etmek için damlatılan suyu hemen emdiği görülecektir. Bu durum, kil numunenin suyu seven (hidrofilik) bir malzeme olduğunu göstermektedir. Diğer taraftan KK oranı arttıkça temas açısı değerinin attığı belirlenmiştir (Çizelge 4.1). Sonuç olarak hidrofilik bir malzeme olan kile katılan karbon karası, kil zemini hidrofobik davranış gösteren bir malzemeye dönüştürdüğü tespit edilmiştir.

Çizelge 4.1. Temas açısı değerleri

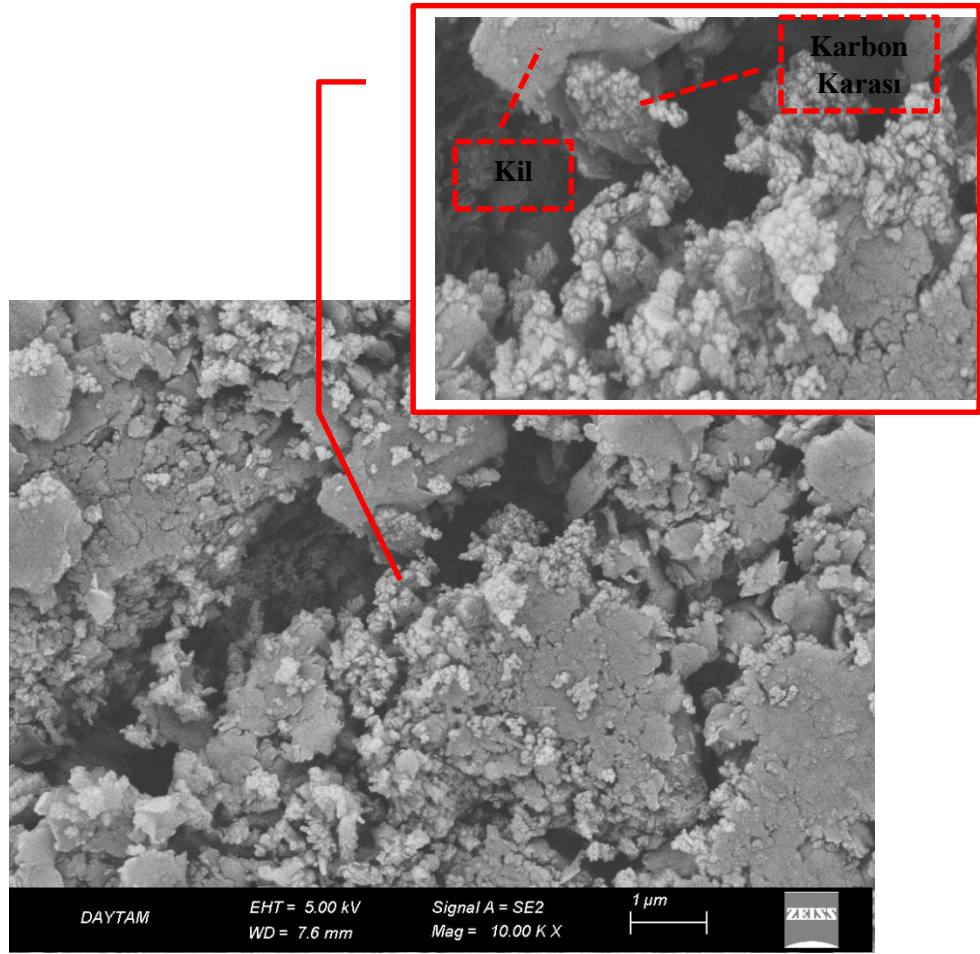
KK (%)	Temas Açısı (Sol) (°)	Temas Açısı (Sağ) (°)	Temas Açısı (Ortalama) (°)
0	-	-	-
1	52,72	52,34	52,53
3	62,57	56,17	59,37
5	70,98	69,87	70,43
100	149,30	143,67	146,49

**Şekil 4.1.** Temas açısı görüntüleri (a) karbon karası, (b) katkısız kil, (c) %1 KK katkıli numune, (d) %3 KK katkıli numune, (e) %5 KK katkıli numune

Saf karbon karası üzerinde yapılan SEM analizinden elde edilen görüntü Şekil 4.2’de verilmiştir. Şekil 4.2 incelendiğinde, karbon karası (KK) danelerinin küresel şekilli olduğu ve dane çaplarının genellikle eşit olduğu görülmektedir. SEM görüntülerinde yapılan çap ölçümlerinde, KK’nın dane çapının ortalama olarak 40 nano-metre olduğu belirlenmiştir (Şekil 4.2). %3 KK katkılı kil numunenin SEM görüntüsü Şekil 4.3’te verilmiştir. KK’nın kil plaklarının arasını kısmen doldurduğu ve belirli bölgelerde yığıldıkları tespit edilmiştir (Şekil 4.3). Bu duruma, KK’nın kil zemine karıştırılması esnasında herhangi bir kimyasalın kullanılmamasına bağlı olarak kimyasal tepkime olmaması ve KK’nın kil plaklarına yalnızca yüzeysel olarak tutunmasının neden olduğu düşünülmektedir.



Şekil 4.2. Karbon karası SEM görüntüsü



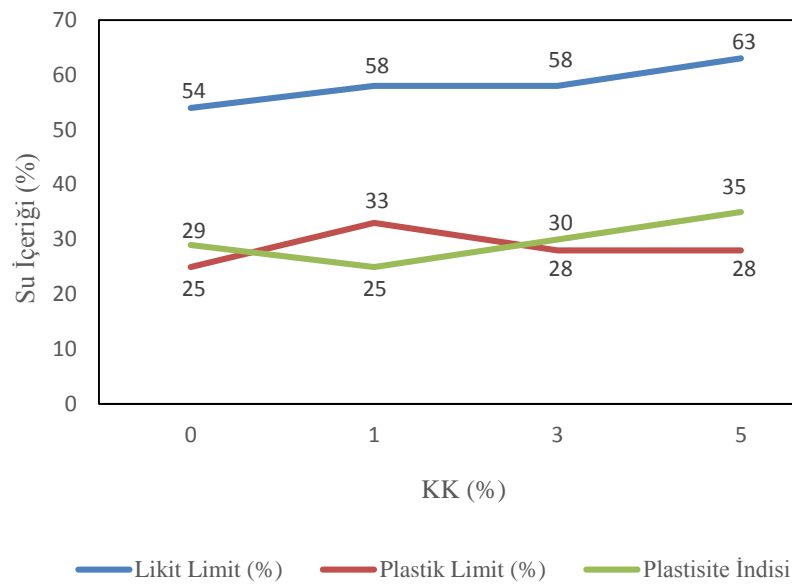
Şekil 4.3. %3 KK katkılı numune SEM görüntüsü

4.2. İndeks Özellikleri ile İlgili Bulgular

Kil ve %1, %3 ve %5'lik KK ilave edilen numuneler üzerinde Bölüm 3'te açıklanan deneyler uygulanmıştır. Yapılan likit limit ve plastik limit deneyleri ile değişen değerler Çizelge 4.2'de toplu olarak sunulmuş ve Şekil 4.4'de grafik olarak verilmiştir.

