İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

ATIK MALZEMELERİN DRENAJ SİSTEMLERİNDE KULLANIM UYGUNLUĞUNUN DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ

DOKTORA TEZİ

Ayşegül BAYIN SARIAHMETOĞLU

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği Programı

NİSAN 2021

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

ATIK MALZEMELERİN DRENAJ SİSTEMLERİNDE KULLANIM UYGUNLUĞUNUN DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ

DOKTORA TEZİ

Ayşegül BAYIN SARIAHMETOĞLU
(501102302)

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Recep İYİSAN

NİSAN 2021

İTÜ, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün 501102302 numaralı Doktora Öğrencisi Ayşegül BAYIN SARIAHMETOĞLU, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı "ATIK MALZEMELERİN DRENAJ SİSTEMLERİNDE KULLANIM UYGUNLUĞUNUN DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ" başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı :	**Prof. Dr. Recep İYİSAN** İstanbul Teknik Üniversitesi	.....
Jüri Üyeleri :	**Doç. Dr. İsmail Hakkı AKSOY** İstanbul Teknik Üniversitesi	.....
	Doç. Dr. Mehmet Şükrü ÖZÇOBAN Yıldız Teknik Üniversitesi	.....
	Prof. Dr. Aykut ŞENOL İstanbul Teknik Üniversitesi	.....
	Prof. Dr. Feyza ÇİNİCİOĞLU İstanbul Üniversitesi	.....

Teslim Tarihi : 26 Mart 2021
Savunma Tarihi : 20 Nisan 2021

Kardeşim Şehit Polis Memuru Emrah Bayın'a,

ÖNSÖZ

Teknolojik gelişmelerle birlikte inşaat mühendisliği uygulamalarından yapılaşma, modern ve farklı bir boyut kazanmakta, bu kazanım sonucunda yapı üretim malzemelerinin çeşitliliğinin artması ihtiyaç haline gelmektedir. Yapı üretim malzemeleri çeşitliliğinin artması, doğal kaynakların tüketimini önemli boyutta etkilemekte ve faklı kaynaklara yönelmeyi zorunlu hale getirmektedir. Günümüzde, yapı malzemelerinin üretiminde doğal kaynakların kullanımından ziyade, atık malzemelerin geri dönüşüm yöntemleriyle kullanılabilir hale getirilmesi önem kazanmaktadır. Atık malzemelerinin sürdürülebilir bir politikayla geri dönüşümünün sağlanması, hem doğal kaynakların hem de çevrenin korunmasını sağlamakta, böylece ülke ekonomilerine önemli katkılar sunmaktadır.

Atık malzemelerinin geri kazanım yoluyla kullanımı alanındaki bu gelişmeler, zemin yapısının mühendislik alanındaki bilim dalı olan geoteknik mühendisliğinin çalışma konuları arasına da girmekte ve bu konularda araştırma geliştirme çalışmaları yapmak önem kazanmaktadır. Son yıllarda, geri dönüşüm yoluyla kullanılan beton agregası, atık asfalt ve çelik cürufu gibi malzemelerin karayolu yapımında kullanımına yönelik araştırmalar hız kazanmaktadır. Mühendislik kontrol araştırmaları sonucunda, karayolu yapımından sonra karşılaşılan stabilite, deformasyon ve taşıma gücü problemlerinin çoğunlukla yetersiz drenaj çalışmalarından kaynaklandığı belirlenmektedir. Karayolu yapımının önemli konularından bir diğeri de yol altı drenaj sistemlerinin inşası çalışmalarıdır. Yeraltı su seviyesinin kontrol altına alınabilmesi amacıyla yapılan drenaj sistemlerinde doğal, yapay ve geri kazanılmış agregalar kullanılabilmektedir.

Bu çalışma kapsamında, geri dönüşüm malzemeleri olan atık asfalt, atık beton, çelik cürufu malzemelerinin yol altı drenaj sistemlerinde filtre malzemesi olarak kullanılabilirliğinin tespitinin yapılması amacıyla uzun süreli filtrasyon deneyleri yapılmış ve sonuçları irdelenmiştir. Farklı agrega türleri ve geotekstilden oluşan drenaj sistemlerinin uygulamada kullanılabilirliliğinin ve zamana bağlı filtrasyon davranışının belirlenmesi amacıyla, ASTM D5101 standartında tanımlanan uzun süreli filtrasyon deney düzeneği yeniden tasarlanarak imalatı yaptırılmış ve yeni deney düzeneği kurularak araştırmalar yapılmıştır. Geri dönüşüm malzemelerinden kazandırılarak kullanılan agregaların, farklı geotekstil kombinasyonuyla tasarlanmış uzun süreli filtrasyon deney düzeneğinde, drenaj sistemi üzerinde atık malzeme–geotekstil sisteminde oluşabilecek potansiyel tıkanma mekanizmalarının, zaman ve akış yönüne bağlı olarak malzeme dane çapı dağılımındaki değişimleri incelenmiş ve irdelenmiştir.

Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği doktora programı kapsamında hazırladığım bu çalışmama, akademik gelişimimin başladığı ilk günümden bu zamana kadar her şartta özveri gösterip, yardım ve fikirlerini esirgemeyen, beni yetiştiren değerli danışmanım Prof. Dr. Recep İYİSAN'a teşekkürü bir borç bilir, hürmet ve şükranlarımı sunarım. Tez çalışmamı kıymetli zamanlarını ayırarak takip eden, inceleyen ve değerli görüş ve bilgilerini benimle paylaşan tez izleme komitesindeki

hocalarım Doç. Dr. İsmail Hakkı AKSOY ve Doç. Dr. Mehmet Şükrü ÖZÇOBAN'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Yine çalışmamda konu, kaynak ve yöntem açısından bana yol göstererek yardımlarını esirgemeyen Dr. Öğr. Üyesi Mustafa HATİPOĞLU'na ve Dr. Öğr. Üyesi Aslı YALÇIN DAYIOĞLU'na en içten teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca, İstanbul Teknik Üniversitesi Avrasya Yer Bilimleri Enstitüsü Müdür Yardımcısı Prof. Dr. Gültekin TOPUZ'a teşekkür etmeyi borç bilirim.

Deneysel çalışmamda kullandığım atık malzemelerin temininde bana yardımcı olan, Çolakoğlu Metalurji A.Ş.'ye, Diler Demir Çelik Endüstrisi ve Tic. A.Ş.'ye, , İsfalt A.Ş.'ye, İstaç A.Ş.'ye, doğal agrega temininde yardımlarını esirgemeyen Dilşad Madencilik Harita İnşaat Nakliyat San. ve Tic. Ltd. Şti.'ye ve Taşel İnşaat Zile Taşel Çimento Tic. Ltd. Şti.'ye teşekkürlerimi sunarım.

Doktora tez çalışmamın numune temini, taşınması, öğütülmesi ve elenmesi aşamalarında çok büyük katkılar sunarak destek veren kuzenim Hasan BAYIN'a ve arkadaşı Mete AKTOPRAK'a minnettarım. Ayrı ülkelerde de olsak sürekli arayarak beni motive eden ve yardımlarını esirgemeyen Dr. Feyzullah GÜLŞEN'e, sadece tez çalışmamda değil hayatımın her alanında desteğini her zaman hissettiğim Yeşim YILMAZ'a ve son derece sıkıntılı geçen bu süreçte bana karşı sabrını ve inancını bir kez bile yitirmemiş tüm arkadaşlarıma sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Hayatım boyunca maddi manevi desteklerini esirgemeyen annem Hüsne BAYIN'a, babam Dursun BAYIN'a sevgilerimi ve hürmetlerimi sunarım. Fiziki olarak bu dünyada yanımda olmasa da varlığını her zaman yanımda hissettiğim ve her daim hissedeceğim, gururumuz, iki kıymetlimden büyüğü, kardeşim Şehit Emrah BAYIN'a ve iki kıymetlimin küçüğü, can kardeşim Harun BAYIN'a minnettarım. Değerli amcam Sefer BAYIN' a ve diğer aile üyelerime teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmamı tamamlayabilmem için karşıma çıkan zorluklarda, desteği ve yardımları ile engelleri aştığım, uzun çalışma saatlerime göstermiş olduğu sabır ve anlayışı ile bu yolu birlikte katettiğim, her durumda ve koşulda yanımda olan hayat arkadaşım Ömür SARIAHMETOĞLU'na çok teşekkür ederim.

Bu stresli ve yorucu yolda, küçük yaşına rağmen beni anlamaya çalışan, laboratuvar çalışmalarımda yanımda olarak küçücük eli ve yüreğiyle bana en büyük yardımı ve desteği veren, umutsuz ve mutsuz zamanlarımda bir gülüşü ve öpücüğü ile bana tüm olumsuzlukları unutturan, güzel emanetim biricik kızım Ayşe Zümra SARIAHMETOĞLU'na sevgilerin en büyüğünü, minnettarlığın en büyüğünü hissettiğimi ve teşekkürün en büyüğünü de biricik kızıma sunduğumu belirtmek isterim. Tez çalışmamın tüm bilim dünyasına hayırlı olmasını temenni ederim.

Mart 2021

Ayşegül BAYIN SARIAHMETOĞLU
(Yüksek İnşaat Mühendisi)

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ ..... **vii**
İÇİNDEKİLER ..... **ix**
KISALTMALAR ..... **xi**
SEMBOLLER ..... **xiii**
ÇİZELGE LİSTESİ ..... **xv**
ŞEKİL LİSTESİ ..... **xvii**
ÖZET ..... **xxiii**
SUMMARY ..... **xxv**
1. GİRİŞ **1**
1.1 Amaç 6
1.2 Kapsam 8
2. ATIK MAZLEMELERİN DRENAJ SİSTEMLERİNDE KULLANIMI **11**
2.1 Sürdürülebilirlik ve Döngüsel Yaşam 13
2.2 Drenajın Önemi ve Drenaj Uygulamaları 20
2.2.1 Yüzey suyu drenajı 26
2.2.2 Yer altı suyu drenajı 26
2.2.2.1 Yer altı suyu drenaj tesisleri 27
2.3 Yol Altı Drenaj Tabakalarını Oluşturacak Malzemelerin Özellikleri 31
2.4 Karayollarında Kullanılabilme Potansiyeline Sahip Endüstriyel Atık Malzemeler 35
2.4.1 Geri dönüşüm asfalt malzeme 39
2.4.2 Geri dönüşüm beton malzeme 45
2.4.3 Çelik cürufu 54
2.5 Drenaj Amaçlı Geotekstil Kullanımı 66
2.6 Uzun Süreli Filtrasyon Deneyi 81
2.7 Geotekstil İnce Kesit Numunesi Hazırlama ve Görüntü Alımı 91
3. MALZEME VE YÖNTEM **97**
3.1 Malzeme 97
3.1.1 Kullanılan numunelerin geoteknik özellikleri 98
3.1.1.1 Geomalzeme 98
3.1.1.2 Geotekstil 103
3.2 Yöntem 105
3.2.1 Geliştirilmiş uzun süreli filtrasyon deney sistemi 107
3.2.2 Geotekstil optik görüntüleme 116
4. DENEYSEL ÇALIŞMA **119**
4.1 Deney Numunelerinin Hazırlanması 120
4.1.1 Geliştirilmiş uzun süreli filtrasyon deneyi numunesinin hazırlanması 120
4.1.2 İnce kesit numunesinin hazırlanması 123
4.2 Geliştirilmiş Uzun Süreli Filtrasyon Deneyi 128

4.2.1 Geri kazanılmış asfalt-geotekstil sisteminin uzun süreli filtrasyon deneyleri 135
4.2.2 Geri kazanılmış beton-geotekstil sisteminin uzun süreli filtrasyon deneyleri 138
4.2.3 Çelik cürufu-geotekstil sisteminin uzun süreli filtrasyon deneyleri..... 139
4.2.4 Doğal agrega- geotekstil sisteminin uzun süreli filtrasyon deneyleri 141
4.3 Optik Görüntüleme 143
5. DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ 145
5.1 Uzun Süreli Filtrasyon Deney Sonuçları 147
5.1.1 Geri kazanılmış asfalt - geotekstil sisteminin uzun süreli filtrasyon deney sonuçları 147
5.1.2 Geri kazanılmış beton- geotekstil sisteminin uzun süreli filtrasyon deney sonuçları 152
5.1.3 Çelik Cürufu - Geotekstil Sisteminin Uzun Süreli Filtrasyon Deney Sonuçları..... 156
5.1.4 Doğal agrega - geotekstil sisteminin uzun süreli filtrasyon deney sonuçları 163
5.1.5 Farklı agrega türleri için filtrasyon parametrelerinin değerlendirilmesi ve tartışma 169
5.2 Optik Görüntülemenin Değerlendirilmesi 170
5.2.1 Geri kazanılmış asfalt-geotekstil sisteminin optik görüntüleri 172
5.2.2 Geri kazanılmış beton - geotekstil sisteminin optik görüntüleri 173
5.2.3 Çelik cürufu - geotekstil sisteminin optik görüntüleri 174
5.2.4 Doğal agrega - geotekstil sisteminin uzun süreli filtrasyon deney..... 176
6. SONUÇLAR 179
KAYNAKLAR..... 185
ÖZGEÇMİŞ 195

KISALTMALAR

AASTO : American Association of State Highway and Transportation Officials
AOS : Görünür Açıklık Boyutu
ASTM : American Society for Testing Materials
BOF : Bazik Oksijen Fırını
BZSS : Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemi
CBR : California Bearing Ratio
C&D : İnşaat ve Yıkım Atığı
EAO : Elektrik Ark Ocağı
EPA : Environmental Protection Agency
NA : Doğal Agrega
DK : Döküm Kumu
FHWA : Federal Highway Administration
ISO : International Organization for Standardization
İDO : İnce Dane Oranı
KTŞ : Karayolları Teknik Şartnamesi
LFT : Uzun Süreli Filtrasyon Deneyi
NAPA : Asphalt Pavement Association
PSD : Gözenek Açıklığı Boyut Dağılımı
RAP : Geri Kazanılmış Asfalt (Recycled Asphalt Pavement)
RCA : Geri Kazanılmış Beton (Recycled Concrete Material)
SPT : Standart Penetrasyon Deneyi (Standard Penetration Test)
SS : Çelik Cürufu (Steel Slag)
TS : Türk Standartları
UK : Uçucu Kül

SEMBOLLER

C_c	: Derecelenme katsayısı
C_u	: Uniformluk katsayısı
D_x	: x boyutundan küçük agrega danelerinin %'si
DTTA	: Deneye Tabii Tutulan Agrega
G_s	: Dane Özgül ağırlığı
GR	: Hidrolik eğim oranı
KR	: Geçirimlilik oranı
i	: Hidrolik eğim
i_{agrega}	: Agreganın hidrolik eğimi
$i_{agrega\text{-}geotekstil}$	: Agrega-geotekstil sisteminin hidrolik eğimi
k_{agrega}	: Agreganın permeabilite katsayısı (m/s)
k_{sistem}	: Agrega-geotekstil sisteminin permeabilite katsayısı (m/s)
PI	: Plastisite indisi
w_{opt}	: Optimum su muhtevası
γ_{kmaks}	: Maksimumum kuru birim hacim ağırlık
ΨR	: Permittivite oranı

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : Filtrasyon kriterleri (Karayolları Teknik Şartnamesi 2013). **31**
Çizelge 2.2: İnce ve kaba filtre malzemesinin özellikleri..... **32**
Çizelge 2.3 : Drenaj amaçlı kullanılan örgüsüz, polipropilen geotekstil tipleri ve özellikleri. **34**
Çizelge 2.4 : RCA malzemesinin kimyasal içeriği. **49**
Çizelge 2.5 : Farklı ülkelerdeki çelik cüruf içeriği (ağırlıkça %). **60**
Çizelge 2.6 : Çelik Cürufunun Bazı Fiziksel ve Mekanik Özlellikleri..... **65**
Çizelge 2.7 : Literatürde ASTM D5101 standardında yapılan uzun süreli filtrasyon deney sonuçları. 90
Çizelge 3.1 : Çalışmada kullanılan malzemeler ve sembolleri. **97**
Çizelge 3.2 : Çalışmada kullanılan numunelerin fiziksel özellikleri. **99**
Çizelge 3.3 : Deneye tabi tutulan numunenin fiziksel özellikleri..... **100**
Çizelge 3.4 : Deneysel çalışmada kullanılan numunelerin mekanik özellikleri. **102**
Çizelge 3.5 : Örgüsüz geotekstilin teknik özellikleri. **104**
Çizelge 3.6 : Standart Uzun Süreli Filtrasyon Deney Sistemi ve bu çalışmada kullanılan Uzun Süreli Filtrasyon Deney Sistemi..... 107
Çizelge 5.1 : RAP malzemesinin uzun düreli filtrasyon deneylerinden elde edilen hidrolik eğim oranı (GR) değerleri. **149**
Çizelge 5. 2 : RAP malzemesinin uzun süreli filtrasyon deneylerinden elde edilen geçirimlilik oranı (KR) değerleri. **149**
Çizelge 5.3 : RCA malzemesi uzun süreli filtrasyon deneylerinden elde edilen hidrolik eğim oranı (GR) değerleri. **153**
Çizelge 5.4 : RCA malzemesi uzun süreli filtrasyon deneylerinden elde edilen geçirimlilik oranı (KR) değerleri. **154**
Çizelge 5.5 : SS malzemelerinin uzun düreli filtrasyon deneylerinden elde edilen hidrolik eğim oranı (GR) değerleri. **159**
Çizelge 5.6 : SS malzemelerinin uzun süreli filtrasyon deneylerinden elde edilen geçirimlilik oranı (KR) değerleri. **159**
Çizelge 5.7 : NA numunelerinin uzun düreli filtrasyon deneylerinden elde edilen hidrolik eğim oranı (GR) değerleri. **165**
Çizelge 5.8 : NA numunelerinin uzun süreli filtrasyon deneylerinden elde edilen geçirimlilik oranı (KR) değerleri. **166**

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Endüstriyel atıkların geri kazanımının faydaları. **11**
Şekil 2.2 : Üretim ve tüketim faaliyetlerinden kaynaklanan malzeme akışlarını ve çevresel etkilerini dikkate alan sistem yaklaşımı. **15**
Şekil 2.3 : (a) Kaynak kullanımının yaşam döngüsü. **(b)** Kirlilik kontrolü dahil olmak üzere ekonomi çapında malzeme akışı yönetimi için ana hedef alanlar. **16**
Şekil 2.4 : Türkiye ve Avrupa ülkelerinde ortalama malzeme tüketimi. **18**
Şekil 2.5 : Türkiye sıfır atık yönetim hiyerarşisi. **19**
Şekil 2.6 : Karayolu kesiti. **20**
Şekil 2.7 : Yol tip enkesiti. **22**
Şekil 2.8 : Bir yola birden fazla nem göçü kaynağı. **23**
Şekil 2.9 : Donma şişmesi nedeni ile yol kaplamasında oluşan hasar. **25**
Şekil 2.10 : Yolaltı drenaj uygulamaları. **28**
Şekil 2.11 : (a) Yatay dren uygulamalarından drenaj şiltesi. **(b)** Düşey dren uygulamalarından yüzey altı drenaj hendek uygulaması. **29**
Şekil 2.12 : Kör dren ve borulu dren. **30**
Şekil 2.13 : Tipik Karayolu Alt Drenaj Sistemi **(a)** Drenaj borusun etrafına sarılı geotekstil. **(b)** Agreganın etrafına sarılı geotekstil. **30**
Şekil 2.14 : KTŞ'de tanımlanan drenaj filtre malzemeleri dane çapı dağılım grafiği. **33**
Şekil 2.15 : Yol altı drenaj uygulaması kesiti. **33**
Şekil 2.16 : Dünyada bazı maden üretimleri sonucu oluşan atık ve ürün bilgileri. **35**
Şekil 2.17 : Atık agrega geri dönüşüm tesisi örneği. **37**
Şekil 2.18 : RAP malzemesinin mineralojik bileşeni. **40**
Şekil 2.19 : Atık asfalt malzemeden asfalt ve agreganın ayrıştırılması süreci. **41**
Şekil 2.20 : RAP sıcak ve soğuk geri dönüşümünün teknolojik şeması. **42**
Şekil 2.21 : Doğal agrega ve % 100 RAP karışımı il elde edilem asfalt malzeme maliyetleri. **44**
Şekil 2.22 : İnşaat ve yıkım atıklarının sınıflandırılması. **45**
Şekil 2.23 : RCA malzemesinin mineralojik bileşeni. **46**
Şekil 2.24 : Beton geri dönüşümü. **47**
Şekil 2.25 : (a) Çelik cürufunun üretimi ve kullanımı. **(b)** Şematik kırma akışı, manyetik ayırma ve çelik cürufu ayırma. **55**
Şekil 2.26 : Dünya çapında ham çelik üretimi. **57**
Şekil 2.27 : Amerika Birleşik Devletleri, Avrupa, Japonya ve Çin'de çelik cürufu kullanımı. **58**
Şekil 2.28 : Geotekstil üretiminde yaygın olarak kullanılan polimerler ve SEM görüntüleri. **66**
Şekil 2.29 : Uygulamaya alanına göre küresel geotekstil pazar payı. **67**
Şekil 2.30 : Karayolu uygulamalarında geosentetiklerin çoklu fonksiyonları. **68**
Şekil 2.31 : Drenaj sistemlerinde geotekstil uygulanması örnekleri. **70**