Çizelge 4.2. KK içeriğine göre kıvam değerleri

Özellikler	%0 KK	%1 KK	%3 KK	%5 KK
Likit Limit (%)	54	58	58	63
Plastik Limit (%)	25	33	28	28
Plastisite İndisi (%)	29	25	30	35

**Şekil 4.4.** KK içeriğine göre kıvam değerlerindeki değişim

Şekil 4.4'den de görüleceği üzere KK oranı arttıkça likit limit (LL) değeri artmaktadır. Katkısız kilin LL değeri %54 iken %5 KK katkılı karışımın LL değeri %63 olarak belirlenmiştir. Karbon karası oranının artmasıyla LL değerindeki artışa sebep olarak, anyon olan karbon atomunun kilin elektriksel çekim kuvvetini etkilemiş olabileceği ve hidrofob bir malzeme olan karbon karasının su moleküllerini numune içindeki boşluklarda kalmaya zorlamış olabileceği düşünülmektedir. Şekil 4.4 incelendiğinde, plastik limit (PL) değeri KK oranının artmasıyla artarak %1 KK oranında maksimum değerine ulaştığı ve bu noktadan sonra düşme eğilimine girdiği görülecektir. Diğer taraftan, plastisite indisi (Ip) KK oranı arttıkça azalmış daha sonra artmıştır. Katkısız

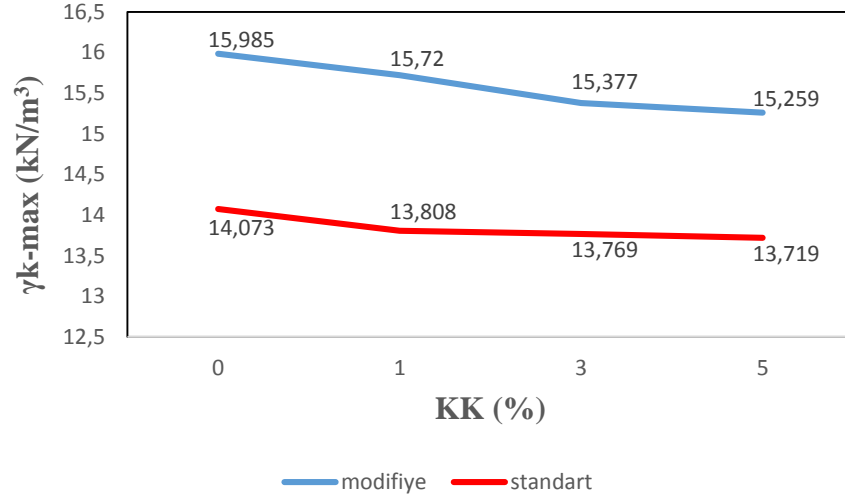
kilin Ip deęeri %29'dan azalarak %1 KK'da %25 minimum deęere dūřmūřtur. Bu noktadan sonra kademeli olarak artarak %5 KK'da %35 deęerine ulařmıřtır.

4.3. Kompaksiyon Deneyleri ile İlgili Bulgular

Belirlenen oranlarda KK içeren numunelerde Bölüm 3'te açıklanan kompaksiyon deneyleri yapılmıştır. Numunelere hem standart hem de modifiye kompaksiyon deneyleri uygulanmıştır. Çizelge 4.3'de deney sonucunda elde edilen maksimum kuru birim hacim ağırlık ($\gamma_{k \text{ max}}$) ve optimum su (w_{opt}) içeriği değerleri verilmiştir. şekil 4.5 ve şekil 4.6'da sonuçlar grafik olarak sunulmuştur.

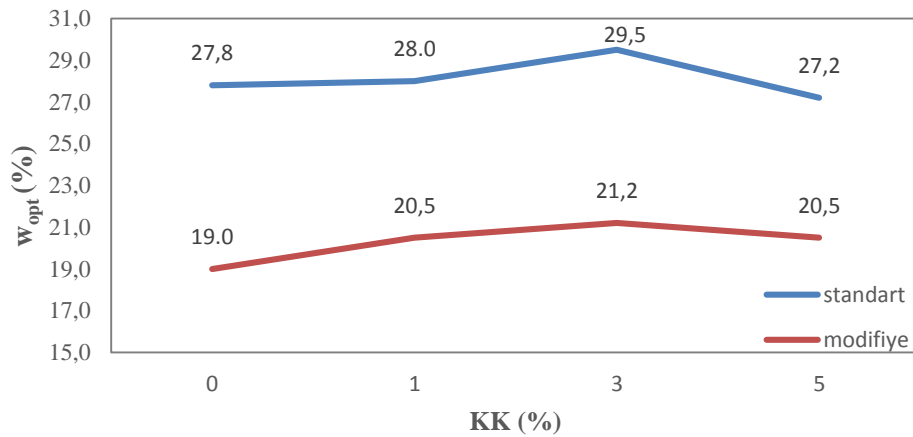
Çizelge 4.3. Kompaksiyon deney sonuçları

KK (%)	$\gamma_{k \text{ max}}$ (kN/m ³)		w_{opt} (%)	
	Standart	Modifiye	Standart	Modifiye
0	14,073	15,985	27,8	19,0
1	13,808	15,720	28,0	20,5
3	13,769	15,377	29,5	21,2
5	13,719	15,259	27,2	20,5



Şekil 4.5. KK oranına göre maksimum kuru birim hacim ağırlık değişimi

Şekil 4.5.'de görüleceği üzere KK oranının artması, hem standart hem de modifiye kompaksiyon maksimum kuru birim hacim ağırlık değerinin azalmasına neden olmuştur. Katkısız kil numuneye ait modifiye kompaksiyon γ_{k-max} değeri 15,985 kN/m³ olarak belirlenmiş olup KK oranı arttıkça sırasıyla %1 KK'da 15,720 kN/m³, %3 KK'da 15,377 kN/m³ ve %5 KK'da 15,259 kN/m³ değerine düşmüştür. Benzer şekilde standart kompaksiyon enerjisi altında sıkıştırılan numunelerde de γ_{k-max} 14,073 kN/m³ (katkısız) değerinden kademeli olarak azalarak 13,719 kN/m³ değerine düşmüştür. Bu duruma, kil zeminden daha hafif bir malzeme olan karbon karasının neden olduğu düşünülmektedir.



Şekil 4.6. KK oranına göre optimum su içeriği değişimi

Şekil 4.6'dan de görüleceği gibi her iki kompaksiyon enerjisinde de optimum su içeriği değerleri KK oranının artmasıyla %3 KK oranına kadar artmış ve bu orandan sonra (%5 KK oranında) bir miktar düşmüştür. Optimum su içeriğinin her iki deney türü için de maksimum olduğu değer %3 KK oranı olarak tespit edilmiştir. Katkısız kil numunenin ile %3 KK katkılı numunenin w_{opt} değerleri karşılaştırıldığında, standart kompaksiyonda w_{opt} değerleri sırasıyla %19,0 ve %21,2 olup su içeriğindeki artış %2,2 olarak tespit edilmiştir. Modifiye kompaksiyon deneyinde ise su içeriğindeki değişim %1,7 olarak belirlenmiştir. Elde edilen w_{opt} değerleri geoteknik mühendisliği açısından irdelendiğinde, karbon karasının kil zeminin w_{opt} 'a olan etkisinin ihmal edilebilir seviyede olduğu görülmektedir (Şekil 4.6.).

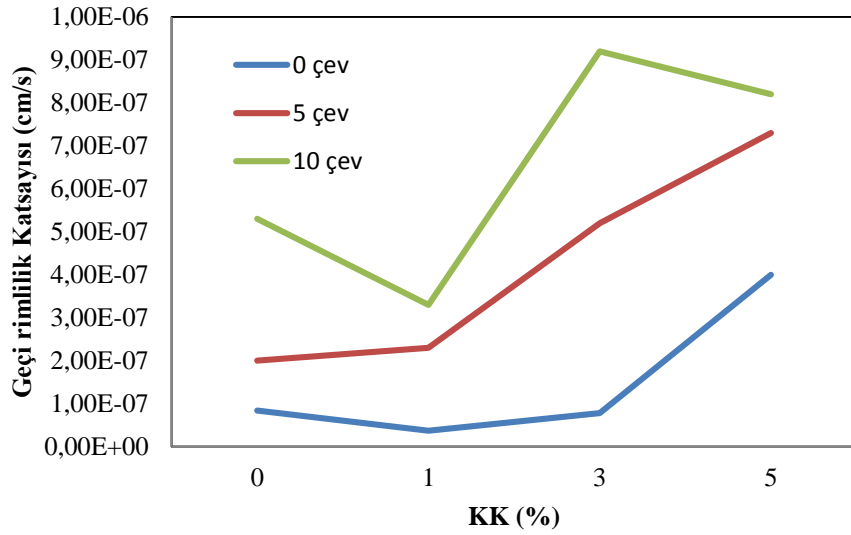
Modifiye kompaksiyon deney sonuçlarına göre katkısız, %1, %3 ve %5 KK oranlarına sahip numunelerin w_{opt} (%) değerleri sırasıyla 19,0; 20,5; 21,2 ve 20,5'dir ve γ_{k-max} değerleri ise sırasıyla 15,985; 15,720; 15,377 ve 15,259 kN/m³ olarak tespit edilmiştir.

4.4. Permeabilite Deneyleri ile İlgili Bulgular

Belirlenen KK oranlarında hazırlanan numuneler kompaksiyon deneylerinden elde edilen w_{opt} su içeriklerinde ıslatılmış ve permeabilite kalıplarında hem standart hem de modifiye kompaksiyon enerjileri altında sıkıştırılmıştır. Hazırlanan her bir numune Bölüm 3'te açıklandığı üzere düşen seviyeli permeabilite deneyine tabi tutulmuşlardır. Donma-çözülme çevrimlerinin katkısız ve KK katkılı numunelerin geçirimsizliğine etkisini inceleyebilmek için 5 ve 10 çevrimlik donma-çözölmeye maruz bırakılmışlardır. Çevrim sonrasında numuneler düşen seviyeli permabilite deneyine tabii tutulmuşlardır. Elde edilen deney sonuçları Çizelge 4.4'te verilmiştir. Şekil 4.7'de standart kompaksiyon enerjisi ile sıkıştırılan numunelerin, Şekil 4.8'de ise modifiye kompaksiyon enerjisi ile sıkıştırılan numunelerin deney sonuçları grafik olarak gösterilmiştir.

Çizelge 4.4. Permeabilite deney sonuçlar

KK (%)	Geçirimsizlik Katsayısı (cm/s)					
	Standart Kompaksiyon			Modifiye Kompaksiyon		
	0 Çevrim	5 Çevrim	10 Çevrim	0 Çevrim	5 Çevrim	10 Çevrim
0	$8,4 \times 10^{-8}$	$2,0 \times 10^{-7}$	$5,3 \times 10^{-7}$	$1,4 \times 10^{-8}$	$3,2 \times 10^{-7}$	$7,8 \times 10^{-7}$
1	$3,7 \times 10^{-8}$	$2,3 \times 10^{-7}$	$3,3 \times 10^{-7}$	$1,7 \times 10^{-8}$	$2,4 \times 10^{-7}$	$3,5 \times 10^{-7}$
3	$7,8 \times 10^{-8}$	$5,2 \times 10^{-7}$	$9,2 \times 10^{-7}$	$1,5 \times 10^{-8}$	$2,3 \times 10^{-7}$	$6,9 \times 10^{-7}$
5	$4,0 \times 10^{-7}$	$7,3 \times 10^{-7}$	$8,2 \times 10^{-7}$	$9,8 \times 10^{-8}$	$2,8 \times 10^{-7}$	$2,8 \times 10^{-7}$