Şekil 2.32 : Geotekstilin filtrasyon fonksiyonu. **71**
Şekil 2.33 : Geotekstil üretiminde kullanılan liflerin kesitleri; **(a)** geleneksel lif **(b)** oluklu elyaf lif. **75**
Şekil 2.34 : Agrega-geotekstil drenaj sisteminin zamana bağlı davranışı. **76**
Şekil 2.35 : Farklı Geotekstil açıklık boyutu ve zemin davranışları ile ilişkili mekanizmalar **(a)** Borulanma. **(b)** Köprüleme. **(c)** Körelme. **78**
Şekil 2.36 : (a) Geotekstil gözenek açıklığı büyük olduğu için dane göçü yaşanıyor. **(b)** Geotekstil gözenek açıklığı küçük tıkanma yaşanıyor. **78**
Şekil 2.37 : Daneciklerin birikme mekanizması: **(a)** tüm borular açık (tıkanma yok). **(b)** birkaç boru tıkalı. **(c)** boruların çoğu tıkalı. **(d)** geotekstilin üzerinde filtre keki oluşmuş. **79**
Şekil 2.38 : (a) Biyolojik tıkanma **(b)** Geotekstil tıkanmış yüzey alanının zamanla değişimi. **80**
Şekil 2.39 : Sabit seviyeli permeabilite deneyi. **81**
Şekil 2.40 : ASTM D5101 sandartında tanımlanan **(a)** uzun süreli filtrasyon deney düzeneği. **(b)** ASTM D5101 deney sistemi permeametresi **83**
Şekil 2.41 : Farklı senaryolar için uzun süreli filtrasyon deneylerinde agrega numunesi içindeki manometre yük kaybı dağılımı. **84**
Şekil 2.42 : Geotekstilde numune hazırlama ve deney esnasında borulu veya hapsolmuş daneler **(a)** Deney başlangıcında olağan varsayım. **(b)** Numune hazırlandıktan sonraki gerçek durum. **(c)** Deney sonunda durum. **86**
Şekil 2.43 : (a) Geotekstil elyafları arasındaki daralmayı tanımlayan küre şeklindeki parçacık. **(b)** Üstünde bir parçacığın durduğu (kırmızı), iki parçacığın durduğu (sarı) ve içinden geçmiş bir parçacığın (yeşil) geotekstildeki şematik görünümü. **92**
Şekil 2.44 : Geotekstil malzemelerin görüntü analizi için numune hazırlama adımları. **93**
Şekil 2.45 : Enine ve boyuna düzlemlerde ince kesit geotekstil numunesi hazırlanması. **94**
Şekil 2.46 : Geotekstilin optik görüntüleri **(a)** Yatay düzlem. **(b)** Dikey düzlem. **94**
Şekil 2.47 : Kullanılmamış geotekstilin **(a)** Düzlemsel. **(b)** Enine kesit görüntüleri. LFT sonrası geotekstilin **(c)** Düzlemsel. **(d)** Enine kesit görüntüleri.. . **95**
Şekil 2.48 : (a) Kullanılmamış geotekstilin: **(b)** Yaşlandırılmamış geri kazanılmış beton (RCA). **(c)** 12 ay yaşlandırılmış RCA numunelerinde kullanılan geotekstillerin uzun süreli filtrasyon deneyi sonrası kesit görüntüleri. 96
Şekil 3.1 : Farklı tesislerden temin edilmiş agregalar. **99**
Şekil 3. 2: Dane çaplarına göre depolanmış numuneler. **101**
Şekil 3.3 : Numunelerin dane çapı dağılımları. **103**
Şekil 3.4 : Deneysel çalışmada kullanılan geotekstilin her iki düzlemdeki fotoğrafı. **105**
Şekil 3.5 : Çalışmada yapılması planlanan deney programı **(a)** Fiziksel tıkanmanın belirlenmesi. **(b)** Geotekstil numunelerinin optik görüntülerinin alınması. **106**
Şekil 3.6 : Deneysel çalışmada kullanılması için geliştirilerek yeniden tasarlanmış olan Uzun Süreli Filtrasyon Deneyi sistemi. **109**
Şekil 3.7 : Geliştirilmiş ASTM D5101 Uzun Süreli Filtrasyon Deneyi Sistemi şematik görünüm **(a)** Doygunluk aşaması. **(b)** LFT aşaması. **110**

Şekil 3.8 : (a) Standart ASTM D5101 Deney Sistemi Permeametresinin şematik görüntüsü. **(b)** Geliştirilmiş ASTM D5101 Deney Sistemi Permeametresi şematik görüntüsü. **111**
Şekil 3.9 : Geliştirilmiş uzun süreli filtrasyon deney sisteminin üretim aşaması. ... **112**
Şekil 3.10 : Geliştirilmiş uzun süreli filtrasyon deney sisteminin monte aşaması .. **113**
Şekil 3.11 : İTÜ İnşaat Fakültesi Zemin Mekaniği Laboratuvarına kurulumu yapılmış olan geliştirilmiş LFT deney sistemi. **113**
Şekil 3.12 : İTÜ Zemin Mekaniği Laboratuvarına kurulumu ve ön deneyler ile kontrolü yapılan geliştirilmiş uzun süreli filtrasyon deney sistemi. ... **114**
Şekil 3.13 : Sızdırmazlığı sağlamak için kullanılan O ring, kelepçe ve membran.. **115**
Şekil 3. 14 : Numune yerleşimi esnasında hasar gören uzun süreli filtrasyon deneyi permeametre hücreleri. **115**
Şekil 3.15 : Geliştirilmiş uzun süreli filtrasyon deney sisteminde çeşme suyunu arıtmak için kullanılan filtreler. **116**
Şekil 3. 16 : Geotekstil numunesi ince kesit hazırlama adımları..... 117
Şekil 4.1 : Tez çalışmasının programı. **119**
Şekil 4.1 : Uzun süreli filtrasyon deney numunesinin hazırlanması. **122**
Şekil 4.2 : Farklı malzemeden imalatı yaptırılan uzun süreli filtrasyon permeametresi; alt haznesi **(a)** Pleksiglas malzeme. **(b)** Daha dayanıklı plastik malzeme. **123**
Şekil 4.3 : İnce kesit numunesinin hazırlanması için kullanılan dairesel kesitli kalıplar. **124**
Şekil 4.4 : Dairesel kesitli geotekstil numunelere epoksi uygulanması..... **125**
Şekil 4.5 : Geotekstil kesitlerin cam lam üzerine yerleştirilmesi. **125**
Şekil 4.6 : Getoekstil kesitlerin inceltilmesi. **126**
Şekil 4.7 : İnceltilmiş geotekstil numunelerin zımparalanması. **126**
Şekil 4.8 : Zımparalanmış geotekstil numunelerin parlatılması (kaba parlatma ve ince parlatma). **127**
Şekil 4.9 : Uzun süreli filtrasyon deneyi öncesi numune doygunluk işlemi. **129**
Şekil 4.10 : Doygunluğu sağlanmış uzun süreli filtrasyon deneyi numunesi. **130**
Şekil 4.11 : Farklı seviyelerdeki manometre portlarına ait su basınçları. **131**
Şekil 4.12 : Farklı hidrolik eğimlerin uzun süreli filtrasyon deney sisteminde uygulanması. **133**
Şekil 4.13 : Uzun süreli filtrasyon deneyi sonrası 5 tabakaya ayrılmış geomalzeme ve geotekstil. **135**
Şekil 4.14 : Geri kazanılmış asfalt (RAP) numunesinin uzun süreli filtrasyon deneyi esnasında tesisatta ve su çıkış haznesinde gözlemlenen değişimler. .. **136**
Şekil 4.15 : Uzun süreli filtrasyon deneyine tabi tutulan Geri kazanılmış asfalt-geotekstil drenaj sistemindeki geotekstil numunenin deney sonrasındaki görünümü. **137**
Şekil 4.16 : Uzun süreli filtrasyon deneyi sonrası sistemin temizlenmesi ve tekrardan montajı. **137**
Şekil 4.17 : Geri kazanılmış beton-geotekstil sistemi uzun süreli filtrasyon deneyi. **138**
Şekil 4.18 : Çelik cürufu – geotekstil sistemi uzun süreli filtrasyon deneyi. **140**
Şekil 4.19 : Çelik cürufu geomalzemesinin uzun süreli filtrasyon deneyi esnasında, deney sisteminin tesisatında biriken kireç. **140**
Şekil 4.20 : Çelik cürufu-geotekstil drenaj sistemin de uzun süreli filtrasyon deneylerinde kullanılan geotekstil malzemenin deney sonrasındaki görünümü. **141**

Şekil 4.21 : Doğal agrega-geotekstil drenaj sisteminin uzun süreli filtrasyon deneyi aşamaları. **142**
Şekil 4.22 : Uzun süreli filtrasyon deneyi sonrası oda ısısında kurutulmuş geotekstil numuneler. 143
Şekil 5.1 : RAP malzemesi için GR ve KR parametrelerinin zamana bağlı değişim grafikleri. **148**
Şekil 5.2 : RAP malzemesi LFT deney verileri ile elde edilen GR1, GR2, GR3 ve GR4 değerlerinin hidrolik eğim ile değişimi. **149**
Şekil 5.3 : RAP malzemesinin LFT deney verileri ile elde edilen KR değerlerinin hidrolik eğim ile değişimi. **150**
Şekil 5. 4 : RAP malzemesi LFT deney verileri ile elde edilen KR ve GR değerlerinin değişimi. **151**
Şekil 5.5 : RAP malzemesinin uzun süreli filtrasyon deneyi sonrası dane çapı dağılımı. **151**
Şekil 5.6 : RCA malzemesi için GR ve KR'nin zamana bağlı değişim grafikleri... **152**
Şekil 5.7 : RCA malzemesi LFT deney verileri ile elde edilen GR1, GR2, GR3 ve GR4 değerlerinin hidrolik eğim ile değişimi. **154**
Şekil 5.8 : RCA malzemesi LFT deney verileri ile elde edilen KR değerlerinin hidrolik eğim ile değişimi. **155**
Şekil 5.9 : RCA malzemesi LFT deney verileri ile elde edilen KR ve GR değerlerinin değişimi. **155**
Şekil 5.10 : RCA malzemesinin uzun süreli filtrasyon deneyi sonrası dane çapı dağılımı. **156**
Şekil 5.11 : SS1 malzemesi için GR ve KR' nin zamana bağlı değişim grafikleri. **157**
Şekil 5.12 : SS2 malzemesi için GR ve KR'nin zamana bağlı değişim grafikleri. . **158**
Şekil 5.13 : SS malzemeleri LFT deney verileri ile elde edilen GR1, GR2, GR3 ve GR4 değerlerinin hidrolik eğim ile değişimi. **160**
Şekil 5.14 : SS malzemeleri LFT deney verileri ile elde edilen KR değerlerinin hidrolik eğim ile değişimi. **160**
Şekil 5.15 : SS malzemelerinin LFT deney verileri ile elde edilen KR ve GR değerlerinin değişimi. **161**
Şekil 5.16 : (a) SS1 malzemesinin uzun süreli filtrasyon deneyi sonrası dane çapı dağılımı.(b) SS2 malzemesinin uzun süreli filtrasyon deneyi sonrası dane çapı dağılımı. **162**
Şekil 5.17 : NA1 numunesi için GR ve KR'nin zamana bağlı değişim grafikleri... **163**
Şekil 5.18 : NA2 numunesi için GR ve KR'nin zamana bağlı değişim grafikleri... **164**
Şekil 5.19 : NA numunelerinin LFT deney verileri ile elde edilen GR1, GR2, GR3 ve GR4 değerlerinin hidrolik eğim ile değişimi. **166**
Şekil 5.20 : NA numunelerinin LFT deney verileri ile elde edilen KR değerlerinin hidrolik eğim ile değişimi. **167**
Şekil 5.21 : NA numunelerinin LFT deney verileri ile elde edilen KR ve GR değerlerinin değişimi. **167**
Şekil 5.22 : (a) NA1 numunesinin uzun süreli filtrasyon deneyi sonrası dane çapı dağılımı. **(b)** NA2 numunesinin uzun süreli filtrasyon deneyi sonrası dane çapı dağılımı. **168**
Şekil 5.23 : Farklı agregalar için hidrolik eğim oranının (GR4) hidrolik eğim ile değişim grafiği. **169**
Şekil 5.24 : Farklı agregalar için geçirimlilik oranının (KR) hidrolik eğim ile değişim grafiği. **170**

Şekil 5. 25: Uzun süreli filtrasyon deneyi öncesi, deneysel çalışmalarda kullanılan geotekstil malzemenin mikrofotoğrafı. **171**
Şekil 5.26: RAP-geotekstil drenaj sistemindeki geotekstil numunenin LFT sonrası orta ve kenar bölgelerinin mikrofotoğrafları. **172**
Şekil 5.27: RCA-geotekstil drenaj sistemindeki geotekstil numunenin LFT sonrası orta ve kenar bölgelerinin mikrofotoğrafları. **173**
Şekil 5.28: SS1-geotekstil drenaj sistemindeki geotekstil numunenin LFT sonrası orta ve kenar bölgelerinin mikrofotoğrafları. **174**
Şekil 5.29: SS2-geotekstil drenaj sistemindeki geotekstil numunenin LFT sonrası orta ve kenar bölgelerinin mikrofotoğrafları. **175**
Şekil 5.30: NA1-geotekstil drenaj sistemindeki geotekstil numunenin LFT sonrası orta ve kenar bölgelerinin mikrofotoğrafları. **176**
Şekil 5.31: NA2-geotekstil drenaj sistemindeki geotekstil numunenin LFT sonrası orta ve kenar bölgelerinin mikrofotoğrafları. **177**

ATIK MALZEMELERİN DRENAJ SİSTEMLERİNDE KULLANIM UYGUNLUĞUNUN DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ

ÖZET

Nüfus artışı ve teknolojinin hızlı gelişimi nedeni ile dünyadaki doğal kaynakların tüketimi her geçen gün artmakta ve bu hızlı tüketime bağlı olarak sınırlı olan doğal kaynaklar azalmaktadır. Doğal kaynakların hızla tüketilmesi, çevrenin tehlikeli bir biçimde bozulmasına neden olmaktadır. Bu tahribatın etkilerini azaltmak ve ortadan kaldırmak amacıyla, farklı endüstri kollarında, malzemelerin üretimi sırasında elde edilen yan ürün veya atıkların, inşaat mühendisliği uygulamalarında kullanılması ile ilgili çeşitli çalışmalar yapılmaktadır. Atık malzemeleri yeniden değerlendirerek kullanmak hem çevrede oluşacak problemleri en aza indirmekte, hem de bu atıkların tekrardan kullanılması ile sürdürülebilir yönetim sistemine katkıda bulunulmaktadır. Ayrıca, bu atık malzemelerin, sürdürülebilir ilkeler çerçevesinde tekrardan kullanılması ile ülke ekonomisi için de birçok fayda sağlamaktadır.

Geçmişten günümüze inşaat sektöründe, inşaat/yıkım (C&D) ve demir çelik sektörü atık malzemelerin kullanımı ile ilgili çalışmalar devam etmektedir. Halihazırda, atık malzemelerin çimento ve beton üretiminde, yapı malzemelerinin yapımında, baraj, otoyol ve nükleer santrallerin inşasında, zemin iyileştirilmesi gibi geoteknik mühendisliği uygulamalarında kullanımına yönelik araştırmalar yapılmaktadır. Son yıllarda ise, endüstriyel atıkların yol inşasında değerlendirilmesi için yapılan çalışmalar yaygınlaşmış, araştırma sonuçları yol yapımında kullanılan bazı atık malzemeler ile yolların bazı özelliklerinin iyileştirilmesinin mümkün olduğunu göstermiştir. Yolların servis ömrü boyunca etkin bir şekilde kullanılabilmesi için yer altı ve yer üstü sularının yol gövdesine zarar vermeden uzaklaştırılmasını sağlayan drenaj sistemlerinin düzgün çalışması önemlidir. Yol yapımında karşılaşılan stabilite, deformasyon ve taşıma gücü problemleri çoğunlukla yetersiz drenaj çalışmalarından kaynaklanmaktadır.

Bu çalışmada, başta yol altı drenaj sistemleri olmak üzere yapılması planlanan tüm yer altı drenaj sistemlerinin teşkilinde kullanılabilinecek, atık agregaların filtrasyon performansı incelenmiştir. Deneylerde, inşaat/yıkım (C&D) atıklarından asfalt atık malzemesi (RAP), geri kazanılmış beton malzemesi (RCA), demir-çelik sektörü atık malzemesi olan çelik cürufu (SS) ve doğal agregalar (NA) kullanılmıştır. Çalışmada farklı fiziksel ve kimyasal özelliklere sahip atık malzemeler ile birlikte, örgüsüz geotekstil malzeme kullanılarak oluşturulan drenaj sisteminin uzun süreli filtrasyon davranışı incelenmiştir. Farklı agrega türü ve örgüsüz geotekstilden oluşan drenaj sisteminin zamana bağlı filtrasyon davranışının belirlenmesi için ASTM D5101 standartında tanımlanan uzun süreli filtrasyon deney sistemi, geliştirilerek imalatı yaptırılmıştır. İmalatı yaptırılmış olan, geliştirilmiş uzun süreli filtrasyon deneyi düzeneğinde agrega-geotekstil sistemlerinin uzun süreli filtrasyon deneyleri (LFT) yapılmıştır. Uzun süreli filtrasyon deneyleri ile atık malzeme–geotekstil sisteminde oluşabilecek potansiyel tıkanma mekanizmaları, zaman ve akış yönüne bağlı olarak

malzeme dane çapı dağılımındaki değişimler belirlenmiştir. Deneylerde kullanılmış olan geotekstilin filtreleme ve tıkanma performansını belirlemek için optik görüntülemede yapılmıştır.

Ayrıca bu tez çalışmasında, uzun süreli filtrasyon deneyleri ile özellikle yol altı drenaj sistemlerinin teşkilinde kullanılacak olan doğal filtre malzemeleri yerine geri kazanılmış asfalt, geri kazanılmış beton ve çelik cürufu gibi farklı atık malzemenin kullanılabilirliğini belirlemek amaçlanmıştır. Yer altı drenaj sistemlerinde atık malzemelerinin kullanılabilineceğinin deneysel olarak tespiti ile geoteknik mühendisliği proje ve uygulamalarında, düşük maliyetli, sürdürülebilirliği destekleyen projelerin üretilmesine, katkı sağlamak amaçlanmıştır.

Değişik hidrolik eğimler altında gerçekleştirilen uzun süreli filtrasyon deneylerinde agrega-geotekstil sisteminin tıkanma performansını tanımlayacak olan hidrolik eğim oranı (GR) ve geçirimlilik oranı (KR) değerleri belirlenmiştir. Tez çalışmasında, atık malzemelerin filtrasyon performansının karşılaştırılması amacı ile iki farklı tesisten elde edilmiş doğal agrega da (NA) kullanılmıştır. Geotekstil olarak tıkanma açısından en olumsuz durumu sağlayacak gözenek açıklığına sahip olan bir örgüsüz geotekstil tercih edilmiştir.

Geliştirilerek imalatı yaptırılmış olan uzun süreli filtrasyon deney sistemi kullanılarak yapılan deneyler sonucunda, geri kazanılmış asfalt malzemenin performansının doğal agrega sonuçları ile yeterli seviyede karşılaştırılabilir olduğu anlaşılmıştır. Buna ek olarak, içeriğindeki bitüm malzeme oranı kontrol edildiği takdirde filtrasyon özellikleri bakımından yol altı drenaj sistemlerinde agrega olarak kullanılabilineceği düşünülmektedir. Ayrıca, geri kazanılmış beton malzemenin performansının doğal agrega malzemenin performansına daha benzer olduğu anlaşılmıştır. Geliştirilmiş uzun süreli fitrasyon deney sistemi kullanılarak yapılan deneyler sonucunda, çelik cürufu malzemenin performansının, doğal agrega malzemenin performansı ile kıyaslandığında tıkanma açısından geri kazanılmış asfalt malzemeden daha iyi, geri kazanılmış betondan daha kötü performans sergilediği anlaşılmıştır. Geotekstil malzeme üzerinde yapılan optik görüntülemede de tıkanık bölgeler ve tıkanma derecesi mikrofotoğraflar ile belirlenmiştir.

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF WASTE MATERIALS SUSTAINABILITY FOR USE IN DRAINAGE SYSTEMS

SUMMARY

Due to the population growth and the rapid development of technology, the consumption of natural resources in the world is increasing day by day therefore the limited natural resources are decreasing due to this rapid consumption. Rapid consumption of natural resources causes dangerous deterioration of the environment. In order to reduce and eliminate the effects of this destruction, various studies are carried out on the use of by-products or wastes obtained during the production of materials in different industries in civil engineering applications. Reusing waste materials both minimizes the problems in the environment and contributes to the sustainable management system by reusing these wastes. In addition, the reuse of these waste materials within the framework of sustainable principles provides many benefits for the country's economy.

From past to present, studies on construction / demolition (C&D) and the use of waste materials in the iron and steel industry are continuing. Up to the present reseaches were carried out, researches are carried out on the use of waste materials in the production of cement and concrete, construction materials, construction of dams, highways and nuclear power plants, and geotechnical engineering applications such as soil improvement. In recent years, studies for the utilization of industrial wastes in road construction have become widespread, and the results of the research have shown that it is possible to improve some properties of the roads with some waste materials used in road construction. Proper functioning of the drainage systems that ensure the removal of underground and surface waters without damaging the road structure is important in order to use the roads effectively throughout their service life. Stability, deformation and bearing capacity problems encountered in road construction mostly result from insufficient drainage works.

In this study, the filtration performance of waste aggregates that can be used in the construction of subroad drainage systems has been investigated. In the laboratory tests, recycled asphalt pavement (RAP), recycled concrete material (RCA), steel slag (SS) and natural aggregates (NA) were used. In the study, the long-term filtration behavior of the drainage system established using nonwoven geotextile material together with waste materials with different physical and chemical properties was investigated. The long term filtration test system defined in ASTM D5101 standard has been developed and manufactured in order to determine the time-dependent filtration behavior of the drainage system consisting of different aggregate types and non-woven geotextiles. In the ASTM D5101, it is stated that cylindrical samples with 100 or 150 mm diameter should be used according to the largest aggregate diameter to be used in the experiment. In previous studies, cylindrical samples with a diameter of 100 mm were used and manometer ports were placed at 25 mm and 75 mm heights from the sample base in order to take measurements in the experimental system. It was planned to use

150 mm diameter and 150 mm high cylindrical samples in the developed long-term filtration test system to be used in this study, and the production of permeameter chambers was made in these sizes. In addition, the number of manometers in the standard long-term permeability test system has been increased. In the developed test system, the manometers are planned to be placed at 25-75-125 mm heights from the geotextile base and the production has been done accordingly. Experimental work produced in Turkey drainage system to be used in the design and application of different physical and chemical properties of recycled asphalt, recycled concrete, industrial waste materials such as two different electric arc furnace (EAO) obtained from plant steel slag is used. The long term filtration performance of these materials has been compared with the performance of natural aggregate materials.