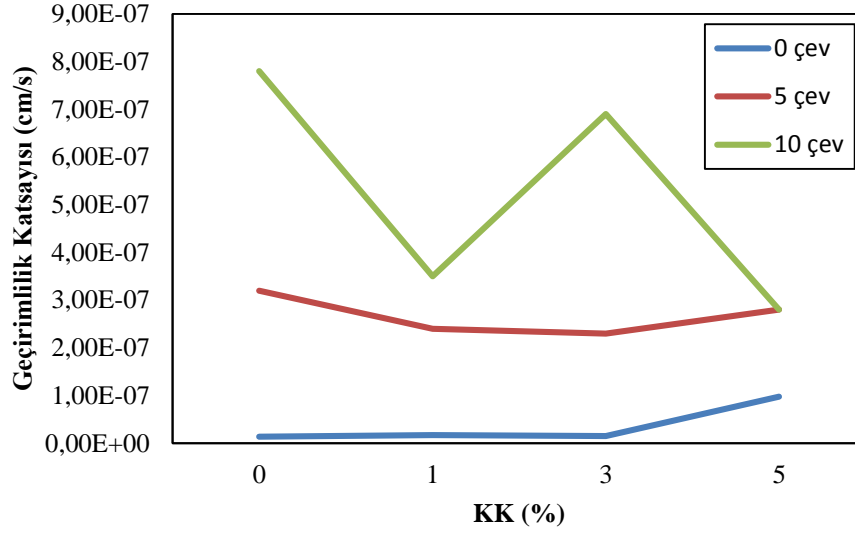


Şekil 4.7. KK oranı – Geçirimsizlik katsayısı ilişkisi (Standart kompaksiyon)

Şekil 4.7’de donma-çözülme çevrimine maruz bırakılmayan (0 çevrim) numunelerin geçirimsizlik katsayıları incelendiğinde, katkısız kilin geçirimsizlik katsayısı $8,4 \times 10^{-8}$ cm/s olduğu %1 KK, %3 KK ve %5 KK katkılı numunelerin geçirimsizlik katsayısı değerleri sırasıyla $3,7 \times 10^{-8}$, $7,8 \times 10^{-8}$ ve $4,0 \times 10^{-7}$ cm/s olduğu görülmektedir. %1 KK ve %3 KK katkılı numunelerin katkısız numuneye göre geçirimsizlik katsayısının sırasıyla %56 ve %7 azaldığı tespit edilmiştir. Ancak, %5 KK katkılı numunede ise katkısızına göre geçirimsizlik katsayısının yaklaşık 10 kat arttığı belirlenmiştir.

Donma-çözülme çevrimine maruz bırakılan (5 ve 10 çevrim) tüm numunelerin geçirimsizlik katsayısı değerlerinin 0-çevrime göre arttığı tespit edilmiştir. Benzer şekilde bir çok araştırmacı donma-çözülme maruz bırakılan killi zeminlerin geçirimsizlik katsayısının arttığını tespit etmişlerdir (Chamberlain and Gow 1979; Othman and Benson 1993; Benson and Othman 1993; Benson *et al.* 1995; Konrad and Samson 2000; Sterpi 2015). Bu duruma, donma prosesinde numunelerin boşluklarında bulunan suyun donması ve oluşan buz kristallerinin hacimce büyümesine bağlı olarak numunelerin boşluk yapısının değişmesi ve boşluk hacminin artması olarak düşünülmektedir. Boşluk hacmi artan numunede ise geçirimsizliğin artması kaçınılmaz bir sonuç olarak karşımıza çıkmaktadır. 5 çevrime maruz bırakılan katkısız kil numunenin geçirimsizlik katsayısı $2,0 \times 10^{-7}$ cm/s olarak belirlenmişken ve %1 KK katkılı numunede ise artarak $2,3 \times 10^{-7}$ cm/s olarak hesaplanmıştır. Diğer taraftan, %3 ve %5 KK katkılı numunelerdeki artış çok daha fazla olup geçirimsizlik katsayısı sırasıyla $5,2 \times 10^{-7}$ ve $7,3 \times 10^{-7}$ cm/s olarak tespit edilmiştir. 10 çevrime maruz bırakılan numunelerde ise genel bir davranış söz konusu olmayıp geçirimsizlik katsayısı %1 KK'da katkısız numuneye göre yaklaşık %38 azalarak $3,3 \times 10^{-7}$ cm/s değerine düşmüştür. Diğer taraftan geçirimsizlik katsayısı %3 KK'da artarak $9,2 \times 10^{-7}$ cm/s değerine ve %5 KK'da ise $8,2 \times 10^{-7}$ cm/s değerine ulaşmıştır.

Genel olarak standart kompaksiyon enerjisi altında sıkıştırılan numunelerin arasında tüm donma-çözülme çevrim sayılarında en düşük geçirimsizlik katsayısı değerini %1 KK katkılı numunelerin verdiği tespit edilmiştir.



Şekil 4.8. KK oranı – Geçirimsizlik katsayısı ilişkisi (Modifiye kompaksiyon)

Donma-çözülme çevrimine maruz bırakılmayan katkısız kilin geçirimsizlik katsayısı değeri $1,4 \times 10^{-8}$ cm/s olarak belirlenmiştir. %1 KK ve %3 KK katkılı numunelerin katkısız numuneye göre geçirimsizlik katsayısının ihmal edilebilecek seviyede artarak sırasıyla $1,7 \times 10^{-8}$ ve $1,5 \times 10^{-8}$ cm/s değerine yükseldiği tespit edilmiştir (Şekil 4.8). Fakat %5 KK katkılı numunede ise katkısız numuneye göre geçirimsizlik katsayısının 7 kat arttığı belirlenmiştir.

Standart kompaksiyonda olduğu gibi modifiye enerjide sıkıştırılıp donma-çözülme çevrimlerine maruz bırakılan tüm numunelerin geçirimsizlik katsayısı değerleri 0-çevrime göre arttığı belirlenmiştir. Şekil 4.8 incelendiğinde 5 ve 10 çevrimler kendi aralarında karşılaştırıldığında ise 10-çevrime maruz bırakılan numunelerdeki artışın 5-çevrime kıyasla daha fazla olduğu görülmektedir. 5-çevrime maruz bırakılan katkısız kil numunenin geçirimsizlik katsayısı $3,2 \times 10^{-7}$ cm/s olarak belirlenmişken %1 KK katkılı numunenin geçirimsizlik katsayısı %25 azalarak $2,4 \times 10^{-7}$ cm/s değerine düşmüştür. Benzer şekilde %3 KK'lı numunenin geçirimsizlik katsayısı %28 azalarak $2,3 \times 10^{-7}$ cm/s değerine ve %5 KK'lı numunenin geçirimsizlik katsayısı ise %13 azalarak $2,8 \times 10^{-7}$ cm/s değerine düştüğü tespit edilmiştir. 10-çevrime maruz bırakılan katkılı numunelerin geçirimsizlik katsayısı değerleri katkısız numuneninkine göre azalmıştır (Şekil 4.8). %1 KK katkılı numunenin geçirimsizlik katsayısı katkısız numuneye göre %55 azalarak $3,5 \times 10^{-7}$ cm/s

düştüğü daha sonra %3 KK'da artarak $6,9 \times 10^{-7}$ cm/s değerine yükseldiği ve %5 KK'da ise $2,8 \times 10^{-7}$ cm/s değerine tekrar düştüğü belirlenmiştir. 10-çevrimde genel bir artış veya azalış trendinin olmadığı buna karşılık azalış-artış-azalış trendinin olduğu belirlenmiştir (şekil 4.8.).