Long-term filtration tests (LFT) of aggregate-geotextile systems have been performed in the manufactured and developed long term filtration test setup. Potential clogging mechanisms that may occur in the waste material-geotextile system, changes in the material grain diameter distribution depending on the time and flow direction were determined by long term filtration experiments. With the experimental determination of the usability of waste materials in under road drainage systems in terms of long ter performance, it is aimed to contribute to the production of low-cost, sustainability-supporting projects in geotechnical engineering projects and applications.

Optical imaging was used to determine the filtering and clogging performance of the geotextile used in the experiments. In this study, it was aimed to determine the usability of different waste materials such as recycled asphalt, recycled concrete and steel slag instead of natural filter materials to be used especially in the formation of under-road drainage systems with long term filtration experiments. Within the scope of the test program, a thin section sample was prepared in order to observe the change in the porous structure of the geotextile after the long-term filtration test sample and the long-term filtration test to determine the physical clogging. In long-term filtration experiments to determine the hydraulic gradient ratios (GR) and permeability rates (KR) defined as clogging indexes or filtration parameters, which will define the behavior of different aggregate types in drainage systems consisting of aggregate and geotextile in the laboratory. The long term filtration tests were performed on the samples compacted with standart proctor energy at optimum moisture content of materials.

The hydraulic gradient ratio (GR) and permeability ratio (KR) values, which will define the clogging performance of the aggregate-geotextile system, were determined in the long-term filtration experiments carried out under different hydraulic gradients. In the thesis study, natural aggregates (NA) obtained from two different quary were also used in order to compare the filtration performance of waste materials. As a geotextile, a non-woven geotextile with a pore opening that will provide the most unfavorable situation in terms of clogging is preferred.

The hydraulic gradient values used in previous studies usually ranging between 1 and 8. This study, in contrast to possible drainage structure in the embodiment matches, more lifelike hydraulic gradients are preferred. In the construction conditions section of the Highways Technical Specification, the filling base floor in highways; it is stated that it should be prepared at a minimum of 3% roof slope to allow transverse water discharge after the vegetal floor scraping is done. In this context, the hydraulic gradient values i = 0.33, 0.66, 1 and 2.5 and chosen as more realistic results than the former studies were obtained from a practical viewpoint.

The main purpose of the study is; performing performance reviews for the use of industrial waste materials in drainage systems, and to determine the usability of the clogging performance of these waste materials by comparing with the natural aggregate currently used in drainage systems. In order to evaluate the filtration performance of the drainage systems that will be formed from industrial waste materials, it is necessary to investigate the long-term clogging behavior of the drainage system. For this reason, long-term filtration experiments were carried out in the developed ASTM D5101 test system, which was developed, redesigned and produced on a drainage system consisting of different industrial waste materials and geotextiles in the laboratory. In the same experimental system, long-term filtration experiments were carried out on natural aggregates with the same grain diameter distribution as industrial waste materials in order to make a performance comparison.

As a result of the experiments conducted using the developed and manufactured long-term filtration test system, it was understood that the performance of the recycled asphalt material was comparable to the natural aggregate results at a sufficient level. In addition, it is thought that if the content of bitumen material is controlled, it can be used as aggregate in under-road drainage systems in terms of filtration properties. In addition, it has been found that the performance of recycled concrete material is more similar to that of natural aggregate material. As a result of the experiments conducted using the improved ASTM D5101 test system, it was understood that the performance of the steel slag material was better than recycled asphalt material in terms of clogging and worse than recycled concrete when compared to the performance of natural aggregate material. In the optical imaging performed on the geotextile material, the occluded areas and the degree of obstruction were determined by microphotographs.

It is thought that the test system, which was developed and manufactured to determine the filtration behavior of different aggregate and getotextile drainage systems in the laboratory, provides more realistic results than the standard long-term filtration test system. The reasons for taking more accurate and realistic measurements are that the sample size used in the experimental study is increased, the manometers placed at 25-75-125 mm heights of the chamber in order to take more accurate measurements and the test period is much longer than the test period specified in the standard.

Within the scope of the study, it is not necessary to directly use the filtration parameters and filtration behavior of the aggregates used on the basis of the test results on a limited number of samples as a filtration parameter of any material. The values obtained for the materials used in this study can only be evaluated to estimate the filtration behavior of similar materials and to make a prediction. It should be noted that the data obtained in this study are specific to the materials used. Within the scope of the study, it is not necessary to directly use the filtration parameters and filtration behavior of the aggregates used on the basis of the test results on a limited number of samples as a filtration parameter of any material.

1. GİRİŞ

Doğal kaynakların hızla tüketilmesine ve teknolojik gelişmelere bağlı olarak, inşaat/yıkım (C&D) atıklarının, demir çelik sektöründe üretim sırasında elde edilen yan ürün veya atıkların miktarı yıllık olarak milyon tonlarla ifade edilen miktara ulaşmaktadır (Buzkan ve Erman, 2020; Gonzalez ve Chini, 2020; Lantieri ve diğ., 2018; T.C. Çevre Ve Şehircilik Bakanlığı, 2004a; U.S. Environmental Protection Agency, 2020). Bu nedenle doğal çevre tehlikeli bir biçimde bozulmakta, miktarı her geçen gün artan atıklara depolama alanları açılmasında sıkıntılar yaşanmaktadır. Tekrardan kullanılabilme potansiyeline sahip atıkları, doğru uygulamalara yönlendirerek atık olmaktan çıkarıp ürün olarak değerlendirmek bu tahribatın etkilerini azaltmak ve depolama sorununu ortadan kaldırmak, sürdürülebilirliği desteklemek için çok önemlidir. Dünyada ve ülkemizde çok önemli yeri olan inşaat/yıkım atıklarının, demir çelik sektörü atık malzemelerinin değerlendirilmesi, hammadde olarak yeniden kullanılması ve tekrar ekonomiye kazandırılması günümüzde ihtiyaç değil zorunluluk haline gelmiştir. Son zamanlarda gerek gelişmiş ülkelerde gerekse gelişmekte olan ülkelerde, inşaat/yıkım ve çelik cürufu atıkların değerlendirilmesi ile ilgili çeşitli çalışmalar yapılmakta, atık yönetimi konusunda farklı düzenlemeler ve uygulamalar yürürlüğe girmektedir (EPA, 2010; Kabirifar ve diğ., 2020; Kay ve diğ., 2018; T.C. Çevre Ve Şehircilik Bakanlığı, 2004b; Tavakoli Mehrjardi ve diğ., 2020).

Türkiye'deki atık yönetimi ile ilgili yasal mevzuatlar, AB Direktifleri ile paralel olarak düzenlenmiştir (Coşkun ve Öztürk, 2012; T.C. Çevre Ve Şehircilik Bakanlığı, 1991, 2004b, 2020a). Ülkemiz'de 12 Temmuz 2019 tarihinde sıfır atık yönetmeliği yürürlüğe girmiştir. Bu tarihten itibaren, sıfır atık yönetimi anlayışı ile atıkların sürdürülebilir ve entegre yönetimi ile ilgili çalışmalar yapılmaya başlanmıştır. Çalışma yapılan sektörlerden biri olan inşaat projelerinde sürdürülebilirliğin desteklenmesi için, C&D atıklarının sürdürülebilir kalkınma ilkeleri çerçevesinde, insan sağlığını ve çevre kirliliğini önleyici tedbirlerin alınması için Hafriyat Toprağı, İnşaat ve Yıkıntı Atıklarının Kontrolü gibi atık yönetim planlarının uygulanması ile geri kazanımı yasal

düzenlemeler ile teşvik edici ve zorunlu hale getirilmiştir. Başta bu düzenlemeler ve teşvik edici uygulamalar nedeni ile, sıfır atık ve sürdürülebilir altyapıyı tamamlamak için mühendislik projelendirme ve uygulama aşamasında malzeme teminine farklı bir şekilde yaklaşmak gerekmektedir. Ülkemizde atık malzemelerin yapay agrega olarak kullanılması "İnşaat Mühendisliği İşleri ve Yol Yapımında Kullanılan Bağlayıcısız ve Hidrolik Bağlayıcılı Malzemeler İçin Yapay Agregalar" standardına uygunluk ile mümkündür (TSE, 2017).

Birleşmiş Milletler Çevre Programı, inşaat sektöründen kaynaklanan emisyonların 2019 yılında şimdiye kadarki en yüksek seviyeye ulaştığını bildirmiştir. İnşaat sektörüne atfedilen CO_2 emisyonları ve tüketilen doğal kaynakların büyüklüğü, küresel düzeyde önemli çevresel endişelerdir (Husain & Prakash, 2019; Sandanayake et al., 2019). İnşaat sektöründeki artan emisyonları azaltmak için özellikle kullanılan malzemelere yönelik stratejileri değiştirmek gerekmektedir. Dolgu, baraj, yol yapımı, istinat yapıları gibi birçok geoteknik faaliyetinde çok fazla doğal agrega kullanılmaktadır ve yapım prosesleri yüksek CO_2 emisyonları oluşturmaktadır (Thives & Ghisi, 2017). Son yıllarda, çevreyi ve iklimi olumsuz etkileyen inşaat sektöründeki bu durumu iyileştirmek için geleneksel uygulamaların kesinlikle değiştirilmesi gerektiği bildirilmektedir (Bostanci ve diğ., 2018). Bu nedenle, sürdürülebilir inşaat modellerini teşvik eden çeşitli yeni araştırma alanlarının oluşturulması ve geliştirilmesi gerekmektedir. Yeni araştırmalar, yeni üretim teknolojileri ve malzemeleri arayışına odaklanmıştır (Ioannidou ve diğ., 2017; Maddalena ve diğ., 2018). Özellikle doğal kaynakların tüketiminin çok olduğu geoteknik uygulamalarında doğal malzemeler yerine kullanılabilinecek alternatif malzemlerin bulunması çok önemlidir (Braga ve diğ., 2017; Jullien ve diğ., 2012). Bu nedenle doğal agregalar yerine farklı atıkların kullanımının araştırılması gerekmektedir.

Günümüzde, inşaat mühendisliği uygulamalarındaki projelerin ne kadar sürdürülebilir olduğunu ölçerek, projelerin sürdürülebilirliğini iyileştirmek, çevreye duyarlı karar alma süreçlerini teşvik etmek için farklı metodlar ve derecelendirme sistemleri benimsenmiştir (Chang vd, 2019; Sochanik, 2020). Derecelendirme sistemleri, "yeşil" inşaat için zorunlu gereksinimleri temel almaktadır. İnşaat mühendisliği projeleri derecelendirme sistemleri ve sonuçları incelendiğinde, geoteknik projelerinde ve uygulamalarında sürdürülebilirliğin, genel derecelendirmeye çok az katkısı olduğunu veya hiç olmadığı görülmektedir (Raymond ve diğ., 2020; Sochanik, 2020).

Sürdürebilir projeler ve uygulamalarda en önemli konulardan biri malzeme seçimidir. İnşaat mühendisliği uygulamalarında, doğal malzeme yerine tekrar kullanılabilme potansiyeline sahip atık malzemelerin kullanımı ile "sürdürülebilirlik" ilkesinin uygulamaya aktarılmasına geoteknik mühendisliği açısından büyük katkı sağlanmış olunacaktır (Raza ve diğ., 2021).

Atık asfalt, atık beton ve çelik cürufu gibi malzemelerin inşaat mühendisliği uygulamalarında kullanımı sağlamak için, fiziksel ve kimyasal özelliklerinin doğru şekilde tayin edilip tanımlanarak uygun projelere yönlendirilmesinin sağlanması gerekmektedir. Geoteknik mühendisliği uygulamalarında doğal agrega yerine, inşaat/yıkım veya çelik cürufu malzemelerinin agrega olarak kullanılması ile sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşılmasına çok fazla katkıda bulunulmuş olunacaktır. Ağırlıklı olarak agrega içeren atık asfalt, atık beton gibi inşaat ve yıkıntı (C&D) atıklarının ve çelik cürufunun ihtiva ettikleri çevreye zararlı metallerin ve kimyasalların miktarı kontrol altında tutulmak şartıyla doğal agrega yerine kullanılabileceği birçok araştırmada belirtilmiştir (Bestgen ve diğ., 2016; Sanger ve diğ., 2020; Soleimanbeigi ve Edil, 2015).

İnşaat ve yıkıntı (C&D) atık malzemeleri olarak tanımlanan atık asfalt ve atık beton malzemenin geri kazanılabilir olması hem işletmeler hem de sürdürülebilir çevre açısından oldukça önemlidir. %96 oranında agrega içeren asfalt atık malzeme yol, havaalanı pisti ve benzeri yapıların tamiratı, tadilatı, yenilenmesi ve yıkımı sırasında ortaya çıkmakta ve bünyesinde asfalt, zift, doğal polimer ve benzeri malzeme bulundurmaktadır. Çevre Koruma Ajansı (EPA) ve ABD Federal Karayolu İdaresi (Federal Highway Administration), Amerika'nın bir numaralı geri dönüştürülmüş malzemesi olarak geri kazanılmış asfaltı (RAP) rapor olarak sunmuşlardır (The U.S. EPA Municipal and Industrial Solid Waste Division Office of Solid Waste, 1998). Günümüzde de geri kazanılmış asfalt dünya'daki ve ülkemiz'deki diğer C&D atık ürünleri arasında en fazla oranda geri kazanılmaya ve yeniden kullanılmaya devam etmektedir. Geri kazanılmış beton malzeme; kullanım ömrünü tamamlamış yapılardan, doğal afet ve yangın sonucu oluşan yıkıntılardan, ulaşım sistemi ile ilgili çalışmalardan, kalite kontrol numunelerinden ve prefabrik üretim atıklarından elde edilmektedir. Beton bileşiminin de hacimsel olarak %65-75'inin agrega olduğu ve kaliteli agrega kaynaklarının tükenmekte olduğu düşünüldüğünde, geri kazanılmış betonun, agrega olarak tekrar kullanımı çevresel ve ekonomik yönden önemlidir.

Demir-çelik üretimi sonucu ortaya çıkan çelik cürufları inşaat sektöründe ürün olarak kullanıma uygun, geri kazandırılabilir katı atık malzeme türüdür. Çelik cürufları doğal agregalar gibi granüler yapıya ve yüksek dayanıma sahiptir. Demiryolu ve karayollarında dolgu malzemesi olarak, zemin iyileştirmesinde, çimento üretiminde, beton üretiminde ve düşük mukavemetli kilit taşı üretiminde kullanılabilmektedir. En çok kullanım alanı bulduğu ve üzerinde çalışmaların çoğunlukla yapıldığı alan ise yol inşasıdır ve bu alanda birçok bilimsel araştırma yapılmıştır (Dayioglu ve diğ., 2018; Mahedi ve diğ., 2020; Netinger Grubeša ve Barišić, 2016).

İnşaat mühendisliğinin bir dalı olan geoteknik mühendisliği uygulamalarında doğal agrega yerine geri kazanılmış asfalt, geri kazanılmış beton, çelik cürufu gibi atık malzemenin kullanımı, kullanılan malzeme sarfiyatının büyük hacimlerde olması sebebiyle özel öneme sahiptir. Geoteknik mühendisliği uygulamalarından biri olan yer altı drenaj sistemlerinin inşasında, atık malzemeleri yeniden değerlendirerek kullanmak hem çevrede oluşacak problemleri en aza indirmekte, hem de bu atıklar kullanılarak yapıların bazı özellikleri iyileştirilmekte, ülke ekonomisi için de birçok fayda sağlamaktadır. Son yıllarda, endüstriyel atıkların karayolu tabakalarında değerlendirilmesi için yapılan çalışmalar yaygınlaşmıştır. Özellikle endüstriyel atıkların drenaj sistemlerinde kullanılması birçok araştırma projesine konu olmuştur (A. Abbaspour ve diğ., 2018; Bilgen ve diğ., 2020; Mijic ve diğ., 2020).

Yol üst yapısı ve yol tabanına çeşitli yollarla giren suyun tahliye edilmesi için inşa edilen yol altı drenaj sisteminin performansı kullanılan agreganın dane çapına ve permeabilite özelliğine bağlı olarak değişmektedir. Bu sistemin zamana bağlı filtrasyon davranışı servis ömrü boyunca karayollarının işlevlerini tam olarak yerine getirebilmeleri için kritik bir öneme sahiptir. Drenaj sisteminde oluşacak problemler tüm karayolu ulaşım sistemini etkileyerek, yapının zarar görmesine neden olmaktadır. Drenaj sistemi tasarımında öncelikle fonksiyonellik ve maliyet göz önünde bulundurularak tasarım yapılması gerekmektedir. Büyük miktarda agrega kullanılan drenaj sistemlerinde doğal agrega yerine atık malzemelerinin kullanılması, günümüzün en önemli problemlerinden biri olan çevre kirliliği, atık depolama sahası temini gibi problemlerin çözümüne katkıda bulunarak, doğal kaynakların korunmasına imkân sağlamakta sürdürülebilirliği geoteknik mühendisliği açısından ciddi oranda desteklemektedir. Bu nedenle geri kazanılmış asfalt, geri kazanılmış beton ve çelik

cürufu gibi atık malzemeler, ekonomik tasarruflar ve çevresel faydalar nedeniyle giderek daha fazla kullanılan geri kazanılmış agregalardır. Drenaj sistemlerinde kullanılacak agregaların ve geotekstilin, su hareketinden dolayı oluşacak dane göçünün drenaj yapılarına hasar vermemesi için, hidrolik özelliklerinin doğru bir şekilde belirlenip, drenaj sisteminin tasarımının buna uygun şekilde yapılması gerekmektedir (Behnoud Kermani ve diğ., 2018; T.C. Karayolları Genel Müdürlüğü, 2013).

Yol altı drenaj sistemi yapı elemanlarından biri olan geotekstillerin inşaat mühendisliği uygulamalarında kullanımı uzun yıllardır birçok araştırmacı tarafından incelenmektedir (Ahmet H. Aydilek ve diğ., 2005; Bhatia ve Suits, 1996; Dolez ve Blond, 2017; G. R. Fischer ve diğ., 1990). Yol altı drenaj sistemi tasarımında kullanılacak geotekstilin seçiminde, geotekstilin geçirgenlik ve filtrasyon özellikleri dikkate alınmaktadır. Örgüsüz geotekstillerin agrega-geotekstil sistemindeki davranışını ve uyumunu değerlendirmek için ASTM D5101 de belirtilen uzun süreli filtrasyon deneyleri yapılmaktadır. Özellikle ince agrega göçünün önlenmesi için uygun geotekstil seçimi çok önemlidir. Geotekstillerin drenaj sistemlerinin tasarımında kullanımı, granül filtrelerden çok daha ince olmaları ve suyun geçişini sağlarken malzeme geçişini engellemeleri bakımından daha çok tercih edilmektedir. Zamana ve akışa bağlı olarak ince agrega daneleri suyun akış yönünde geotekstile doğru hareket ederek zamanla geotekstilin hemen üstünde yoğunluğunun artmasına neden olmaktadır. Bu normal davranış biçiminden sonra ince agrega daneleri geotekstili de geçerek sistemin geçirgenliğinin artmasına hatta borulanmanın gerçekleşmesine neden olabilirler (Bhatia ve Suits, 1996). ASTM D5101' de tanımlanan ve tıkanma endeksleri olarak bilinen hidrolik eğim oranı (GR) ve geçirimlilik oranı (KR), tıkanma performansının birincil göstergeleridir. ASTM D5101, agrega-geoteksilden oluşan bir sistemin tıkanma sınırını GR= 1 olarak verirken, ABD Ordu Mühendisleri Birliği (U.S. Army Corps of Engineers Association) GR değerlerini 3' e kadar kabul edilebilir olarak vermektedir (A. H. Aydilek ve Edil, 2002). Önceki araştırmalarda, ASTM D5101' de verilen 24 saatlik zaman periyodunun, stabilize bir hidrolik eğim oranı elde etmek için yeterli olmadığı ve deney süresinin standartta belirtilen prosedürden daha uzun tutulması önerilmiştir. İnce dane miktarı fazla olan agrega-geotekstil sisteminde tıkanma derecesini değerlendirmek için hidrolik eğim oranının, deney sistemindeki nispeten küçük bir

agrega-geotekstil temas bölgesinin analizinden dolayı temsili olmadığını ve tıkanma performansını değerlendirmek için alternatif oranların kullanımını tavsiye edilmektedir. Bu öneri özellikle çamur, balçık agregalar için nispeten doğrudur (A. H. Aydilek ve Edil, 2002).

Bu çalışmada ise, geoteknik mühendisliği uygulamalarında sürdürülebilirliği desteklemek için, farklı fiziksel ve kimyasal özelliklere sahip endüstriyel atık malzemelerin yol altı drenaj tabakalarında kullanılabilirliği deneysel olarak araştırılmıştır. Geri kazanılmış asfalt (RAP), geri kazanılmış beton (RCA), çelik cürufu (SS) ve doğal agrega (NA) malzemelerin filtrasyon performansları, geliştirilerek yeniden tasarlanan ve imalatı yaptırılan uzun süreli filtrasyon deney sisteminde filtrasyon deneyleri yapılarak değerlendirilmiştir.

Çalışmada ana amaçlar, ASTM D5101 standartında belirtilen deney sistemini geliştirerek imalatını yaptırmak, laboratuvarımızda modern standartlarda çalışabilen geliştirilmiş uzun süreli filtrasyon deney sistemi düzeneğini kurabilmek, ülkemizden büyük miktarlarda var olan depolama ve yönetme süreçi zor olan atık türlerinin yol altı drenaj sistemlerinde kullanılabilmesini araştırırarak, geri kazanılmış asfalt, geri kazanılmış beton ve çelik cürufu malzemelerinin yol altı drenaj sistemlerinde kullanılabilirliği hakkında literatürde sınırlı bilgilerin bulunduğu konulara elden geldiğince katkı yapmak sayılabilir. Ayrıca bu çalışmada, yer altı drenaj sistemlerinde, geri kazanılmış asfalt, geri kazanılmış beton ve çelik cürufu agregalarının kullanılmasını sağlayarak, kolay ve düşük maliyetli projelerin üretilmesine, geotekstil mühendisliği uygulamalarında sürdürülebilirliğe katkıda bulunulması amaçlanmıştır.