Genel olarak modifiye kompaksiyon enerjisi altında sıkıştırılan numunelerin arasında tüm çevrim sayılarında en düşük geçirimlilik katsayısı değerini %1 KK katkılı numunelerin verdiği tespit edilmiştir.

5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Bu çalışma hurda lastiklerin piroliz yöntemi kullanılarak geri dönüştürülmesi ile elde edilen karbon karasının (KK) killi zeminlerin geçirimsizlik katsayısı değerine etkisi incelenmiştir. Bu kapsamda CH bir kil zemine kuru ağırlıkça %1, %3 ve %5 oranlarında KK katılarak karışımlar elde edilmiştir. Hazırlanan her bir karışım üzerinde indeks deneyleri ve standart ve modifiye kompaksiyon deneyleri yapılmıştır. Her iki kompaksiyon enerjisi için belirlenen optimum su içeriklerinde sıkıştırılan numuneler düşen seviyeli permeabilite deneylerine tabii tutulmuştur. Ayrıca, geçirimsizlik katsayısına donma-çözülme etkisini incelemek amacıyla KK katkılı ve katkısız numuneler 5 – 10 donma-çözülme çevrimine maruz bırakılmıştır. Bu çalışma kapsamında elde edilen sonuçlar aşağıda maddeler halinde özetlenmiştir.

- SEM analizlerinden KK'nın dane çapının yaklaşık 40 nano-metre olduğu tespit edilmiştir. Diğer taraftan, KK'nın süper hidrofob (su itici) bir malzeme olduğu temas açısı analizden belirlenmiştir.
- Likit limit (LL) deney sonuçlarına göre KK oranı arttıkça LL değerinin arttığı tespit edilmiştir. Bu duruma anyon olan karbon atomunun kilin elektriksel çekim kuvvetini etkilemesinin neden olduğu düşünülmektedir. Diğer taraftan, plastik limit (PL) deneylerinde genel bir davranış trendi belirlenememiştir. PL değeri %1 KK'da artmış daha sonra KK oranı arttıkça PL değeri düşmüştür.
- Katkısız ve KK katkılı numuneler üzerinde standart ve modifiye kompaksiyon deneyleri yapılmıştır. Her iki sıkıştırma enerjisinde KK oranı arttıkça maksimum kuru birim hacim ağırlık değeri azalmıştır. Bu duruma, kil zeminden daha hafif bir malzeme olan karbon karasının neden olduğu düşünülmektedir. Diğer taraftan, optimum su içeriği değerleri, her iki sıkıştırma enerjisi için de, %3 KK oranına kadar kademeli olarak artmış daha sonra %5 KK oranında düşmüştür. Elde edilen w_{opt} değerleri geoteknik mühendisliği açısından irdelendiğinde, karbon karasının kil zeminin w_{opt} 'a olan etkisinin ihmal edilebilir seviyede olduğu tespit edilmiştir.
- Belirlenen KK oranlarında hazırlanan numuneler kompaksiyon deneylerinden elde edilen w_{opt} su içeriklerinde sıkıştırılarak düşen seviyeli permeabilite deneyine tabi

tutulmuşlardır. Standart kompaksiyon enerjisinde sıkıştırılan ve donma-çözölmeye maruz bırakılmayan (0 çevrim) numunelerde %1 KK ve %3 KK katkılı numunelerin katkısız numuneye göre geçirimlilik katsayısının sırasıyla %56 ve %7 azaldığı tespit edilmiştir. Ancak, %5 KK katkılı numunede ise katkısız göre geçirimlilik katsayısının yaklaşık 10 kat arttığı belirlenmiştir. Modifiye kompaksiyon enerjisinde sıkıştırılan ve donma-çözölmeye maruz bırakılmayan numunelerde ise %1 KK ve %3 KK katkılı numunelerin katkısız numuneye göre geçirimlilik katsayısının ihmal edilebilecek seviyede arttığı tespit edilmiştir. Fakat %5 KK katkılı numunede ise katkısız göre geçirimlilik katsayısının 7 kat arttığı belirlenmiştir.

- Diğer taraftan, Donma-çözölme çevrimlerinin katkısız ve KK katkılı numunelerin geçirimliliğine etkisini inceleyebilmek için 5 ve 10 çevrimlik donma-çözölmeye maruz bırakılmışlardır. Çevrim sonrasında numuneler düşen seviyeli permabilite deneyine tabii tutulmuşlardır. Standart kompaksiyon enerjisi altında sıkıştırılan ve donma-çözölme çevrimlerine maruz bırakılan tüm numunelerin geçirimlilik katsayısı değerlerinin 0-çevrime göre arttığı tespit edilmiştir. Bu duruma, donma prosesinde numunelerin boşluklarında bulunan suyun donması ve oluşan buz kristallerinin hacimce büyümesine bağlı olarak numunelerin boşluk yapısının değişmesi ve boşluk hacminin artması olarak düşünülmektedir. Boşluk hacmi artan numunede ise geçirimliliğin artması kaçınılmaz bir sonuç olarak karşımıza çıkmaktadır. Standart kompaksiyonda olduğu gibi modifiye enerjide sıkıştırılıp donma-çözölme çevrimlerine maruz bırakılan tüm numunelerin geçirimlilik katsayısı değerleri donma-çözölmeye maruz bırakılmayan numuneye göre arttığı belirlenmiştir. Genel olarak hem standart kompaksiyon enerjisi, hem de modifiye kompaksiyon enerjisi altında sıkıştırılan numunelerin tüm çevrimlerde (0-5-10 çevrimlerde) en düşük geçirimlilik katsayısı değerini %1 KK katkılı numunelerin verdiği tespit edilmiştir.