1.1 Amaç

Bu çalışma, farklı fiziksel ve kimyasal özelliklere sahip endüstriyel atık malzemelerin uzun süreli filtrasyon deneyleri ile filtrasyon performanslarını belirlemek, belirlenen tıkanma endekslerini kullanarak, ülkemizde büyük miktarlarda var olan, depolama ve yönetme süreçi zor olan geri kazanılmış asfalt, geri kazanılmış beton ve çelik cürufu atıklarının yol altı drenaj sistemlerinde kullanılabilirliğini değerlendirmek, yol altı drenaj sistemlerinde kullanılabilirliği hakkında literatürde sınırlı bilgilerin bulunduğu konulara katkı yapmak amaçlanmıştır. Ayrıca tez çalışmasında, yolaltı drenaj sistemlerinde, atık asfalt, atık beton ve çelik cürufu agregalarının kullanılmasını

sağlayarak geotekstil mühendisliği uygulamalarında sürdürülebilirliğe katkıda bulunulması amaçlanmıştır.

Çalışma kapsamında, atık agregaların uzun süreli fitrasyon deneyleri, geliştirilerek imalatı yaptırılmış ve İTÜ İnşaat Fakültesi Zemin Mekaniği Laboratuvarı'nda kurularak çalışabilir hale getirilmiş ASTM D5101 deney sisteminde yapılmıştır. Deneylerde mümkün olduğunca farklı fiziksel ve kimyasal özelliklere sahip atık malzemeler kullanılmıştır. Ayrıca, deneylerde agrega ve geotekstil' den oluşan drenaj sisteminde, Türkiye' de kullanımına izin verilen tıkanmanın maksimum yaşanacağı en küçük eşdeğer göz açıklığına sahip örgüsüz, polipropilen geotekstil seçilmiştir. Daha önceki çalışmalarda bu çalışmada kullanılan gözenek açıklığına sahip örgüsüz geotekstil kullanılmamıştır.

Yeniden tasarlanmış ve imal ettirilmiş uzun süreli filtrasyon deney sisteminde yapılan deneylerde, agrega-geotekstil sisteminin zamana bağlı filtrasyon davranışı, oluşabilecek potansiyel tıkanma mekanizmalarının değerlendirmesi, zaman ve akış yönüne bağlı olarak malzeme dane çapındaki değişim, permeabilite değeri belirlenmiş ve sunulmuştur.

Bu çalışmada kullanılan deney sisteminde, manometre sayısı artırıldığı için ASTM D5101 standardında belirtilen deney sisteminden daha güvenilir ölçümler almaya imkân sağlanmakta ve daha gerçekçi değerler elde edilmektedir. Farklı seviyelere yerleştirilen manometre ölçümleri dikkate alınarak hesaplanmış GR değerleri karşılaştırılmıştır. Daha önceki çalışmalarda kullanılan hidrolik eğim değerleri genellikle 1 ile 8 arasında değişen değerlerdir. Bu çalışmada ise geliştirilmiş deney sistemi kullanılarak yol altı drenaj yapılarında uygulamada karşılaşması muhtemel, daha gerçeğe yakın hidrolik eğimler tercih edilmiştir.

Deney sonuçları değerlendirilerek farklı atık malzemelerinin uzun süreli filtrasyon performansı karşılaştırılmıştır. Ayrıca, farklı seviyelere yerleştirilen manometre ölçümleri dikkate alınarak hesaplanmış uzun süreli filtrasyon parametrelerinin karşılaştırılması ve değerlendirilmesi yapılmıştır.

Araştırmada ağırlıklı olarak atık malzeme ve geotekstilden oluşan yolaltı drenaj sisteminin davranışını incelemek ve tıkanma mekanizmalarını değerlendirmeye odaklanılmıştır. Atık agrega ve geotekstil malzemenin aynı drenaj sistemi içerisinde birlikte kullanılması durumunda ortaya çıkması muhtemel problemlerin önceden tespit

edilmesi ve önlenmesi için gerekli tedbirlerin alınması amaçlanmaktadır.

Araştırma sonuçlarının olumlu bulunması durumunda fiziksel ve çevresel olarak toplumlara ve hükümetlere büyük bir sosyal ve ekonomik yük teşkil eden atık malzemelerin büyük ölçekli kullanımı için bir uygulama alanı ortaya çıkmış olacaktır. Bu sayede hem endüstriyel kuruluşlar üretim sonucunda ellerinde kalan atık malzemelerin depolanması için alan tahsis etme yükümlülüğünden kurtulmuş olacaklardır hem de sürdürülebilir geoteknik uygulamalarının gelişmesine katkıda bulunulacaktır.

1.2 Kapsam

Yer altı drenaj tabakası, gerekli malzemenin temini, ekonomikliği göz önüne alınarak çeşitli yöntemlerle teşkil edilmektedir. Bu çalışma ile yer altı drenaj sisteminin, ekonomik olması ve sürdürülebilirliği desteklemek için geri dönüşüm malzemesi ile inşa edilmesi ve geotekstil ile geri dönüşüm malzemeli drenaj sisteminin zamana bağlı filtrasyon davranışının incelenmesi, yer altı drenaj sistemlerinde geri dönüşüm malzemesi ve geotekstilin kullanılmasını artırmak amaçlanmıştır.

Yukarıda da belirtildiği gibi, geri kazanılmış beton ve uçucu kül ile karayolu drenaj sistemlerinde kullanım amacıyla filtrasyon deneyleri geçmişte yapılmıştır (A. Abbaspour ve diğ., 2018; Ahmet H. Aydilek ve diğ., 2002; McCulloch ve diğ., 2017). Fakat bu iki malzeme haricinde diğer endüstriyel atık malzemelerin yol altı drenaj sistemlerinde kullanımı ile ilgili kapsamlı bir araştırma bulunmamaktadır. Geoteknik mühendisliği uygulamalarında kullanılma potansiyeline sahip, geri kazanılmış asfalt, çelik cürufu gibi doğal agrega yerine kullanılabilecek bir çok atık malzeme mevcuttur. Bu araştırmada bu endüstriyel atık malzemelerin tıkanma davranışlarının doğal agregaların tıkanma davranışları ile hangi mertebede karşılaştırılabilir olduklarının laboratuvar deneyleri ile tespit edilmesi amaçlanmıştır.

Agrega-geeotekstil'den teşkil edilen drenaj sisteminin tıkanma davranışları, ASTM D5101' de beliritilen deney düzeneği dikkate alınarak, geliştirilerek tasarlanan ve imalatı yaptırılan, geliştirilmiş uzun süreli filtrasyon deney sisteminde, filtrasyon deneyleri yapılarak belirlenmiştir. Farklı agregalar üzerinde değişik hidrolik eğimler altında yapılmış olan uzun süreli filtrasyon deneyleri ile, kullanılan agrega-geotekstil sistemlerinin uzun süreli filtrasyon parametreleri belirlenmiştir.

Atık agrega-geotekstil sisteminin filtrasyon performansının geliştirilmiş uzun süreli filtrasyon deney sistemi ile belirlenmesinin ve özellikle yol altı drenaj sistemlerde kullanılabilirliğinin incelemesinin amaçlandığı bu çalısmada farklı özelliklere sahip atık ve doğal agregalar üzerinde uzun süreli filtrasyon deneyleri yapılarak, agrega türünün ve hidrolik eğimin tıkanma endekslerine etkisi incelenmiştir.

Çalısmanın ikinci bölümünde, sürdürülebilir malzeme yönetiminin önemi, drenaj sistemleri, drenaj sistemlerinde kullanılabilecek malzemelerin özellikleri özetlenmiştir. Ayrıca bu çalışmada kullanılan atık malzemeler hakkında genel bilgileri ve konu ile ilgili daha önceden yapılmış çalışmaları içermektedir. ASTM D5101 standartında tanımlanan deney sistemi, bu sistemin üstün ve zayıf yanları, tıkanma endekslerini etkiyen faktörlerin ne olduğu ve bu konuda yapılmış daha önceki çalışmaların sonuçları mümkün olduğunca geniş bir şekilde özetlenmeye çalışılmıstır.

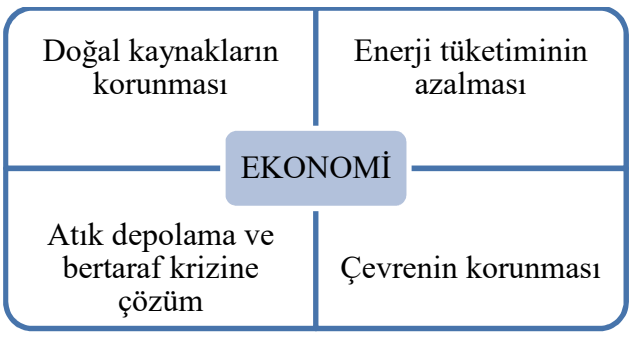
Üçüncü bölümde, bu çalışmada incelenen numunelerin genel özellikleri ile kullanılan deney yöntemleri yer almaktadır. Deneylerde kullanılan numuneler üzerinde yapılan sınıflandırma deneyleri ve diğer deney sonuçları, numunelerin hangi şartlarda hazırlandığı, tıkanma endekslerini belirlemek üzere kullanılacak deney düzeneğinin kısa tanıtımı, ince kesit geotekstil numunesinin hazırlanması ve görüntüleme yöntemleri bu bölümde verilmistir. Ayrıca ASTM D5101 standartında tanımlanan deney sisteminin modifikasyonu için yapılan çalısmalar bu bölümde özetlenmistir.

Tezin dördüncü bölümünde, yapılan deneylerin sonuçları ve değerlendirmeleri bulunmaktadır. Tıkanma endekslerini belirlemek üzere yapılan uzun süreli filtrasyon deney sonuçları ile geotekstil görüntü analizleri bu bölümde verilmiştir.

Çalışmanın beşinci bölümünde ise uzun süreli filtrasyon deneylerinde kullanılan numunelerin, deney sistemindeki farklı seviyelerdeki manometrelerin ve hidrolik eğimin, tıkanma endekslerine etkileri incelenmiştir. Ayrıca uzun süreli filtrasyon deneyi sonucu geotekstil numune üzerinde yapılan optik görüntüler de bu bölümde verilmiştir. Son bölümde ise farklı agrega – geotekstil sistemleri üzerinde yapılan uzun süreli filtrasyon deneyleri ile elde edilen veriler değerlendirilerek varılan sonuçlar, bu çalışma kapsamında elde edilen sonuçlara göre, deneysel çalışmada kullanılan atık malzemelerin drenaj sistemlerinde kullanım uygunluğu değerlendirilmiştir

2. ATIK MAZLEMELERİN DRENAJ SİSTEMLERİNDE KULLANIMI

Globalleşen dünyada sanayileşme ve kentleşmenin etkisiyle birlikte kaynaklar bilinçsizce kullanılmakta ve bu tüketim sonucu atıklar oluşmaktadır. Gittikçe artan oranda karşımıza çıkan atık sorunu; toplumu, aileyi ve bireyi etkilemektedir. Çevre koruma politikaları arasında ağırlıklı bir öneme sahip olan atık yönetimi, üretilen atıkların çevre ve insan sağlığı için bir risk unsuru olmaktan çıkarılarak ekonomi için bir girdiye dönüştürülmesini amaçlamaktadır. Daha önce toplanan materyallerin yeniden işlenmesi, üretilmesi ve kullanılması olan geri dönüşüm, günümüz dünyasında önemli yer tutmaktadır. Gelişmiş ülkelerde geri dönüşüm uygulamaları sıklıkla görülmektedir. Gelişen ülkelerde de doğal kaynaklardan uzun vadede ve maksimum bir şekilde faydalanabilmek için atık israfına son verilmesi, ekonomik değeri olan maddeleri geri kazanma ve tekrar kullanma yöntemlerinin araştırılmaları gerekmektedir (Aslam ve diğ., 2020; Gebremariam ve diğ., 2020). Bu yöntemlerin geliştirilerek, atıkların farklı alanlarda tekrar kullanılmasını sağlamak sürdürülebilir bir topluma geçiş için zorunludur. Sürdürülebilir bir topluma geçişi desteklemek için endüstriyel atıkların yeniden kullanılması Şekil 2.1'de şematik olarak verilen kazanımları sağladığı için çok önemlidir.



Şekil 2.1 : Endüstriyel atıkların geri kazanımının faydaları.

Şekil 2.1'den de görüldüğü gibi geri kazanılan bu atıklar tekrar kullanılarak hem çevre korunmakta hem de ülke ekonomisine olumlu bir katkı yapılması söz konusu olmaktadır (Augiseau, 2020). Ülkeler yürürlüğe koydukları çevre kanunları ve ilgili diğer mevzuatlar ile atıkları maksimum oranda geri dönüştürerek uzun vadede

faydalanabilmek için teşvikte bulunmaktadırlar. Bu düzenlemeler arasında inşaat endüstrisinde ortaya çıkan moloz atıklarının değerlendirilmesi, metalurji ve malzeme endüstrisi, demir çelik sektörü atık türlerinden biri olan çelik cüruflarının tekrardan kullanımı konuları da yer almaktadır. En fazla doğal kaynakların tüketildiği alanlardan biri olan İnşaat Endüstrisindeki faaliyetler sonucu ortaya çıkan inşaat ve yıkıntı atıklarının geri kazanımı ekonomik ve doğal çevrenin korunmasına yönelik yararları sebebi ile ilginin giderek arttığı bir araştırma alanı haline gelmiştir. Özellikle inşaat endüstrisinde oluşan atıkların tekrardan bu alanda kullanılabilme potansiyelinin araştırılması günümüzün güncel konularından biridir (Augiseau, 2020). Birçok ülkede doğal çevrenin korunması ile ilgili araştırmalarda konunun önemi vurgulanmış ve inşaat yıkıntı atıklarının geri dönüşümü ile ilgili uygulamalara sıkı yasal düzenlemeler getirilmiştir.

Tüm dünyada olduğu gibi ülkemizde de inşaat endüstrisi gibi bir çok sektörde prosesler sonuçu oluşan atıkları tekrardan kullanılma potansiyelinin araştırılması ve atık yönetimi politikaları ile geri kazanılması, giderek "temel bir politika" haline gelmektedir. Ülkemizde, Hafriyat Toprağı, İnşaat ve Yıkıntı Atıklarının Kontrolü Yönetmeliği Madde 27'de "Doğal kaynakların korunması, sürdürülebilir üretim, depolanacak atık miktarının azaltılması ve ekonomik değer yaratılması amacıyla inşaat/yıkıntı atıklarının geri kazanılması esastır." ve Madde 28'de "Yol, havaalanı pisti ve benzeri yapıların tadilatı/tamiratı ve yıkımı sırasında oluşan asfalt atıkları, diğer inşaat/yıkım atıklarından ayrı olarak toplanır, taşınır ve geri kazanılır." Yer alan ifadeler ile inşaat/yıkım atıkların tekrardan kullanılmasını zorunlu kılmaktadır. Ayrıca geri kazanım atıkların kullanımı ile ilgili Yönetmelik Madde 33'de "Geri kazanılmış ürünler, ilgili standartları sağlamak şartı ile gerekli işlemlerden sonra orijinal malzemeler ile birlikte veya ayrı olarak, yeni beton üretiminde, yol, otopark, kaldırım, yürüyüş yolları, drenaj çalışmaları, kanalizasyon borusu ve kablo döşemelerinde dolgu malzemesi olmak üzere, alt ve üst yapı inşaatlarında, spor ve oyun tesisleri inşaatları ile diğer dolgu ve rekreasyon çalışmalarında öncelikli olarak kullanılır" ibaresi yer almaktadır. Bu yönetmeliklerden de anlaşılacağı gibi, mevcut yasal düzenlemeler ile endüstriyel atıkların, hammaddenin en çok tüketildiği sektörlerden birisi olan inşaat sektörünün değişik dallarında kullanılmasına teşvik edilerek sınırlı doğal kaynakların hızlı tüketimi önlenebilecek, ekonomik kazanç sağlanabilecek ve atıkların sebep olduğu çevre problemlerine bir ölçüde çözüm getirebilecektir.

Endüstriyel atıkların, inşaat sektörünün değişik dallarında kullanılması ile büyük hacimlerde kullanıma olanak sağlanabilecektir. Bu nedenle, inşaat sektöründe atıkların tekrardan kullanımına fırsat verecek projeler oluşturup, hammadde tüketimini azaltarak, sürdürülebilirliğe katkıda bulunmak için araştırmalar yapılmalıdır. İnşaat sektöründe tüketilen malzemelerin başında beton, asfalt, kırmataş, ahşap, alüminyum, demir, çelik gibi malzemeler gelmektedir. Bu malzemeler geri dönüşümde çok yaygın olarak kullanılan atık malzemelerdir ve inşaat mühendisliğinin farklı uygulama alanlarında kullanılabilirliğine yönelik araştırmalar yapılmış ve yapılmaya devam etmektedir (Mahedi ve diğ., 2020; Ok ve diğ., 2020; Tavakoli Mehrjardi ve diğ., 2020). Araştırma konularından biri de atık asfalt, atık beton ve çelik cürufu gibi malzemelerin inşaat mühendisliğinin bir dalı olan geoteknik mühendisliğinin uygulama alanlarında kullanılabilirliğidir. Bu nedenle geoteknik mühendisliği uygulamalarından biri olan, yol üst yapısı ve yol tabanına çeşitli yollarla giren suyun tahliye edilmesi için inşaa edilen yol altı drenaj sistemlerinde atık malzemelerin kullanımına yönelik araştırmalarda yapılmaktadır (McCulloch ve diğ., 2017; Ryoo ve Aydilek, 2020).

Bu bölümde, sürdürülebilirliğin ve döngüsel yaşamın önemi, drenaj çeşitleri, özellikle ülkemizde yol altı drenaj tabakalarını oluşturacak malzemelerin bulundurması gereken özellikler, drenaj sistemlerinde kullanılabilme potansiyeline sahip geri kazanılmış asfalt, geri kazanılmış beton, çelik cürufunun özellikleri ve inşaat sektöründeki kullanım alanları, ASTM D5101 standartında tanımlanan uzun süreli filtrasyon deneyi hakkında bilgiler verilmiş, konu ile ilgili literatürde bulunan önceki çalışmalar özetlenmiştir.

2.1 Sürdürülebilirlik ve Döngüsel Yaşam

İnsanoğlu dünyanın doğal kaynaklarının yenilenebileceklerinden daha hızlı bir şekilde tüketmektedir. Giderek daha rahat bir yaşam beklentisi, bir tüketim toplumunu oluşturan en önemli faktörlerden biridir. Ancak insanoğlu, dünyanın doğal kaynakları sınırlı olduğu için başka bir problemi çözmek zorundadır. Daha önce yerel bazda etkisi olan doğal kaynakların kullanımı ve atık yönetimi sorunlarının günümüzde giderek artarak küresel etkiler yarattığı söylenebilir.

Küresel malzeme kaynağı kullanımı 2017'de yaklaşık 90 milyar tona ulaşmış ve 2015'ten 2050'ye iki kattından fazla artabileceği tahmin edilmektedir. Yüksek gelirli ülkeler şu anda düşük gelirli ülkelere göre kişi başına 10 kat daha fazla tüketim

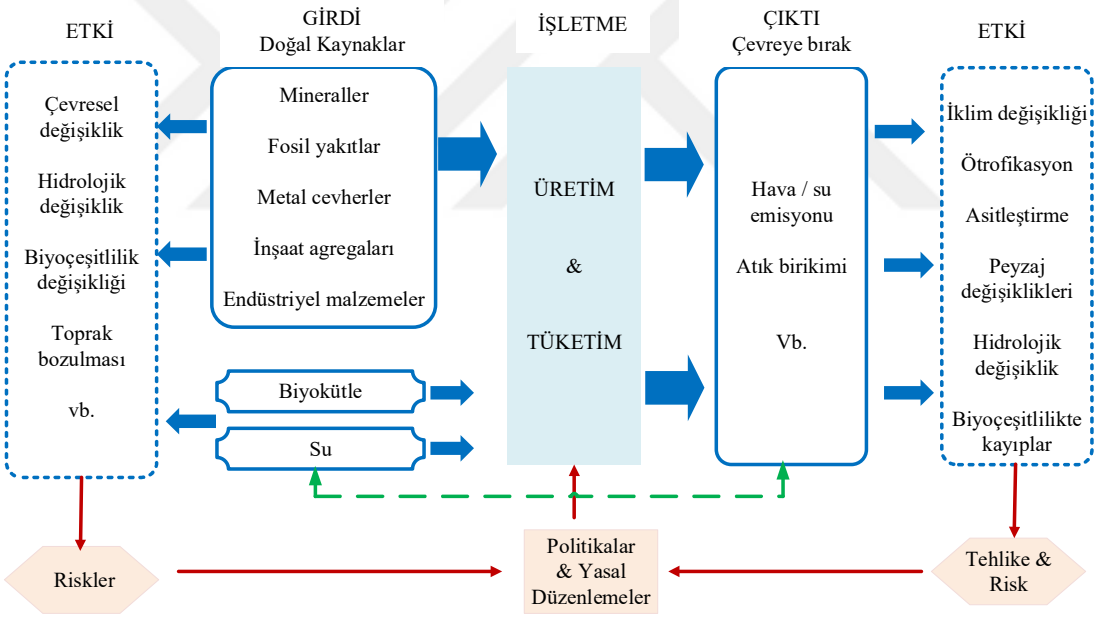
yapmaktadır (United States Environmental Protection Agency (EPA), 2020). İklim değişikliği ve kirlilik dahil çevresel etkiler, yalnızca emisyon azaltımına odaklanılarak etkili bir şekilde azaltılamayacağı bildirilmektedir. Kaynak kullanım seviyesi, çevreye salınan nihai atık ve emisyonların büyüklüğünü belirleyerek, kaynak yönetimi ve verimliliği çevrenin korunması için anahtar stratejiler haline gelmektedir. Ekonomik faaliyet ve insan refahının kaynak kullanımından ayrıştırılması, yani artırılmış kaynak verimliliği ve herkes için sürdürülebilir kalkınma hedefleri gerekmektedir. Etkili ayrıştırmayı başarmak için, günümüzün doğrusal malzeme akışları, akıllı altyapı ve ürün tasarımı, standardizasyon, yeniden kullanım, geri dönüşüm ve yeniden üretimin bir kombinasyonu yoluyla döngüsel hale gelmelidir. Kaynak verimliliği ve döngüsel ekonomi uzun vadede olumlu sosyo-ekonomik ve çevresel sonuçlar sağlamaktadır (Gonzalez ve Chini, 2020).