Karbon karasının killi zeminlerin geçirimliliğine olan etkisinin daha iyi anlaşılabilmesi için farklı mineraloji ve geoteknik özelliklere sahip killer üzerinde deneylerin yapılması gerekmektedir. Ayrıca, geçirimlilik deneylerinin üç eksenli permeabilite deney düzeneği kullanılarak yapılması deneylerin tutarlılığı için önem arz etmektedir. Bu kapsamda karbon karası farklı kil zeminler ile karıştırılarak permeabilite deneyleri yapılması düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

- Adhikari, B., De, D. ve Maiti, S., 2000, Reclamation and recycling of waste rubber, *Progress in Polymer Science*, 25, 909-948.
- Akbulut, R.K., 2008. Yüzey Aktif Madde ile Muamele Edilen Kilin Bazı Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri. Y. Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- Akyıldız, V., 2011. Lastikten Türetilmiş Yakıt Pirolyzi. Doktora Tezi, Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- Andersland, O.B. and Ladanyi, B., 1994. An introduction to frozen ground engineering. Second Edition. The American Society of Civil Engineering, John Wiley & Sons Inc., New Jersey.
- Andersland, O.B., Anderson, D.M. 1978. Geotechnical engineering for cold regions. McGraw-Hill Book Co., Inc., Newyork, N.Y., 75.
- Anonim 2015. <http://cevreonline.com/omrunu-tamamlamis-lastikler-ot/> (21.11.2016).
- Anonim 2016. <https://www.dunya.com/sectorler/otomotiv/trafige-kayitli-arac-sayisi-20-milyonu-asti-haberi-310150> (21.11.2016).
- Anonim 2017. <https://www.dunya.com/surdurulebilir-dunya/hurda-lastiklerden-ekonomiye-312-milyon-liralik-katki-haberi-351494> (02.04.2017).
- Anonim2011.<http://www.yontemizlik.com/sayfalar7f4c.html?LanguageID=1&cid=47&id=57&id2=130&b=detay> (21.11.2016)
- ASTM D 422-63 (1999). Standard test method for particle-size analysis of soils. Annual Book of ASTM Standards. American Society for Testing and Materials, Philadelphia, USA.
- ASTM D 4318-98 (2000). Standard test method for liquid limit, plastic limit and plasticity index of soils. Annual Book of ASTM Standards. American Society for Testing and Materials, Philadelphia, USA.
- ASTM D 698 (1999). Standard test method for laboratory compaction characteristics of soil using standard effort. Annual Book of ASTM Standards. American Society for Testing and Materials, Philadelphia, USA.
- ASTM D 5084-00 (2003). Standard Test Method for Measurement of Hydraulic Conductivity of Saturated Porous Materials Using a Flexible Wall Permeameter 1, In:Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, USA.
- ASTM D 854 (2000). Standard test method for specific gravity of soil solids by water pycnometer. Annual Book of ASTM Standards. American Society for Testing and Materials, Philadelphia, USA.
- Aytekin, M., 2004. Deneysel Zemin Mekaniği, Teknik Yayınevi, Ankara.
- Batır, B., 2002. Türkiye İçin Kullanılmış Lastik Yönetimi Araştırması. Y. Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Beheshti Germi, M.H., 2016. Geri Dönüştürülmüş Nano Karbon Karasının Betonun Bazı Fiziksel ve Mekanik Özelliklerine Etkisi. Y.Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- Benson, C.H. and M.A. Othman, 1993. Hydraulic conductivity of compacted clay frozen and thawed in situ, *J. Geotech. Engrg.*, 119 (2), 276-294.

- Benson, C.H., Abichou, T.H., Olson, M.A. and Bosscher, P.J., 1995. Winter effects on hydraulic conductivity of compacted clay, *J. Geotech. Engrg.*, 121 (1), 69-79.
- Bowles, J. E., 1986. *Engineer Properties of Soils and Their Measurement*. McGraw-Hill, Newyork, 624.
- Brandl, H. 2008. Freezing-Thawing behaviour of soils and unbound road layers. *Slovak Journal of Civil Engineering*, 3, 4-12.
- Broderick, G.P., Daniel, D.E. 1990. Stabilizing compacted clay aganist chemical attack. *J. Geotech. Engrg.*, ASCE, 116(10), 1549-1567.
- BS 1377-2 (1990). *Methods of test for soils for civil engineering purposes. Classification test*. BSI, 2, London
- Chamberlain, E.J., and Gow, A.J., 1979. Effect of freezing and thawing on the permeability and structure of soils, *Developments in Geotechnical Engineering*, 26, 73-92.
- Chamberlain, E.J., Iskveer, I. and Hunsiker, S.E., 1990. Effect of Freeze-Thaw on the Permeability and Macrostructure of Soils. *Proceedings International Symposium on Frozen Soil Impacts on Agricultural, Range, and Forest Lands*, Spokane, 145-155.
- Coduto, D. P., 2006. *Geoteknik Mühendisliği*, Gazi Kitabevi, İstanbul.
- Cruzda, K.A. and Hohmann, M., 1997. Freezing effect on strength of clayey soils. *Applied clay science*, 12, 165-187.
- Çabuk, N., 2012. Sıcak Filament Destekli Kimyasal Buhar Biriktirme Yöntemi ile Süper Su İtici Nano Kaplama Sentezi. Y. Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- Çetişli, F., 2013. Ömrünü Tamamlamış Lastiklerin Pirolyzi. Y. Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Çokça, E., 2001, Use of class C fly ashes for the stabilization of an expansive soil, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 127 (7), 568-573.
- Demirbaş, A., Arin, G., 2002. An overview of Biomass Pyrolysis. *Energy Sources, Part A* 24: 471 p.
- Donatella Sterpi, 2015. Effect of freeze–thaw cycles on the hydraulic conductivity of a compacted clayey silt and influence of the compaction energy, *Soils and Foundations*, 55(5):1326–1332.
- Donnet *et al.* 1993 *Carbon Black Industry. Carbon Black: Science and Technology*. Donnet . J-B., Bansal. R.C., Wang CRC Press, USA, 2-6.
- Eigenbrod. K. D., 1996. Effects of cyclic freezing and thawing on volume changes and permeabilities of soft fine-grained soils. *Canadian Geotechnical Journal*, 33(4), 529-537.
- Eigenbrod. K. D., 1996. Effects of cyclic freezing and thawing on volume changes and permeabilities of soft fine-grained soils. *Canadian Geotechnical Journal*, 33 (4), 529-537.
- Emiroğlu, M., 2006. Atık Lastiğin Beton İçerisinde Kullanımı Ve Betonun Karakteristiklerine Etkisi. Y. Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- Erol, A., 2007, C Sınıfı Uçucu Kül Katkılı Siltlerin Dayanım ve Donma-Çözülme Direncinin Deneysel Olarak İncelenmesi. Y. Lisans Tezi, Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.