Ülkeler, farklı koşullarla karşı karşıyadır ve bu nedenle kaynak kullanımı ve döngüsel ekonomik büyüme konusunda da farklı fırsatlara sahiptirler. Üretim ve tüketim sistemlerini sosyo ekonomik sistemlere dönüştürmek için sektörler, bölgeler, kaynaklar ve etkiler arasında farklılıkları önleyen bir sistem yaklaşımına ihtiyaç vardır. Kaynakları verimli kullanan, düşük kirliliğe sahip kentler geliştirmek için gıda, enerji, su ve barınak gibi temel ihtiyaçların karşılanma şeklini dönüştürerek, sürdürülebilir kentsel altyapı geçişlerini yönlendirmeye gerek duyulmaktadır. Malzeme akışlarını izlemek ve sosyo-ekonomik geçişleri yönlendirmek için malzeme ayak izleri gibi hedeflere ve göstergelere ihtiyaç vardır (Rahman ve Kim, 2020). Toplumların doğal kaynakları kullanma ve bunlara özen gösterme biçimleri temelde insanlığın, çevrenin ve ekonominin refahını şekillendirir. Doğal kaynaklar yani bitkiler ve bitki bazlı malzemeler, metaller, mineraller, fosil yakıtlar, toprak ve su yerelden küresel ölçeğe kadar sosyo-ekonomik sistemlerin malları, hizmetleri ve altyapısı için temel girdilerdir. Araştırmalar, doğrudan veya dolaylı olarak doğal kaynakların ve çevrenin tüm Birleşmiş Milletler Sürdürülebilir Kalkınma Hedefleri ile bağlantılı olduğunu göstermektedir. Bu hedeflerde belirtilen, mevcut ve gelecek nesillerin refah düzeyine ulaşması için doğal kaynakların korunması, iyileştirilmesi ve sürdürülmesi zorunludur (U.S. Environmental Protection Agency, 2020).

Kaynak verimliliği aynı zamanda geleneksel kirlilik kontrol stratejilerinin tamamlayıcı bir unsurudur. Kullanılan kaynakların miktarını düşürerek, ilgili emisyonların ve etkilerin miktarı da azaltılabilir ve bunların çoğu aynı anda yapılabilir. Toplumların

ekonomik büyümesini, doğal kaynak kullanımı ve çevresel etkilerden efektif bir şekilde ayırabilmesi için uygulanabilir birçok yol vardır. Teknik olarak uygulanabilir ve ticari olarak uygulanabilir teknolojiler, inşaat, tarım, gıda, sanayi, ulaşım ve diğer sektörlerde su ve enerji verimliliğini yüzde 60 ila 80 artırabilirken, aynı zamanda 2030'a kadar her yıl 2.9 ila 3.7 trilyon ABD doları arasında ekonomik maliyet tasarrufu sağlayabilir.

Temel altyapı (enerji, binalar, ulaşım, su temini, atık yönetimi, vb.) ve gıda tedarik sektörleri, küresel kaynak kullanımı kirliliğine ve insan sağlığı üzerindeki çevre ile ilgili etkilere önemli ölçüde katkıda bulunmaktadırlar. 2050'ye kadar var olması beklenen kentsel altyapının % 60'ından fazlasının henüz inşa edilmemiş olmasıyla, geleceği uzun vadede şekillendirme fırsatı vardır (Hajdukiewicz ve Pera, 2020). Şekil 2.2'de üretim faaliyetlerinden kaynaklanan malzeme kullanımı ve tüketim nedeni ile oluşan tehlike ve riskler şematik olarak tanımlanmıştır.

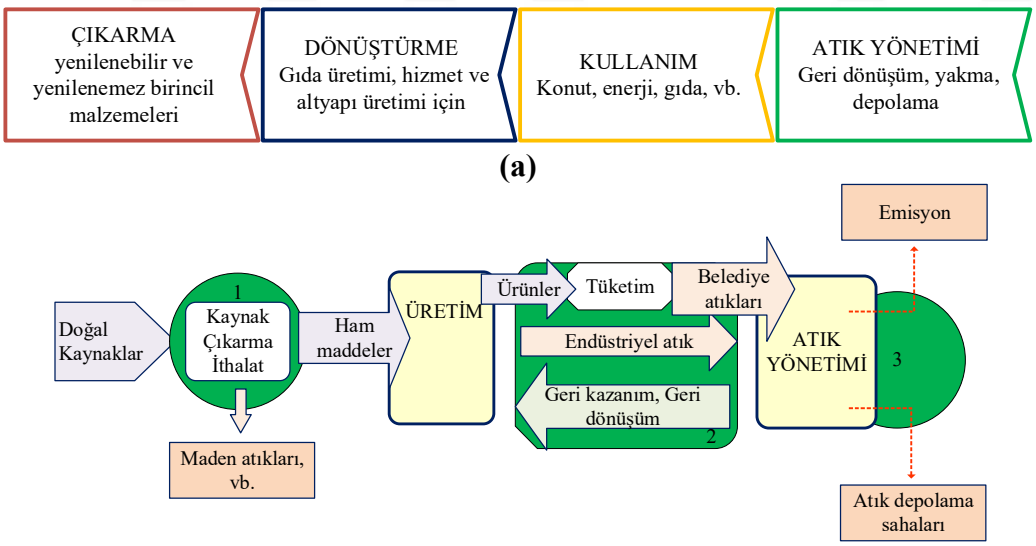


Şekil 2.2 : Üretim ve tüketim faaliyetlerinden kaynaklanan malzeme akışlarını ve çevresel etkilerini dikkate alan sistem yaklaşımı (Bringezu, 2002).

Ekonomik kalkınmayı, insan refahını ve çevreyi etkiledikleri için üretim-tüketim sistemleri, temel altyapı, gıda tedarik hizmetleri aracılığıyla toplumda doğal kaynakların kullanımı arasındaki bağlantıları değerlendirmektedir. Üretim-tüketim sistemleri kaynak çıkarma ve hasattan nihai bertarafa kadar ekonominin toplam malzeme verimini ve bunların çevresel etkilerini Şekil 2.3' te gösterildiği gibi dikkate alınmaktadır. İnsanoğlu doğal kaynaklarının aşırı kullanılmasının bedelini iklim

değişikliği, orman yangınları, zamansız ve doğal olmayan yağmur yağışı, aşırı sıcaklık, kuraklık ve seller gibi doğal afetler ile ödemektedir. Sürdürülebilir bir yaşam tarzı benimsemeye başlamak için hem bireysel uygulamalar hemde uygulanan siyasal politikalar ile doğal kaynaklar olabildiğince az kullanılmalıdır. Uygulamada olan politikalarla çok ölçekli sürdürülebilir kaynak yönetimi için sürdürülebilir üretim ve tüketim teşvik edilmektedir. Bu kaynakları etkin ve verimli kullanılmasını ve israfsız bir hayata dönmeyi gerekli kılmaktadır.

Şekil 2.3'de verilen ayırma, dönüştürme, ürün kullanımı ve atık yönetiminden kaynaklanan çevresel etkiler, malzeme kullanımının tüm aşamalarında ortaya çıkar. Olumsuz çevresel etkilerdeki büyümenin bir kısmı, saf malzeme girdisinin geri dönüştürülmüş malzemeler, yeniden üretim ve yeniden kullanımla değiştirildiği döngüsel ekonomi girişimleriyle dengelenebilir (Allwood, 2012). Döngüsel ekonomide atıklarda, dönüştürüldüğü, endüstriye ve ekonomiye girdi olarak getirildiği için bir kaynak olarak görülmektedir. Atık geri dönüştürülmez ve depoya gönderilirse, hem depolama maliyetlerine hem de ek nakliye maliyetlerine yol açmaktadır (UNO Environment, 2019). Atıkların depolanması oldukça pahalı olduğu için sadece çevreye değil ekonomiye de zarar vermektedir.

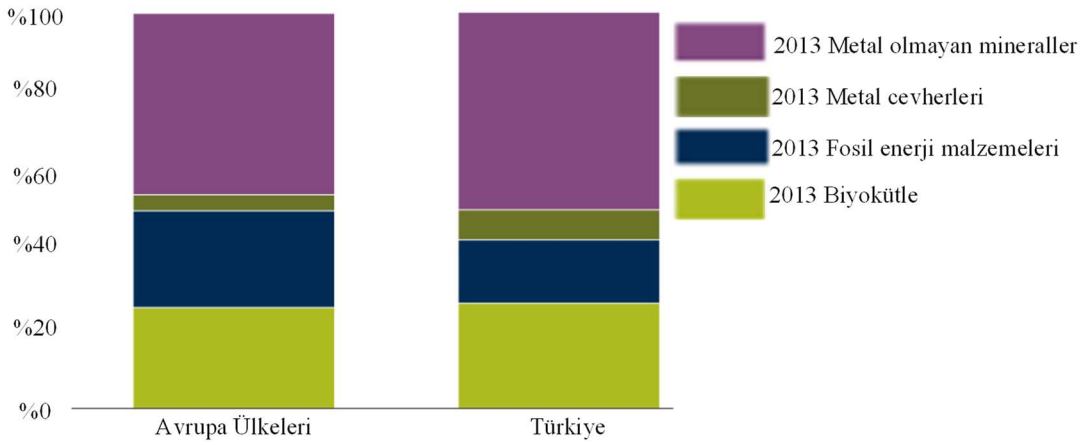


Şekil 2.3 : (a) Kaynak kullanımının yaşam döngüsü. **(b)** Kirlilik kontrolü dahil olmak üzere ekonomi çapında malzeme akışı yönetimi için ana hedef alanlar (Bringezu, 2002).

İnsanlar hayatı kolaylaştırmak için sürekli yapılar inşa etmektedir. Nature dergisinde 9 Aralık 2020'de yayınlanan yeni araştırmaya göre, insan yapımı tüm malzemeler (binalar, araçlar, barajlar, yollar vb.), Dünya üzerindeki tüm canlıların ağırlığına eşit bir ağırlığa ulaşmıştır. Bir tüketim ürünü olarak ortaya çıkan ve düzenli depolama alanlarına giden inşaat-yıkım (C&D) atıklarının miktarını azaltmak için Şekil 2.3 (b)'de verilen döngüsel ekonomi uygulamasını kullanmak önemlidir. Hammaddelerin çıkarıldığı, bir ürün yapmak için kullanıldığı ve bertaraf edildiği doğrusal bir ekonominin aksine, döngüsel ekonomi, atıkların en aza indirildiği ve kaynakların geri dönüşüm ve yeniden kullanım yoluyla mümkün olduğu kadar uzun süre kullanıldığı bir sistemdir. C&D atıklarının yeniden kullanımı ile düzenli depolama alanlarına gönderilen C&D atık miktarı azaltmaktır (Augiseau, 2020; Gonzalez ve Chini, 2020; Kabirifar ve diğ., 2020). Bu da hem bu atıkların depolanması için gerekli olan depolama alanlarının gerekliliğini en aza indirerek hem de doğal kaynakların elde edilmesi için uygulanan prosese gerek duyulmaması nedeni ile inşaat endüstrisinde maliyeti düşürmektedir.

Gelişen bir ülke olan Türkiye genç ve dinamik bir nüfusa sahiptir. Nüfusunun% 75'i şehirlerde yaşarken şehirleri büyümekte ve kentsel yoğunluk artmaktadır. Bu nedenle tüketim ve enerji ihtiyacı artmaktadır. Şekil 2.4'te Avrupa ülkelerinde ve Türkiye'deki malzeme kullanımı grafiği verilmiştir.

Tüketim arttıkça hammadde ihtiyacı da artmaktadır. Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK) verilerine göre, son otuz yılda nüfustaki sadece %3'lük bir artışın aksine, aynı dönemde kaynak kullanımı, enerji tüketimi ve buna bağlı olarak atık oluşumu iki katına çıkmıştır (Val ve Orman, 2005). Aynı şekilde Ticaret Bakanlığı tarafından yayınlanan 2008 Türkiye Atık Raporu da bu durumu doğrulayan veriler içermektedir. Bu doğrultuda "Yaşanabilir Şehirler, Sürdürülebilir Çevre" ilkesinin temel ekseninde hareket edilip sürdürülebilir malzeme yönetimini tüm alanlarda uygulanması gerekmektedir. Kalıcı yasal düzenlemeler ile hammadde ve doğal kaynaklarımızın korunması ve kullanım dengesinin sağlanması, kaçınılmaz olarak oluşan atığın yeniden kaynak olarak değerlendirilmesi ve böylelikle kendi kendine yeten bir ülke olma yolunda pek çok adım atılmıştır.



Şekil 2.4 : Türkiye ve Avrupa ülkelerinde ortalama malzeme tüketimi (Europen Environment Agency, 2016).

Bu projelerden biri de 2017 yılında başlatılan sıfır atık projesidir. Sıfır atık israfın önlenmesini, kaynakların daha verimli kullanılmasını, atık oluşumunun engellenmesi veya azaltılması, atığın oluşması durumunda ise kaynağında ayrı toplanması ve geri kazanılmasını kapsayan atık yönetim felsefesi, kültürel, ekonomik ve sosyal gelişimin elde edilmesi için atıkların yaşam döngüsünü dikkate alan bir yaklaşım biçimidir. Sıfır atık yönetiminde, ürünlerin yeniden kullanılması, kullanım ömürlerinin uzatılması, ürünlerin üretiminde zararlı maddelerin kullanılmaması veya azaltılması, geri dönüşümü mümkün ürünlerin üretilmesi esastır. Şekil 2.5'de verilen atık yönetim hiyerarşisi sıfır atık yönetim sisteminin temelini oluşturmaktadır. Buna göre atık oluşumunun önlenmesi birinci öncelik olup, atık oluşumu engellenemediği durumlarda mümkün olduğu kadar az atık miktarının oluşmasını sağlayacak prosesler kullanılmalıdır. Prosesler sonucu oluşan atıkların ya aynı tesis içerisinde ya da farklı endüstri kollarında yeniden kullanımını sağlamak sıfır atık yönetim sisteminin basamaklarıdır. Yeniden kullanımı mümkün olmayan atıkların ise maddesel geri kazanımı veya enerji olarak geri kazanımı şeklinde değerlendirilmesi gereklidir, bu atık yönetiminde en son tercih edilecek atık yönetimi adımıdır. Sıfır atık yönetim sisteminin oluşturulması çevre kirliliğinin giderilmesi için gerekli maliyetlerin azaltılması bakımından da önemlidir.



Şekil 2.5: Türkiye sıfır atık yönetim hiyerarşisi (T.C. Çevre Ve Şehircilik Bakanlığı, 2020b).

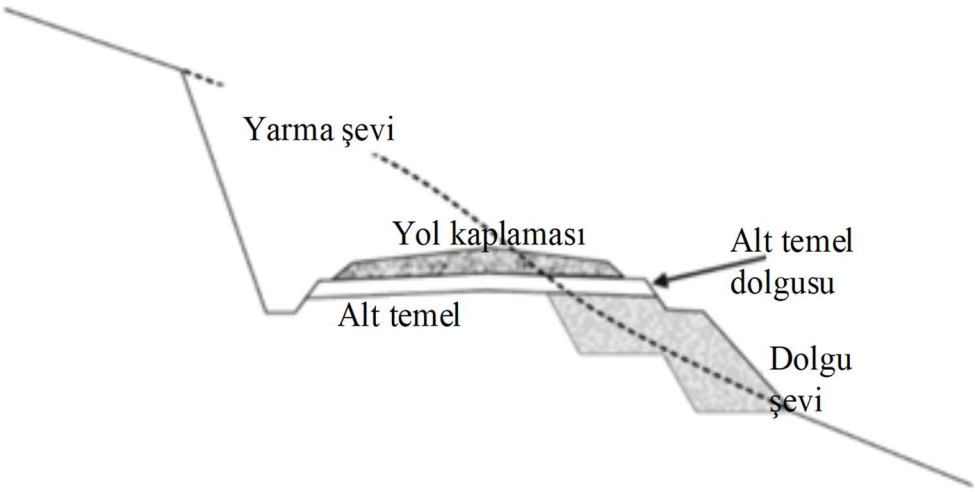
Sıfır atık projesi ile maksimum miktarda atığın depolama alanlarına götürülmek yerine geri dönüştürülerek hammadde olarak endüstriye ve ekonomiye kazandırılması hedeflenmektedir. Böylelikle doğal kaynak israfı önlenecek, kaynaklar daha verimli kullanılacak ve ortaya çıkan atıklar depolanmak yerine yeniden kullanılarak geri dönüştürülecek, döngüsel ekonomi modeli Türkiye'de uygulanacaktır (T.C. Çevre Ve Şehircilik Bakanlığı, 2020b). Bu proje ile iklim dostu yatırımların destekleneceği, temiz üretim teknolojilerine yatırım yapan tesislerin ödüllendirileceği ve Emisyon Ticaret Sisteminin hayata geçirileceği bildirilmiştir. Ayrıca enerji ve sanayi tesislerinin iklim ve çevre dostu üretim yapmalarına yönelik ilave tedbir ve teşviklerin arttırılacağı belirtilmiştir.

Türkiye'de uygulamadaki çevre strateji ve politikaları doğrultusunda, endüstriyel atıkların tekrardan kullanılması çok önemlidir. Özellikle her geçen gün mikatı artan inşaat ve yıkım atıkları ile demir çelik sektörü atık ürünü olarak tanımlanan çelik cürufunun döngüsel ekonomiye dahil edilmesi gerekmektedir. Bu nedenle atık asfalt, atık beton ve çelik cürufu malzemelerinin, inşaat mühendisliği uygulamalarında kullanılabilirliği araştırılmaktadır. Malzeme sarfiyatının çok olduğu drenaj uygulamalarında bu malzemelerin kullanılabilmesi doğal kaynakların korunması için önemlidir. Bu çalışmada da drenaj tabakalarında, özellikle yol altı drenaj tabakalarında atık asfalt, atık beton ve çelik cürufu malzemelerinin kullanılabilme potansiyeli incelenmiştir.

2.2 Drenajın Önemi ve Drenaj Uygulamaları

Pek çok yapının stabilitesi ve uzun ömürlülüğü suyun alt ve üst yapıdan uzak tutulması ile doğru orantılıdır. Birçok yapı malzemesinin su ile temas etmesi bu malzemelerin zamanla performansını yitirmelerine sebebiyet vermektedir. Performans kayıpları, arzu edilen veya hesaplanan malzeme özelliklerinin elde edilememesi bu etkilerin başlıcalarındandır. Bu nedenle tüm yapı tasarımlarında drenaj sistemlerinin doğru bir şekilde modellenmesi çok önemlidir. Kısaca drenajın tanımı, yeraltı su seviyesini düşürmek ve zeminde biriken suların yapıdan uzaklaştırılmasını sağlamak amacıyla uygulanan ve drenaj tabakası, drenaj boruları, kontrol ve bakım rögarlarından oluşan sistem olarak yapılmaktadır. Yapıya gelen su kaynakları dikkate alınarak yüzey suyu drenajı ve yeraltı suyu drenajı olmak üzere farklı drenaj uygulamaları yapılabilmektedir.

Bu çalışmada, özellikle karayollarında yol altı drenaj sistemlerinde kullanılması planlanan endüstriyel atık malzemelerin uzun süreli filtrasyon performansı araştırılmıştır. Karayolu, önceden belirlenen geometrik standartlara uygun olarak saptanmış olan bir güzergah boyunca, doğal zeminin istenilen yüksekliklere getirilmesi ve üzerinde motorlu taşıtların istenilen hız, güvenlik ve konfor koşullarında hareketlerinin sağlanabilmesi amacıyla inşa edilen yapıların tümü olarak tanımlanabilir. Şekil 2.6'da örnek bir karayolu kesiti verilmiştir. Karayolu kesiti özetle yarma ve dolgu şevinden, alt temel, alt temel dolgusu ve yol kaplamasından oluşmaktadır.

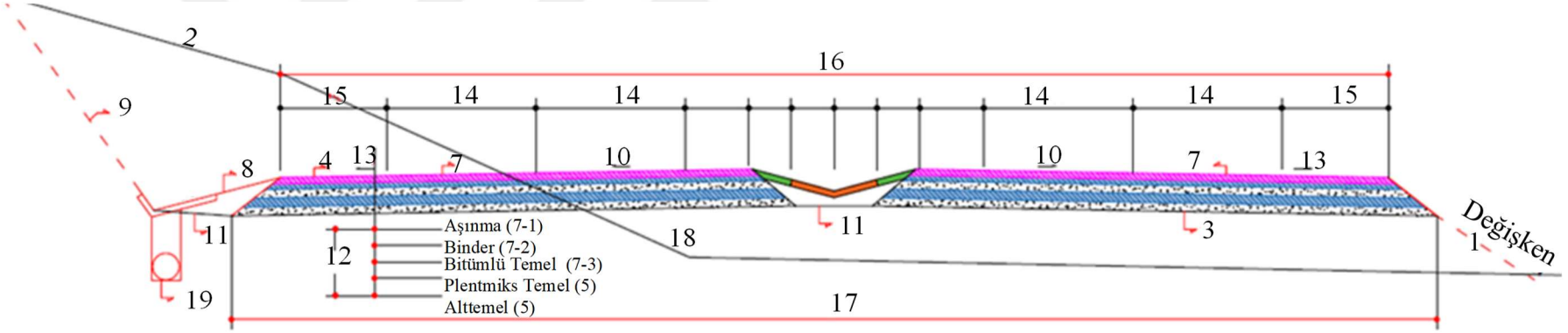


Şekil 2.6 : Karayolu kesiti (T.C. Karayolları Genel Müdürlüğü, 2013).