- Ersan, H., 1996. Uçucu Küllerin Siltli Zeminlerin Kayma Mukavemeti Üzerine Etkisi. Y. Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Erşahan, H., Şara, O.N., 1996. Kömürlerin Flash pirolizi ve kullanılan deneysel teknikler. Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi Cilt 9, sayı 2, 53-68 s.
- Ghazavi, M., Roustaei, M. 2010. The influence of freeze-thaw cycles on the unconfined compressive strength of fiber-reinforced clay, *Cold Regions Science and Technology*, 61, 125-131.
- Gönüllü, M., T., 2004. Atık lastiklerin yönetimi. Katı Atık Geri Dönüşüm Teknolojileri Semineri, İstanbul Sanayi Odası, İstanbul.
- Gürses, A., Bayrakçeken, S., 1996. Deneysel Fizikokimya, Atatürk Üniversitesi Yayın 807, 59-65, Erzurum.
- Hicks, R.E., Probstein, R.F., 1983. *Synthetic Fuels*, McGraw Hill, 95-107, New York.
- Işık, A., 2014 Sıkıştırılmış Zeminlerde Donma-Çözülme Olayının Deneysel İncelenmesi. Y. Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- İmamoğlu, C.T., 2012. Atık Lastik Katkılı Asfalt Kaplamaların Trafik Gürültüsünü Sönümlemedeki Etkileri. Y. Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Jean-Marie Konrad and Martin Samson, 2000. Influence of freezing temperature on hydraulic conductivity of silty clay, *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 126 (2), 180-187.
- Jing, W., Xiaolong, Q., Chunli, W. and Yiming, X., 2013. Experimental research on shear strength of subgrade soil and plasticity index under different freeze-thaw cycles. *Applied Mechanics and Materials*, 256-259, 43-47.
- Joshi, R. C., Duncan, D. M., and McMaster, H. M., 1975, New and Conventional Engineering Uses of Fly Ash., *J. Transp. Eng.*, 101(4), 791-806.
- Juma, M., Korenova, Z., Markos, J., Annus, J., Jelemensky, L., 2006. Pyrolysis and combustion of scrap tire, *Petroleum & Coal*, 48, 15-26.
- Keskin, S.N., 1993. İstanbul Neojen Kilinin Şişme Davranışına Ön Konsolidasyonun Minerolojik Özelliklerin Ve Çevresel Faktörlerin Etkisi. Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Keskin, S.N., Sungur, A., Akan, R., Uzundurukan, S., 2017. İnce daneli zeminlerde katkı maddelerinin ve donma-çözülme çevriminin serbest basınç dayanımına etkisi. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 5 (3), 473-478.
- Kim, W. H. and Daniel D. E., 1992. Effects of freezing on hydraulic conductivity of compacted clay. *Journal of Geotechnical Engineering*, 118, 1083-1097.
- Kim, W., Daniel E.D. 1992. Effects of freezing on hydraulic conductivity of caompacted clay. *Journal of Geotechnical Engineering* 7, 1083-1097.
- Konrad, J-M. ve Samson M., 2000. Hydraulic conductivity of kaolinite-silt mixtures subjected to closed-system freezing and thaw consolidation. *Canadian Geotechnical Journal*, 37, 857-869.
- Kuhner, G. ve Voll, M., 1993, *Manufacture of Carbon Black*, Carbon Black, (Ed: Donnet, J.P., Bansal, R.C., Wang, M.J.) Science and Technology, 1-66, A.B.D.
- Laresgoiti, M.F., Marco, I., Torres, A., Caballero B., Cabrero M.A. and Chomon M.J., 2000, Chromatographic analysis of the gasses obtained in tyre pyrolysis, *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 55, 43-54.

- Li, G., Ma, W., Zhao, S., Mao, Y. and Mu, Y., 2012. Effect of freeze-thaw cycles on mechanical behavior of compacted fine-grained soil. *ASCE Cold Regions Engineering*, 72-81.
- Li, G., Ma, W., Zhao, S., Mao, Y. and Mu, Y., 2012. Effect of freeze-thaw cycles on mechanical behavior of compacted fine-grained soil. *ASCE Cold Regions Engineering*, 72-81.
- Linell, K.A., Kaplar, C. 1959. The factor of soil and material type in frost action. *Highway Research Board Bulletin*, 225, 88-126.
- MEGEP (Mesleki Eğitim ve Öğretim Sistemini Güçlendirme Projesi), 2011, T.C. Millî Eğitim Bakanlığı, Kimya teknolojisi karbon karaları ve testleri 524KI0246 Ankara.
- Mitchell, J.K., 1976. *Foundamentals of soil behavior*, New York, 379.
- Murugan, S., Ramaswamy, M.C., Nagarajan, G., 2008. The Use of Tyre Pyrolysis Oil in Diesel Engines, *Waste Management*, 28, 2743–2749.
- Nasirpur, O., 2014. Kum Zeminlerin Serbest Basınç Mukavemeti ve Donma-Çözülme Özelliklerinin İyileştirilmesinde Polimerlerin Kullanılabilirliği. Y. Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- Nicholson, P.G., Kashyap, V., and Fuji, C., 1993. Lime and fiy ash admixture improvement of tropical Hawaiian soils, *Transportation Research Record* 1440, National Research Council, Washington, D.C., 71-78.
- Orhan, M., Özer, M. ve Işık, N.S., 2013. *Zemin Mekaniği Labaratuvar Deneyleeri Cilt 1*, Gazi Kitabevi, Ankara.
- Othman, M.A., and Benson, C.H., 1993. Effects of freze-thaw on the hydraulic and morphology of compacted clay. *Canadian Geotechnical Journal*, 30 (2), 236-246.
- Önalp, A., 2007. *Geoteknik Bilgisi-1 Zeminler ve Mekaniği*, Birsen Yayınevi, İstanbul.
- Özgan, E., Ertürk, S., Serin, S., 2012. Donma ve çözülmenin kohezyonlu zeminlerin fiziksel özelliklerine etkisinin incelenmesi, *Düzce Üniversitesi, İleri Teknoloji Bilimleri Dergisi* 1 (1), 7-16.
- Öztürk, Y.Z., Ünsal, N. ve Akbaş, S.O., 2015. Yerleşim alanını killerin şişme ve kireç ile iyileştirilme potansiyellerinin belirlenmesi. *Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der.*, 30 (2), 309-318.
- Parkash, S., 2010, *Carbon Black, Petroleum Fuels Manufacturing Handbook*, McGraw-Hill Book Company, Inc., 165-188, A.B.D.
- Paudel, W. and Wang, B. 2010. Freeze-thaw effect on consolidation properties of fine grained soils from the Mackenzie valley. 63rd Canadian Geotechnical Conference, 992-996, Alberta, Canada.
- Paudel, W. ve Wang, B., 2010. Freeze-thaw effect on consolidation properties of fine grained soils from the Mackenzie valley. 63rd Canadian Geotechnical Conference, 992-996, Alberta, Canada.
- Rahman, A.N.E., Akmal, M. A., and Prasad, K.B.S., 2001. Pyrolysis of Solid Wastes, *Journal of Scientific & Industrial Research*, 112-127.
- Savran, K.Z., 1988, *Stabilization of Cohesive Soils with Fly Ash*, METU, Ankara.
- Sezer, A., Tanrıman, N. ve Aytekin, N., 2017. Değişik tipte katkı ile güçlendirilmiş kum-bentonit karışımlarının dayanım özellikleri. *Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 13 (3), 797-801.