Detaylandırılmış karayolu enkesiti Şekil 2.7'de verilmiştir. Şekil 2.7'den de anlaşılacağı gibi karayolu, altyapı ve üstyapı olmak üzere iki ana kısımdan oluşmaktadır. Yapımı tamamlanmış bir karayolunda, tesviye yüzeyi ile doğal zemin çizgisi arasındaki bölge altyapı olarak adlandırılır. Altyapı; yolun dolgu kesimlerinde, dışarıdan getirilen toprakla oluşturulmuş bir toprak gövde, yarma kesimlerinde ise doğal zemindir. Ancak, yarma kesimlerinde tesviye yüzeyini oluşturmak amacıyla yapılan dolgu çalışmaları da alt yapıya dahildir. Standart yeraltı suyu drenajı drenaj hendeği, drenaj borusu ve drenaj tabakası olmak üzere farklı malzemelerden inşa edilmektedir. Yeraltı suyu drenaj sistemleri, mevcut yeraltı su seviyesini yola zarar vermeyecek seviyeye kadar indirmek amacı ile yapılmaktadır.

Yol yapımında inşa edilen yüzey ve yeraltı drenaj sistemleri yol platformu ile yola ait yağış havzasına yağmur, dolu ve kar halinde düşen ve doğal yataklarda akan ya da çukur yerlerde biriken yüzey suları ile zemin daneleri arasındaki boşluklarda durgun veya akar halde bulunan yer altı sularının yola veya çevreye zarar vermeyecek şekilde kontrol altına alınıp uzaklaştırılması görevini yerine getirecek şekilde inşa edilmelidir.

Karayollarını yapı ömrü boyunca karşılaması planlanan performanlarını yerine getirebilmeleri için doğru projelendirilmiş ve inşa edilmiş, yüzey suyu ve yer altı suyu drenaj sistemlerine sahip olmaları gerekmektedir. Drenaj sistemlerinin efektif çalışması için yapımında kullanılan agrega ve geotekstil gibi malzemelerin doğru seçilmesi önemlidir.

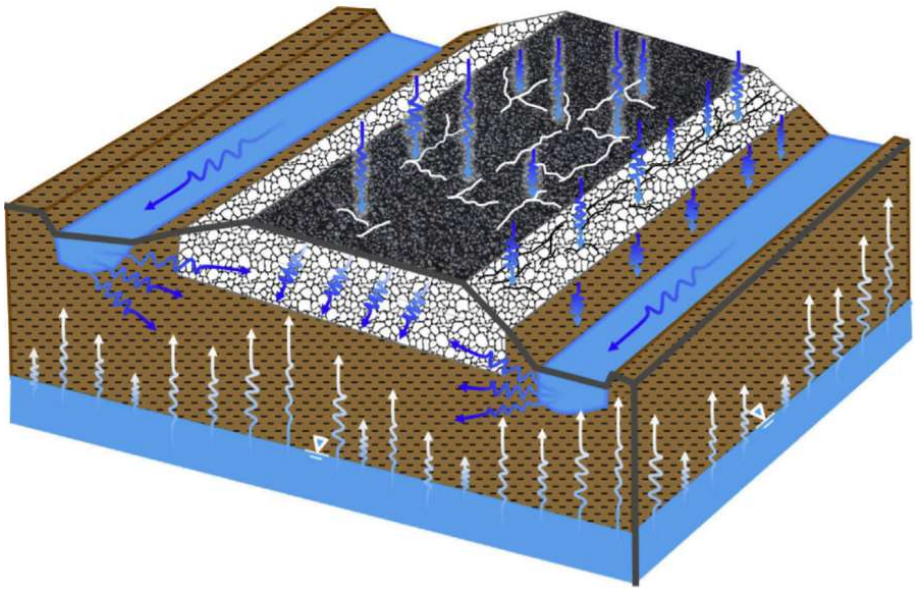


1. Dolgu Şevi
2. Doğal Zemin
3. Üst Yapı Tabanı
4. Banket Kaplaması
5. Alttemel Tabakası
6. Temel Tabakası
7. Kaplama Tabakası
   7.1 Aşınma
   7.2 Binder
   7.3 Bitümlü Temel
8. Hendek Şevi
9. Yarma Şevi
10. Yolun Enine Eğimi
11. Tesviye Yüzeyi
12. Üstyapı Proje Kalınlığı
13. Banket Eğimi
14. Tarfik Şeritleri Genişliği
15. Banket Genişliği
16. Yol Platform Genişliği
17. Üstyapı Tabanı Genişliği
18. Mevcut Yüzeyin Enine Eğimi
19. Standart Yeraltı Suyu Drenajı

Şekil 2.7 : Yol tip enkesiti (T.C. Karayolları Genel Müdürlüğü, 2013).

İnsanoğlunun hayatta kalabilmesi, uygarlığın yayılması ve ekonominin gelişmesinde birinci derecede rol oynayan unsurların başında bulunan ‘yol’ un en büyük düşmanı hiç şüphesiz ki ‘su’ dur. Su, yol altyapısının ve üstyapısının inşası sırasında zeminin kolayca sıkıştırılmasına yardımcı olması bakımından kullanılmaktadır. Ancak, yapımı tamamlanıp trafiğe açılan yolun gerek yüzey suyu gerekse yer altı suyuna karşı sürekli olarak korunması, suyun yola olan zararlarının önlenmesi bakımından büyük önem taşır. Günümüzde iyi bir yol deyince tabanından kaplamasına kadar bütünüyle kuru olan, diğer bir deyişle, nem oranı şartnamelerde belirtilen belirli ve ölçülü sınırlar içinde bulunan bir yol anlaşılmaktadır. Bu nedenle, bir yol projesinde yolun yüzey suyu ve yer altı suyuna karşı korunması yol inşaatının başlangıcından sonuna kadar her aşamada göz önünde tutulması gereken bir konudur.

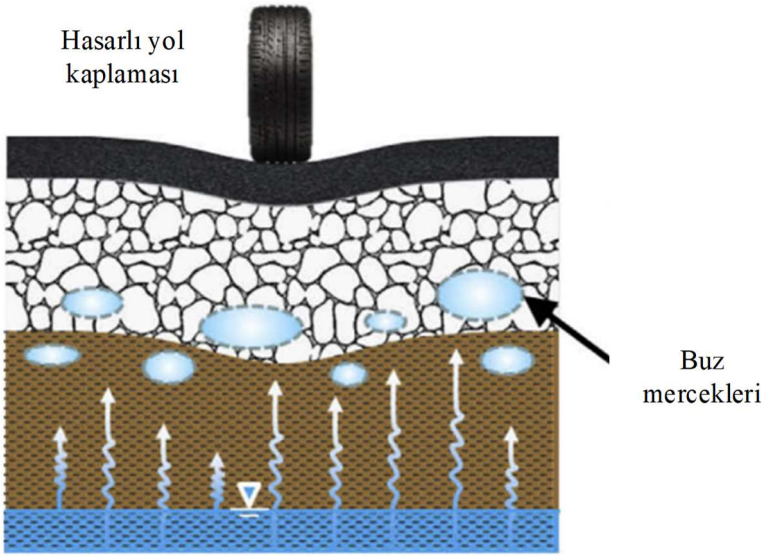
Şekil 2.8’de örnek bir karayolunun ilgili katmanlarındaki çeşitli nem kaynaklarını göstermektedir. Belirli bir karayolu projesi için özel koşullar ve nem kaynakları (yüzey suyu ve yer altı suları) göz önünde bulundurularak drenaj sistemi tasarlanarak uygulanmalıdır. Suyun asfalt tabakasındaki çatlaklar, kaplama banketlerinden sızma veya yüzey suyu drenaj sistemlerinden yol alt tabakalarına ulaştığı durumlar, ayrıca aşağı katmanlardan yukarıdaki yol tabakalarına doğru su hareketi durumu gibi yol yüzeyine ve yol alt katmanlarına su sızmasını en aza indirmek, karayollarının işlevlerini tam olarak yerine getirmesi için çok önemli olduğu belirtilmektedir (Zornberg ve diğ., 2017b).



Şekil 2.8 : Bir yola birden fazla nem göçü kaynağı (Zornberg et al., 2017b).

Suyun, yol gövdesini oluşturan zemini hafif şekilde nemli tutan ve bu surette ince daneler arasında kohezyon oluşturarak faydalı bir görev yapan belli bir miktarından fazlasının drenaj sistemleri ile yolun katmanlarından uzaklaştırılmaması durumunda suyun aşağıda sıralanan etkileri altında kısa zamanda performansını azaltacağı gibi sürekli olarak bakım ve onarım masraflarının oluşmasına da neden olacaktır. Ayrıca drene edilmeyen fazla su yoldaki trafik güvenliğinide büyük ölçüde azaltmaktadır.

1. Yol tabanı ve gövdesini oluşturan zemin kısmen veya tamamen suya doygun duruma geçerse trafiğin hareketli ve tekrarlı yük etkisi altında boşluk suyu basıncı doğar. Bunun sonucu, zeminin kayma mukavemeti açısı azalacağından kayma mukavemeti düşer, dolayısı ile taşıma gücünde azalma meydana gelir.
2. Kil ve silt gibi zeminler su ile temas ettiğinde şişme özelliği gösterip hacim değişikliği yaşarlar. Bu hacim değişikliği sonucu meydana gelen kabarmalar ise üstyapıda kırılma ve dağılmalara yol açar.
3. Yol gövdesini oluşturan zeminin bünyesinde serbest, kapiler ve absorbe olarak bulunan su donunca önce hacim artması, bunun sonucu olarak üstyapıda kırılmalar meydana gelir. Şekil 2.9'da gösterildiği gibi, kılcal yükselme nedeniyle su tablasından göç eden su donma derinliğine karşılık gelen yüksekliğe ulaştığında buz mercekleri gelişir. Buz mercekleri, nem kaynağı bozulana veya sıcaklıklar donma değerlerinin üzerine çıkana kadar büyümeye devam etmektedir. Büyüyen buz mercekleri, yol kaplamasında hasara neden olabilmektedir.
4. Daha sonra havanın ısınması ile çözülen don zeminin çamurlaşmasına neden olur, bu çamur trafik yükü ile yukarı doğru hareket ederek alttemel ve temel tabakasının daneli malzemesi içine girerek bunlar arasındaki kenetlenmeyi önler ve böylece taşıma gücünün azalmasına sebep olur.
5. Yolun yarma kesimlerinde, yol gövdesine doğru olan yeraltı suyu akımları zeminde kayma yüzeyleri oluşturarak yarma şevinin stabilizesini bozup kaymasına neden olurlar.



Şekil 2.9 : Donma şişmesi nedeni ile yol kaplamasında oluşan hasar (Zornberg ve diğ., 2017b).

Karayolunda su nedeni ile yolda meydana gelebilecek hasar ve kayıpları önlemek için yüzey suyu drenajı ve yer altı suyu drenajı olmak üzere iki çeşit drenaj uygulaması söz konusudur.Yüzey suyu drenajında amaç, kaplama, banket ve şev yüzeyinin sürekli olarak akan veya yağış sonucu oluşan akarsulara karşı korunması olup bu, kenar hendekleri, kafa hendekleri ve çeşitli tip menfezleri içeren bir sistemle sağlanır. Serbest, kapiler ve absorbe halde bulunan yeraltı suyuna karşı drenaj yüzey sularına karşı yapılan drenaja göre daha zor olup bu drenaj için standart bir sistem önerilmesi zordur. Zemin cinsi, yeraltı suyunun derinliği, akış yönü ve miktarı gibi hususlara bağlı olarak drenaj projeleri hazırlanır ve uygulanır. Yollarda drenaj çalışması yapılırken yeraltı ve yüzey sularının yola etkilerinin çok iyi etüd edilmesi gerekmektedir. Bu yüzden zemindeki su muhtevası fazlalığının nasıl çözümleneceği incelenmelidir. Zeminin kayma mukavemetinin ve taşıma gücünün düşmesine sebep olan su muhtevasının fazlalığı istenmeyen hacim değişikliklerini de kolaylaştırmaktadır.

Gerek yüzey suyu ve gerekse yeraltı suyu drenajı ile ilgili tesislerin beklenen görevlerini yerine getirebilmeleri için periyodik olarak kontrollerinin ve bakımlarının yapılması gerekmektedir. Genellikle yağış mevsimi başında ve sonunda olmak üzere yılda iki defa yapılacak olan bu periyodik bakımlar sırasında başlıca, kenar hendekler, kafa hendekleri ve menfezler temizlenmekte ve yer altı suyu dren tesislerine ait deşarj noktalarının kar, buz, çalı ve benzeri yabancı maddelere karşı korunmaları sağlanmaktadır.

2.2.1 Yüzey suyu drenajı

Sürekli olarak belirli bir yatakta akan sular ile yağış sonucu oluşan ve yol gövdesine doğru gelen suların yola ve çevreye zarar vermeyecek şekilde kontrol altına alınıp uzaklaştırılmaları yüzey suyu drenajın amacı olmaktadır. Yağmur suları yol yüzeylerine düştükten sonra, yol yüzeyinde hareket ederken değişen kalınlıkta bir su tabakası oluşturmaktadır. Bu su, lastikler ile yol yüzeyi arasındaki sürtünmeyi azaltarak yol tutuş kaybına neden olmaktadır. Bu nedenle uygun yüzey suyu drenajı yapılmayan yollarda sürüş güvenliği azalmaktadır.

Karayollarında enine ve boyuna yüzey drenajları yapılmaktadır. Boyuna yüzeysel drenajı oluşturan elemanlar; kenar (yarma) hendekleri, palye hendekleri, kafa hendekleri, topuk (şev dibi) hendekleri ve refüj hendekleri ile asfalt bordürler, düşüm olukları ve giriş bacalarıdır. Karayollarında enine drenajın amacı, yol üzerine veya etrafına gelebilecek yüzey ve yüzey altı sularının yol üzerinde veya etrafında önlenerek yola zarar vermeden uygun bir yöne çevrilmesidir. Yüzey suyu drenajında kullanılan yapı elemanlarının tipinin seçimi, ayrıca seçilen tipin boyutlandırılabilmesi için her şeyden önce menfeze gelen suyun miktarının bilinmesi gerekmektedir.

2.2.2 Yer altı suyu drenajı

Yer altı suyu drenajında amaç, yol taban zemininde bulunan ya da yanlardan yol gövdesine doğru gelen yer altı suyunun yola zarar vermeyecek şekilde kontrol altına alınıp uzaklaştırılmasıdır. Zemindeki su başlıca, serbest ve kapiler olmak üzere iki şekilde bulunabilir. Serbest suyun uzaklaştırılması uygun dren tesisleri ile kolaylıkla mümkünken zemindeki kapiler suyun tamamen giderilmesi çok zordur. Bu su ancak yeraltı su düzeyini düşürmek suretiyle yola zarar vermeyecek bir miktara indirilebilir. Genelde yeraltı suyunun yol taban kotunun (tesviye kotu) en az 60 cm altına indirilmesi istenmektedir

Zemin kütlesinin su muhtevasının sakıncalı seviyeye ulaşmasını engellemek ya da düşürmek için yapılacak ilk iş yüzeysel suların yol gövdesine sızmasını mümkün mertebe azaltmaktır. Bu, yola yeterli enine eğim vermek, su geçirmez bir kaplama inşa etmek ve sürekli akış halinde bulunan suların yol gövdesi ile temasını önlemek suretiyle olur. Bu ilk önlemlerden sonra yol geçkisi boyunca yapılan drenaj etüdü sonucuna uygun olarak tesis olunan dren yapıları ile zemindeki su miktarı yola zarar vermeyecek bir düzeyde tutulmaya çalışılır.

Karayollarındaki yüzey altı drenajı yapıları;

- Yer altı su seviyesinin yüksekliğini,
- Yer altı su seviyesinin düşey hareketini kontrol altına almak

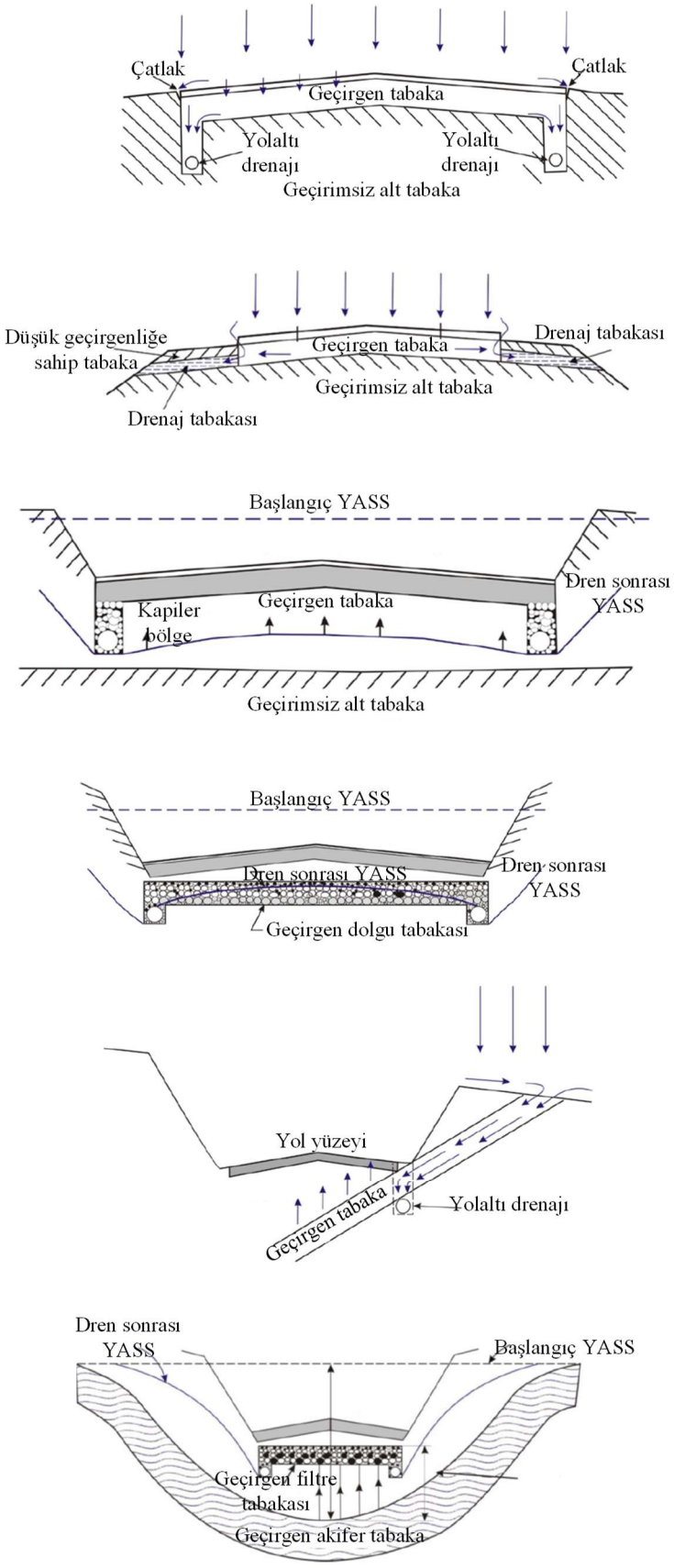
amacıyla yapılacaktır. Bu amaçla;

- Uygun yüzey altı drenaj sisteminin seçimi,
- Uygun dren malzemesinin seçimi,
- Yeterli boyutlandırma

birlikte ele alınarak yüzey altı drenaj yapılarının tasarımı yapılmalıdır.

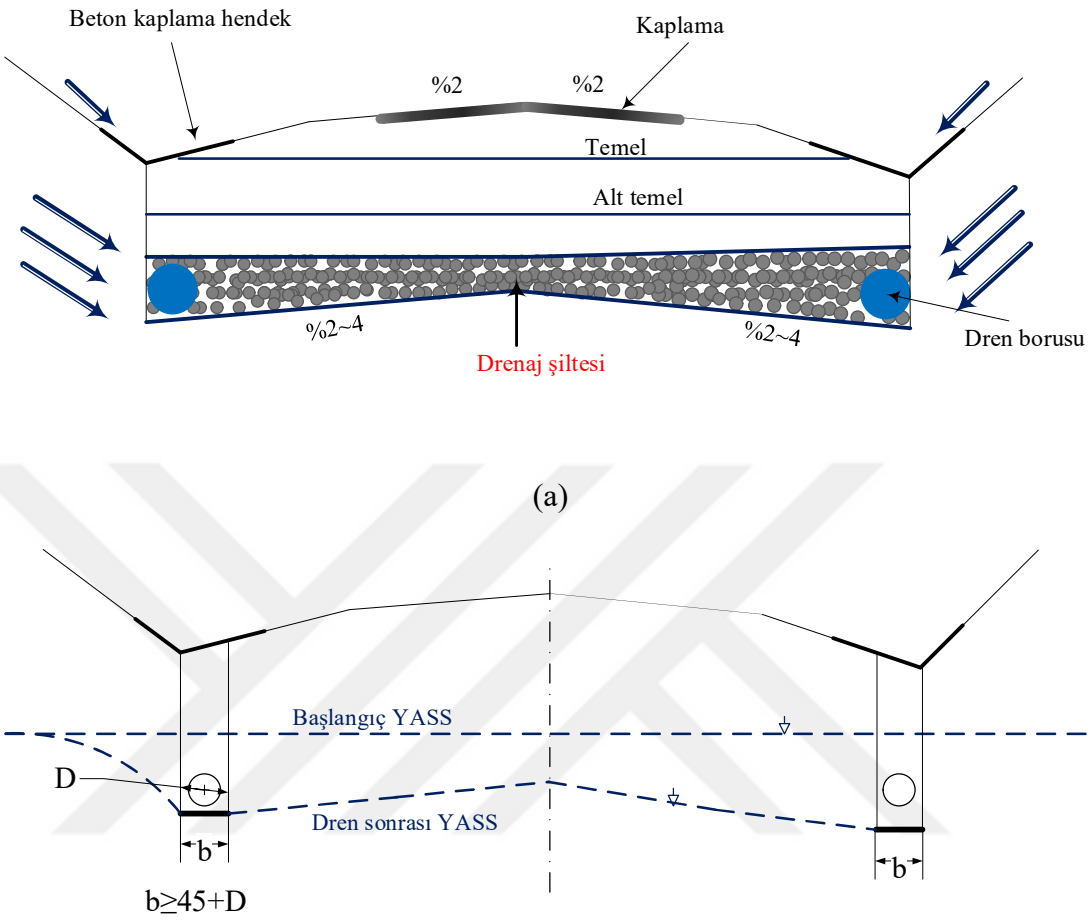
2.2.2.1 Yer altı suyu drenaj tesisleri

Yer altı suyu drenaj tesislerinin tasarımında yolun geçtiği bölgenin topoğrafyası, inşaa edilecek yolda olması muhtemel en yüksek trafik hacmi ve yolun inşaa edileceği bölgedeki ortalama yağış miktarı gibi faktörlerin göz önünde bulundurulması gerekmektedir (Smith, 1967). Yer altı drenaj sistemleri, enine (yatay) dren yapıları ve boyuna dren yapıları olmak üzere iki farklı şekilde inşaa edilebilir. Bunlar fonksiyonel olarak aynı olup yol ekseninin konumuna göre adlandırılmaktadırlar. Yer altı suyunun kontrol altına alınıp yola zarar vermeyecek şekilde uzaklaştırılması için kullanılan tesislerin en yaygın olanları kör drenler, borulu drenler ve kılçık drenlerdir. Yol kaplamasını çevreleyen malzemenin geçirgenliği ve mevcut yer altı su seviyesi, yüzey altı drenaj ihtiyacının ve türünün değerlendirilmesinde önemli bir faktördür. Bunlardan başka daha çok heyelanlı bölgelerde tatbik edilen drenaj galerileri ve yatay drenler ile batak bölgelerinden geçişlerde uygulanan düşey kum drenleri yeraltı suyu drenajında kullanılan diğer tip dren sistemleridir. Çeşitli koşullar için uygun drenaj sistemleri örnekleri Şekil 2.10’ da verilmiştir.



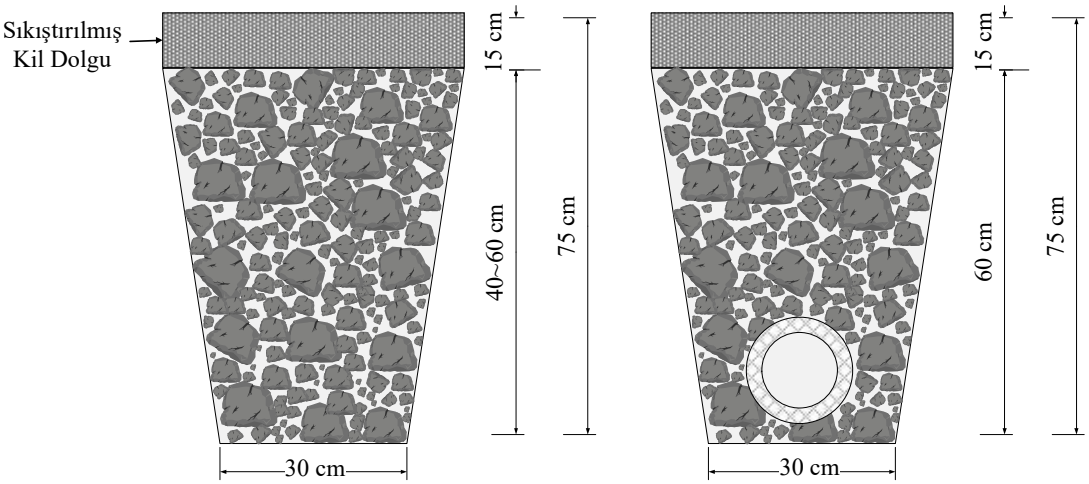
Şekil 2.10 : Yolaltı drenaj uygulamaları (Department of Transport and Main Roads, 2019).

Ayrıca Şekil 2.11 (a)'da yatay dren uygulamalarına örnek olarak drenaj şiltesi, düşey dren uygulamalarına örnek olarak ta drenaj hendek uygulanması verilmiştir.



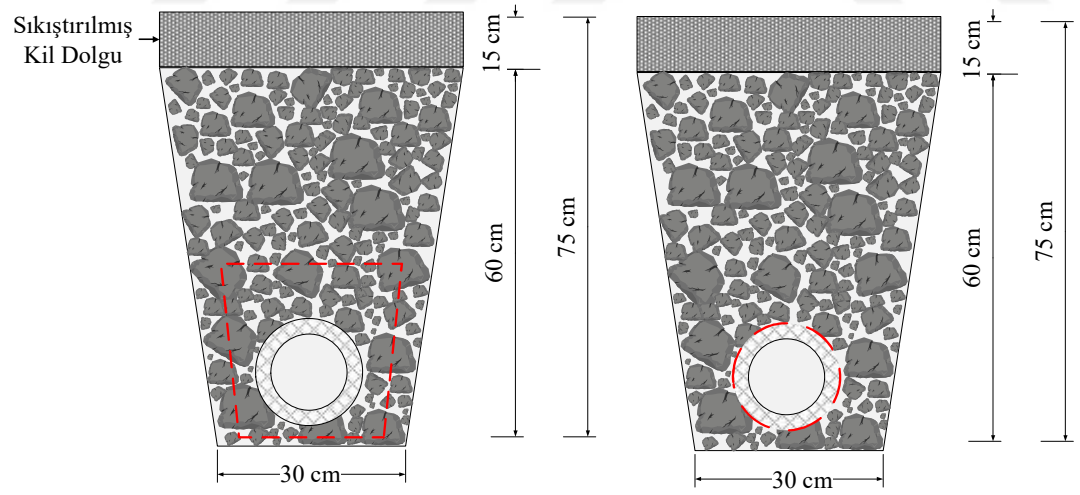
Şekil 2.11 : (a) Yatay dren uygulamalarından drenaj şiltesi. **(b)** Düşey dren uygulamalarından yüzey altı drenaj hendek uygulaması.

Yer altı suyu düzeyinini az miktarda indirilmesinin yeterli olabileceği yerlerde taş dolgulu kör drenlerin kullanılması mümkündür. Bu tip drenlere Fransız tip dren de denilmektedir. Kör dren uygulamasında, kırmataş, çakıl veya cüruftan iriliği aşağıdan yukarıya azalmak üzere dolgu yapılmakta, en üstte de su geçirmez bir malzemeden oluşan bir tabaka inşa edilemektedir. Kör drenler çok dikkatli imal edilse bile zamanla tıkanırlar ve işlevlerini gerçekleştiremez duruma gelebilirler. Bu sebeble drenaj sistemlerinde, kör drenlerin yerine mümkün olduğu kadar borulu drenler kullanılmalıdır. Borulu drenler en çok kullanılan drenaj sistemleridir ve genellikle delikli drenaj boruları ile teşkil edilmektedirler. Şekil 2.12'de kör ve borulu dren örnekleri verilmiştir.



Şekil 2.12 : Kör dren ve borulu dren.

Yeraltı suyunun dren hendeği içinde toplanıp kolaylıkla akabilmesi için dren borusunun tek başına konması yeterli değildir. Böyle bir sistemde boruların sızdırıcılık özelliği deliklerde meydana gelecek tıkanmalar sebebiyle kısa sürede azalır. Bunu önelemek, dren sisteminin ömrünü uzatmak, su akışını kolaylaştırmak amacıyla dren hendeği içine yerleştirilen borunun Şekil 2.13'te görüldüğü gibi iri daneli bir malzeme veya geotekstil ile örtülmesi gerekmektedir.



Şekil 2.13 : Tipik Karayolu Alt Drenaj Sistemi (a)Drenaj borusunun etrafına sarılı geotekstil. (b) Agreganın etrafına sarılı geotekstil.

Yol sistemlerinde, geotekstiller genellikle agrega (drenaj için delikli boruyu kapsüller) ve taban/alt temel (alt tabaka malzemesi) arasında bir filtreleme oluşturmak için kullanılır. Tipik bir karayolu alt drenaj sistemi yol altına yerleştirilmiş perfore bir boru, borunun etrafına deliklerin tıkanmaması için sarılmış geotekstil ve geotekstilin

üzerine serilmiş kaba daneli zeminden oluşur. Hem geotekstil hem de endüstriyel atık malzemeler yıllardır gelişmiş ülkelerde son yıllarda da Türkiye'de sürdürülebilir yol altyapısının tasarımı ve yapımı kapsamında kullanılmaktadır.

2.3 Yol Altı Drenaj Tabakalarını Oluşturacak Malzemelerin Özellikleri

Yer altı suyu drenajında kullanılacak filtre malzemesinin granülometresi drenlerin, su akımının sürüklediği ince malzemeler ile kısa sürede tıkanmasını önleyecek, ayrıca yüksek geçirgenlik gösterebilecek özellikte olmalıdır. Özetle, yol tabanı için önerilen drenaj tabakasının aynı zamanda iki kriteri sağlaması gerekmektedir.

1. Filtrasyon Kriteri: Drenajı sağlayan zemindeki ince danelerinin hareketinin drenaj malzemesini tıkamaması
2. Permeabilite Kriteri: Drenaj malzemesinin suyu geçirebilme özelliğinin olması

Yani drenaj tabakasını oluşturan malzemelerin, dren edilen zemindeki ince malzemelerin hareketini önlemek ve yeraltı suyunun filtre malzemesinin içinden süzülürken zeminin ince malzemeleri tarafından tıkanmasını önlenmek gibi iki ana fonksiyonu aynı anda sağlaması gerekmektedir. Dren edilen zemindeki ince malzemelerin hareketinin önlenmesi yani zeminin iç erozyonu veya borulanmasının önlenmesi (filtre stabilitesi) ve tıkanmayı önleyecek kadar permeabilitenin sağlanması için Ülkemizde, yol altı drenaj tabakalarında kullanılacak malzemelerin taşıması gereken özellikler Karayolları Teknik Şartnamesinde Bölüm 200'de belirtilmiştir. Çizelge 2.1'de filtre malzemesi ve doğal zemin arasındaki ilişki verilmektedir.

Çizelge 2.1 : Filtrasyon kriterleri (Karayolları Teknik Şartnamesi 2013).

Üniform tabii zeminler için filtrasyon kriteri	$D_{15F} \leq 5D_{85Z}$	Zemindeki borulanmadan ötürü filtre malzemesindeki tıkanmayı önlemek amacıyla
İyi derecelenmiş tabii zeminler için filtrasyon kriteri	$D_{15F} \leq 20D_{15Z}$	Filtre malzemesinin permeabilitesini sağlamak ve istenmeyen boşluk suyu basıncını önlemek için
Permeabilite kriteri	$D_{50F} \leq 25D_{50Z}$	Dren malzemesinin iyi bir dane çapı dağılımına sahip olması için

D_{15F} : Filtre malzemesinin %15'inin geçtiği elek çapı, D_{50F} : Filtre malzemesinin %50'inin geçtiği elek çapı, D_{15Z} : Zemin malzemesinin %15'inin geçtiği elek çapı, D_{50Z} : Zemin malzemesinin %50'inin geçtiği elek çapı, D_{85Z} : Zemin malzemesinin %85'inin geçtiği elek çapı

Dren borularının etrafındaki filtre malzemesinin perfore PVC boruların deliklerini ve aralıklı konan beton boruların aralarını tıkamaması veya boruların içine ince kısımların girmesini önlemek için, dren borusundaki D delik çapı ve filtre malzemesinin ağırlıkça %85'inin geçtiği elek çapı $D_{85F} \geq 2D$ şartını sağlaması gerekmektedir. Ayrıca uzun yıllardır yaygın olarak kullanılan poroz beton boru, $D_{15\ (\text{poroz beton boru agregası})} \geq 5\ D_{85\ (\text{poroz beton boru çevresindeki filtre})}$ ve geotekstil filtre içinde $D_{15\ (\text{geotekstil etrafındaki filtre})} > AOS_{(\text{geotekstil deliklerinin eşdeğer gözenek açıklığı})}$ şartlarının sağlanması gerekmektedir.

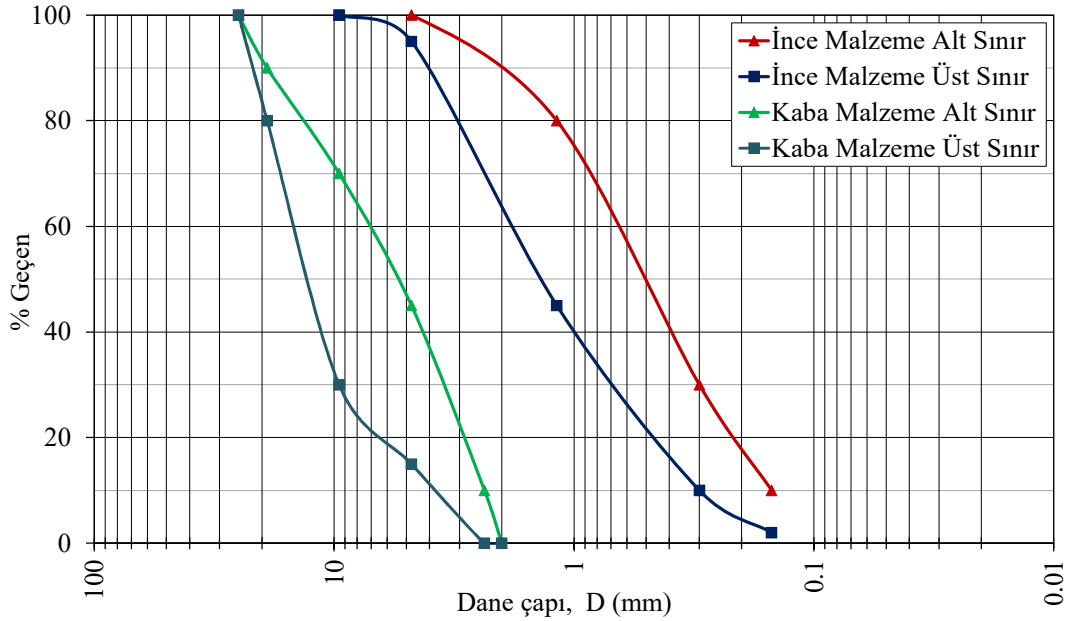
KTŞ'si kısım 313'de orta refüj veya yarma hendeği altında sızıntı sularını almak ve yer altı su seviyesini düşürmek için yapılacak yüzey altı drenajında kullanılacak malzemelerin sağlaması gereken özellikler verilmiştir. Drenaj tabakasında kullanılacak olan ince ve kaba filtre malzemesi için gerekli dane çapı dağılımları Çizelge 2.2'de verilmiştir.

Çizelge 2.2: İnce ve kaba filtre malzemesinin özellikleri (Karayolları Teknik Şartnamesi 2013).

Elek No	Elek Açıklığı (mm)	Geçen Malzeme (%)	
		İnce Filtre Malzeme	Kaba Filtre Malzeme
1"	25	100	100
¾"	19	100	80-90
3/8	9.5	100	30-70
No 4	4.75	95-100	15-45
No.8	2.36	-	0-10
No 10	2.00	-	0
No 16	1.18	45-80	-
No 50	0.3	10-30	-
No 100	0.15	2-10	-

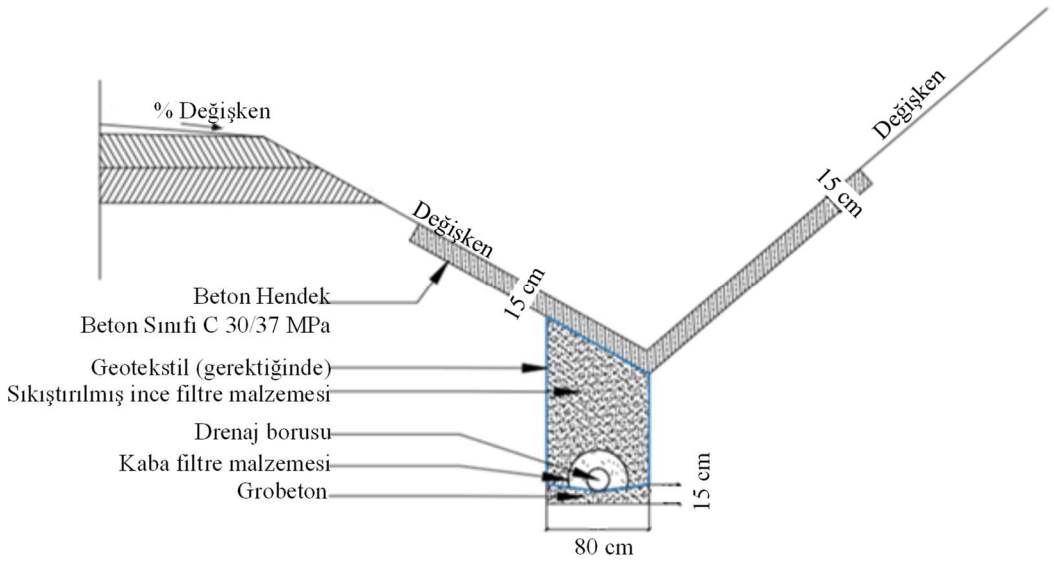
Çizelge 2.2'de kaba veya ince filtre malzemesinin dane çapı dağılım eğrisinde sağlaması gereken alt ve üst limit değerleri verilmiştir. Drenaj filtre malzemesi kaba ve ince filtre malzemesi için dane çapı dağılım eğrisi Şekil 2.14'de verilen grafikteki bölgeler arasında kalmalıdır.

Yeraltı suyu drenaj sisteminde, ince ve kaba filtre malzemesi olarak Çizelge 2.2' de verilen dane çapı dağılımına uygun doğal malzeme veya geri dönüşümlü malzeme filtrasyon ve permeabilite kriterlerinin sağlanması açısından geotekstil bohçalı kırmataşa göre daha uygun olup tercih edilebilir. Filtre malzemesi olarak kullanılacak agreganın No.40 elekten geçen malzeme örneği TS 1900-1'de belirtilen esaslara göre deney yapıldığında, deney sonucu non plastik olmalıdır.



Şekil 2.14 : KTŞ'de tanımlanan drenaj filtre malzemeleri dane çapı dağılım grafiği.

Geotekstiller drenaj hendeklerinde perfore boru etrafına veya hendek etrafına sarılarak kullanılmaktadırlar. Şekil 2.15'de hendek etrafına sarılmış bir geotekstil görülmektedir. Arazi koşulları, uygulama kolaylığı ve seçilen geotekstil tipine göre geotekstilin drenaj sistemlerinde uygulanması farklılık gösterebilmektedir.



Şekil 2.15 : Yol altı drenaj uygulaması kesiti.

Geotekstil kullanımı ile ince filtre tabakası teşkiline gerek kalmamaktadır. Drenaj amaçlı geotekstil Çizelge 2.3'te belirtilen şartları sağlayan, üniform kalınlık ve yüzey dokusuna sahip, örgüsüz, polipropilen ısıl işlemden geçmiş geotekstil olmalıdır.

Çizelge 2.3 : Drenaj amaçlı kullanılan örgüsüz, polipropilen geotekstil tipleri ve özellikleri (Karayolları Teknik Şartnamesi 2013).

Deneyler	Birim	Geotekstil Tipi		Deney Standartı
		Tip-A	Tip-B	
Birim Ağırlık (min.)	g/m^2	Üreticinin beyan ettiği birim ağırlık*		TS EN ISO 9864
Kalınlık 2 kPa Basınç Altında (min.)	mm	Üreticinin beyan ettiği birim ağırlık*		TS EN ISO 9863-1
Çekme Dayanımı (min.) (MD/CMD)	kN/m	10/11	20/25	TS EN ISO 10319
Maksimum Yükteki Uzama (min.) (MD/CMD)	%	50	50	TS EN ISO 10319
Delinmeye Karşı Dayanım (Statik Delme Deneyi) (min.)	N	1.700	3.500	TS EN ISO 12236
Koni Düşürme Deneyi (maks.)	mm	25	10	TS EN ISO 13433
Eşdeğer Göz Açıklığı (min) O_{90}	mm	0.10	0.08	TS EN ISO 12956
Permeabilite, Düzlemde VI H50	m/s	0.09	0.05	TS EN ISO 11058
q	$1/m^2s$	90	50	

MD: (Machine Direction) Üretim Yönü, CMD: (Cross Machine Direction) Üretim Yönüne Dik Yön,
* İmalat boyunca üretilen malzemede homojenlik için bu şart aranacaktır.

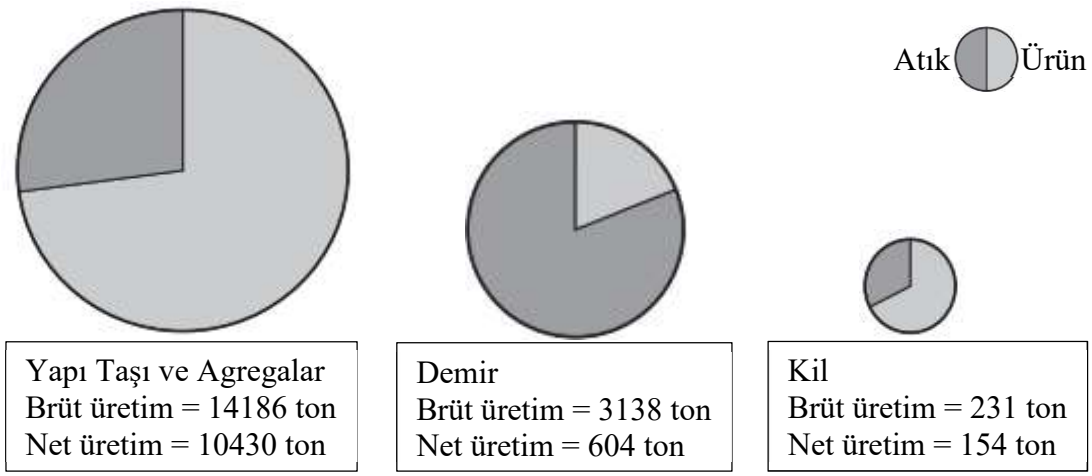
Drenaj borusunun tabanının teşkilinde kullanılacak kaba filtre agregasının dane çapı dağılımı da Çizelge 2.2'de belirtilen esaslara uygun olmalıdır. Boru yatak malzemesi ile yatağın teşkilinden sonra yerleştirilen drenaj borusunun 15 cm üzerine kadar ve açılan drenaj hendeğinin yan yüzeylerine temas etmeyecek şekilde aynı malzeme konulmalıdır. Bu malzeme üzerine yerleştirilecek olan ince filtre malzemesinin dane çapı dağılımı da Çizelge 2.2' de verilen kriterleri sağlamalıdır. Drenaj hendeği içine konulan kaba ve ince filtre malzemesinin toplam minimum kalınlığı 70 cm olmalıdır.