- Sharma, V.K., Mincarini, M., Fortuna, F., Cognini, F. ve Cornacchia, G., 1998, Disposal of waste tyres for energy recovery and safe environment, *Energy Convers*, 39, 511-528.
- Sugözü, İ. ve Mutlu, İ., 2009. Atık taşıt lastikleri ve değerlendirme yöntemleri. *Taşıt Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 1 (1), 35-46.
- Şahin, A., 2013. Atık Lastik ve Bentonit Eklenmiş Silis Dumanının Geçirimsiz Örtü Malzemesi Olarak Kullanımı. Y. Lisans Tezi, Cumhuriyet Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sivas.
- Taşcı, A., 2010. Piroliz Edilmiş Atık Araç Lastiklerinden Elde Edilen Atık Yağ Ve Karbon Siyahı İle Modifiye Edilmiş Bitümlü Bağlayıcının Reolojik Özellikleri. Y. Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- Tester, R.E., and Gaskin, P.N., 1992 Effect of fines content on frost heave. *Canadian Geotechnical Journal*, 33, 678-680.
- Tsytoich, N., 1975. The mechanics of frozen ground. Scripta Book Co. 78– 79. ISBN 978-0-07-065410-5.
- Türk Dil Kurumu – Bilim ve Sanat Terimleri Ana Sözlüğü, <http://tdkterim.gov.tr/>, (21.11.2016).
- Türköz, M., 2006. Şişen killerin kireç katkısı ile stabilizasyonu ve eskişehir- meşelik killerine uygulanması, *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Müh.Mim.Fak.Dergisi C.XIX*, S.2,
- Uzuner, B.A., 2007. Çözümlü Problemlerle Temel Zemin Mekaniği, Derya Kitapevi, Trabzon.
- Ünlü, H., 2006. Otomotiv Endüstrisinde Oluşan Tehlikeli Atıkların Geri Kazanım. Y. Lisans Tezi, Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa.
- Vahapoğlu, V., 2006. Kauçuk türü malzemeler-II. sentetik kauçuk, *KSÜ. Fen ve Mühendislik Dergisi*, 9 (1): 44-55.
- Viklander. P., 1998. Permeability and volume changes in till due to cyclic freze-thaw. *Canadian Geotechnical Journal*, 35(3), 471-477.
- Wallace, J.F. 1987. Laboratory testing of bentonite amended soil mixtures proposed for a mine waste disposal facility liner. In *Geotechnical and geohydrological aspects of waste management*. Edited by D.J.A. van Zyl et. al. J.D. Nelson, S.R. Abt, and T.A. Shepherd Lewis Publishers, Chelsea, MI, 245-258.
- Williams, P.T. ve Chishti, H.M., 2000, Two stage of oil shale using a zeolite catalyst, *Journal of Analytical and Applied Science*, 55, 217-234.
- Yakaboylu, O., 2010. Atık Lastik Yönetiminde Ve Atık Lastik Pirolyzi Model Tesisi İçin Yapılabilirlik Çalışması. Y. Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Yetimoğlu, T., Çiçek, E. ve Güler, E., 2001. Effects of Geosynthetics on Compressibility of Soils.
- Yıldız, M., Soğancı, A.S., Demiroz, A. Albayrak, V., 2004. Tekrarlı donma ve çözülmenin kireçle stabilize edilmiş kil zeminlerin mukavemet ve permeabilitesine etkisi. *Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Onuncu Ulusal Kongresi*, 227-236, İstanbul.
- Yıldız, M., Soğancı, A.S., Demiroz, A. ve Albayrak, V. 2004. Tekrarlı donma ve çözülmenin kireçle stabilize edilmiş kil zeminlerin mukavemet ve permeabilitesine etkisi. *Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Onuncu Ulusal Kongresi*, 227-236., İstanbul.

- Yong, R.N., Boonsinsuk, P., Yin, C.W.P. 1985. Alternation of soil behavior after cyclic freezing and thawing. Proceedings, 4th International Symposium on Ground Freezing, Sapporo, Japan, 245-258.
- Zabaniotou, A.A. ve Stravropoulos, G., 2003, Pyrolysis of used automobile tyres and residual char utilization, Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 70, 711-722.
- Zaimoğlu, A.Ş., 2010. Freezing–thawing behavior of fine-grained soils reinforced with polypropylene fibers. Cold Regions Science and Technology 60 (1), 63-65.
- Zorluer, İ., Taşpolat, L.T., Koyuncu, H., 2006. Atık mermer tozunun geçirimsiz kil tabakalarda donma - çözülmeye etkisi. Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi, 2, 11-16.

ÖZGEÇMİŞ

1992 yılında Trabzon'da doğdu. İlköğrenim ve lise eğitimini Erzurum'da tamamladı. 2010 yılında Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'ne başladı. 2014 yılında üniversiteden mezun oldu. Aynı yıl Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde Yüksek Lisans öğrenimine başladı. 2017 yılından itibaren özel bir firmada İnşaat Mühendisi olarak çalışmaya devam etmektedir.