Yüzey altı drenajı tasarımı yapılırken arazi şartları ve maliyet göz önünde bulundurularak imalatta kulanılacak yapı malzemeleri seçilmektedir. TS EN 13242 +A1 "İnşaat Mühendisliği İşleri ve Yol Yapımında Kullanılan Bağlayıcısız ve Hidrolik Bağlayıcılar İçin Agregalar" standartında doğal agrega: mekanik işlem ötesinde herhangi bir işleme tabii tutulmamış olan mineral kaynaklardan elde edilen agrega, yapay agrega: ısıl ve diğer uygulamaları içeren endüstriyel bir işlem sonucu elde edilen mineral kökenli agrega, geri kazanılmış agrega: önceden yapılarda kullanılmış inorganik malzemelerin işlenmesi sonucunda elde edilen agrega olarak tanımlanmıştır (TS EN 13242, 2017).

Karayollarında geri dönüştürülmüş malzemeler tipik olarak alt katmanın iyileştirilmesi için alt taban katmanının bir parçası olarak veya yol yüzeyi için bir temel oluşturmak üzere bir taban katman olarak kullanılma potansiyeline sahiptir. Hem geotekstil hem de geri dönüşüm malzemelerinin karayollarında kullanımları birçok bilimsel araştırmaya konu olmuştur ve araştırmalar sonucunda her iki malzemenin de genel olarak yol sistemlerinde kullanılma uygunluğu gösterilmiştir.

2.4 Karayollarında Kullanılabilme Potansiyeline Sahip Endüstriyel Atık Malzemeler

Atık malzemeler her geçen gün kademeli olarak artarken, bu malzemeleri elden çıkarmak, depolamak sınırlı ve pahalı hale gelmiştir. Atık üretiminin artması ile konut, sanayi ve karayolu yapımında geri dönüşümü teşvik etmek zorunluluk haline gelmiştir. Bu nedenle geri dönüşümünü sağlamak, tekrardan kullanmak yaygınlaşmıştır. Bir tesisin faaliyeti neticesinde oluşan, mineral özellikleri bakımından hammadde ile eş değer özellikte olan atık malzemeler hammadde olarak değerlendirilebilmekte olup bu atık malzemelerin kullanımı ile doğal kaynaklar korunmaktadır. Şekil 2.16'da bazı hammaddelerin üretilmesi prosesinde oluşan atıkların miktarları ile net üretilen hammadde miktarları grafik olarak verilmiştir.



Şekil 2.16 : Dünyada bazı maden üretimleri sonucu oluşan atık ve ürün bilgileri (Ayres ve Ayres, 2019).

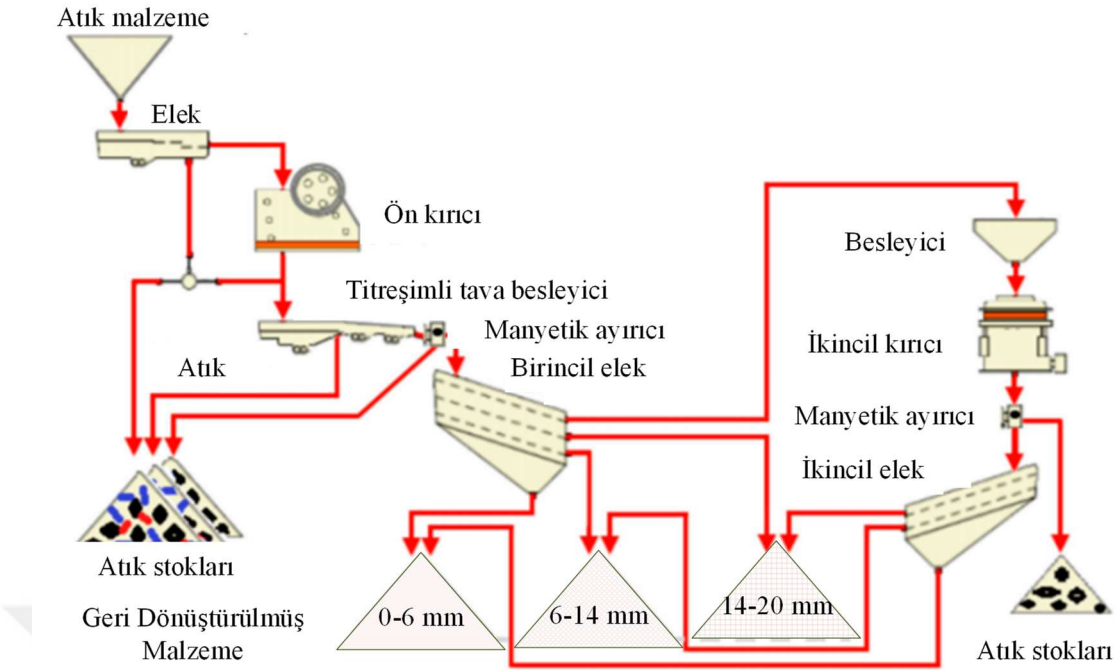
Alternatif hammadde olarak inşaat atıkları, arıtma çamurları, maden atıkları gibi silika, alüminyum, demir oksit ve/veya kalsiyum oksit içeren atıklar çimento, beton, kireç, tuğla, kiremit, seramik ve demir-çelik üretimi yapan tesisler tarafından doğal kaynaklara ikama olarak kullanılmaktadır. Böylelikle oluşan atıkların bertaraf

tesislerine gönderilmesi yerine atık hiyerarşisine uygun olarak mümkün olduğunca yeniden kullanılması veya geri kazanımının yapılması yöntemleri ile ekonomiye kazandırılmakta ve etkin bir şekilde yönetimleri sağlanmaktadır (Val ve Orman, 2005). Atıkların farklı kullanım alanları ile ilgili araştırmalar geçmişten günümüze kadar yapılmış ve yapılmaya devam etmektedir.

Birçok ülkede, karayolu üstyapı tabakalarının yapımı için gerekli olan kaliteli doğal agregaların temini giderek zorlaşmaktadır. Yönetimler, yeni düzenlemeler ile taş ocaklarının açılması ve işletilmesini giderek daha sıkı kurallara tabi tutmaktadırlar. Ayrıca, yerleşim birimlerine yakın olan mevcut ocaklarda ve dere yataklarında kaliteli malzemenin tükenmeye başlaması nedeniyle, yerleşim birimlerine daha uzak bölgelere yönelme söz konusudur. Bu durum nakliye maliyetlerinin giderek artmasına neden olmakta ve yapım maliyetlerini de etkilemektedir. Günümüzde kaliteli ve kısmen maliyetli olan doğal agregaları daha verimli kullanmak gerekli değil zorunlu olmuştur. Bu nedenle, kütlesel miktarda yapı malzemesi gerektiren, yol inşaatı gibi yapım işlerinde endüstriyel atıklar (ikincil agregalar) kullanılarak doğal kaynaklarımızın verimli kullanılması önem taşımaktadır. Çelikhane cürufları, uçucu kül, inşaat ve yıkım atıkları, sökülmüş beton yol kaplamaları, sökülmüş asfalt yol kaplamaları ve gübre fabrikası atıkları yol inşaatında kullanılabilen başlıca endüstriyel atıklardır (Hung ve diğ., 2017).

Endüstriyel atıkların yönetimi genel olarak, katı atık yönetimindeki gibidir. Atıkların azaltılması, kullanılabilir malzemelerin yeniden kullanımı ve geri kazanımı, geri kalan kısmın depolama alanlarında toplanması şeklindeki bir düzen içerisinde değerlendirilebilir. Şekil 2.17' de atık malzemeden geri kazanılmış agrega üreten bir geri dönüşüm tesisi örneği verilmiştir.

Geri dönüştürülmüş malzemelerin karayolu uygulamalarında kullanımı, bu malzemelerin fiziksel ve kimyasal etkileri ile ilgili literatürde bir çok çalışma mevcuttur. Genellikle bu çalışmalarda temel/alt temel, asfalt, otoyol drenaj sistemleri, gürültü bariyerleri veya setler gibi yol yapımının farklı kademelerinde agrega olarak atık malzeme kullanılması durumunda mekanik ve çevresel etkilerini değerlendirmek için çeşitli çalışmalar yapılmıştır (Aiyoub Abbaspour ve diğ., 2016; Arulrajah, Piratheepan, Ali, ve diğ., 2012; Bestgen ve diğ., 2016; Cetin ve diğ., 2010; Cooley ve Hornsby, 2012; Dayioglu ve Aydilek, 2019; Engelsen ve diğ., 2017; Haider ve diğ., 2014; Jahren ve Dong, 2005; Li ve diğ., 2008).



Şekil 2.17 : Atık agrega geri dönüşüm tesisi örneği.

Soleimanbeigi ve diğ. tarafından 2015 yılında yapılan çalışmada döküm kumu (FS), geri kazanılmış asfalt, geri kazanılmış beton (RCA) gibi çeşitli geri dönüştürülmüş malzemelerin tek boyutlu sıkıştırılabilirliği araştırılmıştır, RAP' da dahil olmak üzere bitümlü geri dönüştürülmüş malzemeler, bitümlü olmayan geri dönüştürülmüş malzemelerle karşılaştırıldığında nispeten daha yüksek sıkıştırılabilirlik sergilemişlerdir (Soleimanbeigi ve Edil, 2015). Aydilek ve Edil 2002 yılında, çamur balçık malzeme ve inorganik siltli kum agrega ile 9 farklı örgülü geotekstil kullanarak, ASTM D5101 standardında tanımlanan deney sistemin de uzun süreli filtrasyon deneyleri (LFT) yapmışlardır. Aynı dane çapı dağılımlarına sahip olmalarına rağmen çamur balçık malzeme-örgülü geotekstil, inorganik siltli kum-örgülü geotekstil sistemlerinin uzun süreli filtrasyon deneyi sonuçlarının farklı olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca, geotekstilin eşdeğer gözenek boyutunun tıkanma performansı üzerinde önemli olduğunu ifade etmişlerdir (Aydilek ve Edil, 2002). Kutay ve Aydilek 2005 yılında, uçucu kül ve deniz dibi tarama malzemesi ile farklı gözenek açıklığına sahip dört örgüsüz geotekstil, iki örgülü geotekstil kombinasyonunun, filtrasyon performansını değerlendirmek için, laboratuvarda ASTM D5101 deney sisteminde uzun süreli filtrasyon deneyleri yapmışlardır. Agrega-geotekstil sisteminde farklı lokasyonlara yerleştirilmiş iki farklı geotekstil kullanmanın sistemin filtrasyon davranışını değiştirdiğini belirtmişlerdir (Kutay ve Aydilek, 2005). Abbaspour ve diğerleri,

yaşlandırılmış geri kazanılmış beton agrega-örgüsüz geotekstil kullanarak uzun süreli filtrasyon deneyleri yapmışlardır. RCA-geotekstil sisteminin filtrasyon performansının, doğal agrega-geotekstil sisteminin filtrasyon performansından farklı olduğunu belirtmişlerdir. RCA'daki yaşlanmanın filtrasyon performansını etkilediğini belirtmişlerdir (Abbaspour ve diğ., 2016). Ryoo ve Aydilek (2019) üç farklı kompost malzeme ve farklı gözenek açıklıklarına sahip üç örgülü geotekstil ile iki örgüsüz geotekstilin filtrasyon performansını değerlendirmek için laboratuvarda uzun süreli filtrasyon deneyleri yapmışlardır (Ryoo ve Aydilek, 2020). Bilgen ve diğerleri tarafından 2020 yılında yapılan çalışmada ise geri kazanılmış beton malzemenin geotekstil ile birlikte filtre tabakasında kullanılması durumunda hidrolik uyumluluğunun ve çevresel uygunluğunun belirlenmesi için ASTM D5101 uzun süreli filtrasyon deneyi yapılmıştır (Bilgen ve diğ., 2020).

Kang ve diğ. 2011 yılında yaptığı çalışmada atık asfalt (RAP), atık beton (RCA), uçucu kül (UK) ve döküm kumu (DK) atık malzemelerinden oluşan 17 karışım agreganın karayolu inşaatında baz ve alt taban katmanlarında kullanılmasının uygunluğu değerlendirilmiştir. Bu malzemelerin hidrolik ve mekanik özellikleri (şişme, hidrolik iletkenlik, kesme dayanımı vb.) araştırılmıştır. Geri kazanılmış karışımların su tutma eğrilerinin şekilleri hemen hemen aynı iken, bu karışımların doymuş hidrolik iletkenlikleri doğal agregalardan daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Geri dönüştürülmüş malzeme karışımlarının drenaj özelliklerinin, doğal agregalardan daha iyi olabileceği gösterilmiştir. Belirli oranlarda geri kazanılmış malzemeden oluşan agregalar üzerinde yapılan deney sonuçlarında Genel olarak, RAP, RCA ve UK + RAP' nin doğal agregaya farklı oranlarda eklenmesi ile esneklik modülü (MR) değerlerinde artış olduğu bulunmuştur. Ancak ince dane oranının artması ile MR değerinde azalma olmuştur. Deneysel çalışma belirli RAP, RCA ve UK karışımlarının sertliğinin %100 doğal agregadan oluşan malzemelerden daha iyi olduğunu göstermektedir. Agregalara RAP, RCA ve UK + RAP eklenmesi genellikle kohezyon değerlerini arttırırken, kayma mukavemeti açılarını çoğunlukla dar bir aralıkta (38-49°) değişmiştir. Bununla birlikte, DK'nun doğal agregaya ve karışımlara ilavesi ile kayma mukavemetinde değişim gözlemlenmemiştir. Bu sonuçlara dayanarak, UK, RAP ve RCA karışımlarının, yol temel ve alt taban katmanlarındaki doğal agregalar için iyi ikame olacağı sonucuna ulaşılmıştır .

Aynı şekilde geotekstillerin karayolu drenaj sistemlerinde filtrasyon amacıyla

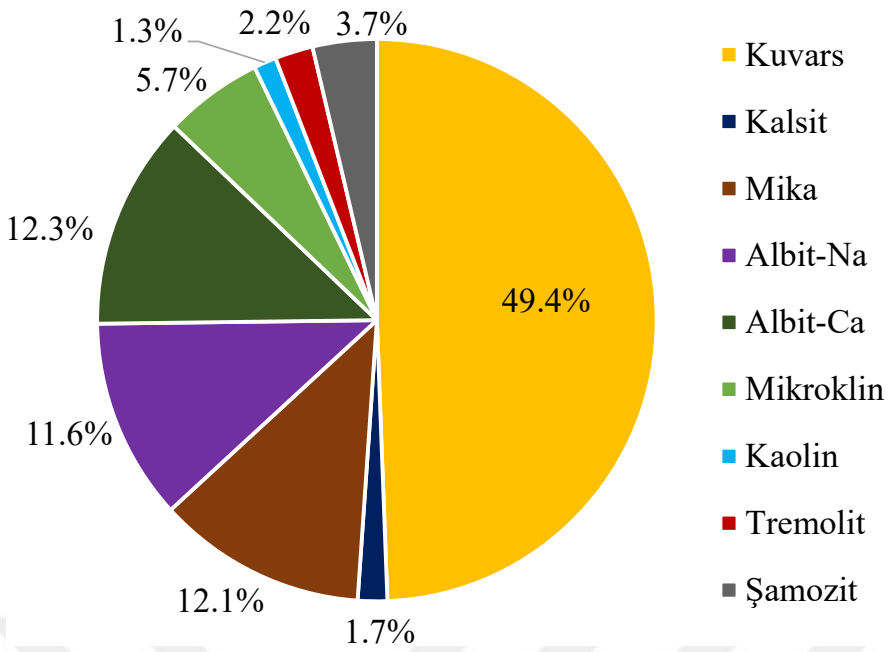
kullanılması hakkında da değişik çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Ancak atık malzemelerin geotekstil ile beraber bir sistem oluşturarak karayolları drenaj sistemlerinde kullanılması hakkında yapılan çalışma çok azdır. Kutay ve Aydilek (2005) uçucu kül ve dip tarama malzemesi kullanarak çift tabaka geotekstilin tıkanma davranışını belirlemeye çalışmış, çift tabaka geotekstil kombinasyonlarının başarılı sonuçlar verdiğini gözlemişlerdir (Kutay ve Aydilek, 2005).

Geri kazanım ürünlerinin yol yapımında dolgu ve alt temel malzemesi, drenaj malzemesi olarak kullanılması ile ilgili bir çok araştırma mevcuttur. Bu bölümde drenaj tabakasında kullanılacak agreganın ve geotekstilin özellikleri ve geri kazanım ürünleri ile ilgili günümüze kadar yapılmış çalışmalar incelenmiştir.

2.4.1 Geri dönüşüm asfalt malzeme

İnşaat endüstrisi atıklarından asfalt malzeme bu sektörde tekrardan ikincil kaynak olarak kullanılabilme potansiyeline sahiptir. Sürdürülebilir malzeme yönetimi için atık asfalt gibi inşaat ve yıkım atık malzemelerinin tekrardan kullanılması çok önemlidir. Sürdürülebilir geoteknik mühendisliği uygulamalarında amaç atık malzemelerin birincil kaynakların yerine kullanılabilmesini sağlamaktır. Böylece doğal kaynaklara talep ve ihtiyaç azalmış olacaktır (Augiseau, 2020).

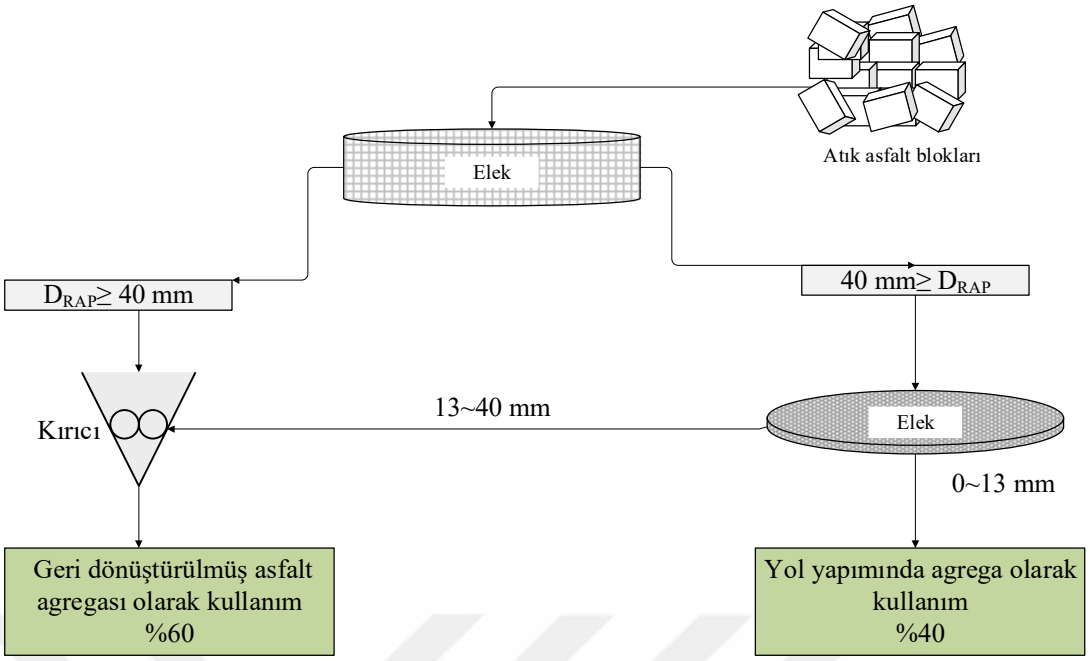
Yol yenileme çalışmaları kapsamında yollardan kazınan asfalt kütleleri mobil kırıcılar vasıtasıyla ufalınıp, asfalt plentlerinde kırılıp tekrardan kullanılmak üzere depolama alanlarına götürülmektedir. Atık asfalt malzeme %96 oranında agrega içermesi nedeni ile tekrardan kullanımı sağlanarak sürdürülebilir malzeme döngüsüne sokulması çok önemlidir. RAP'daki kristal minerallerin oranları Şekil 2.18’ de verilmiştir. RAP malzemenin en önemli bileşeni kuvarstır. Kuvars mineralinin yüksek oranda bulunmasının nedeni elde edildiği kayanın mineralindeki kum içeriği ve tipik bir RAP malzemenin temsili olarak %25 kum, %70 kırma taş ve %5 bitüm içeren bir karışımdan meydana gelmesi olarak açıklanabilmektedir. Ayrıca içeriğinde kalsit, mika, kaolin, şamozit, tramolit, vb. minerallerde bulunmaktadır (Hung ve diğ., 2017) . İçeriğindeki mineraller nedeni ile RAP malzemesi tekrardan kullanılabilme potansiyeline sahiptir.



Şekil 2.18 : RAP malzemesinin mineralojik bileşeni (Hung ve diğ., 2017).

RAP malzemenin tekrar kullanımı ile hem doğal kaynakların korunmasına, hem de bitüm kullanımını azaltarak kaplama maliyetlerinin düşmesine büyük katkıda bulunulmaktadır. Böylece agrega ve bitümden tasarruf sağlanmaktadır. Kullanıldığı yerden sökülen asfalt tabakaları, içindeki bitüm nedeniyle rijit bir yapıya sahip olmamasından, diğer inşaat atıkları beton gibi dolgu vb. başka amaçla değerlendirilememektedir. Sökülmüş asfalt tabakaları, bu özelliği ile geri kazanım için bir avantajdır. Uygulanacak doğru proseslerle yeniden şekillendirilerek geri kazanılması ile yeni asfalt yapımında kullanılabilir ve daha yüksek ekonomik değer yaratılabilmektedir.

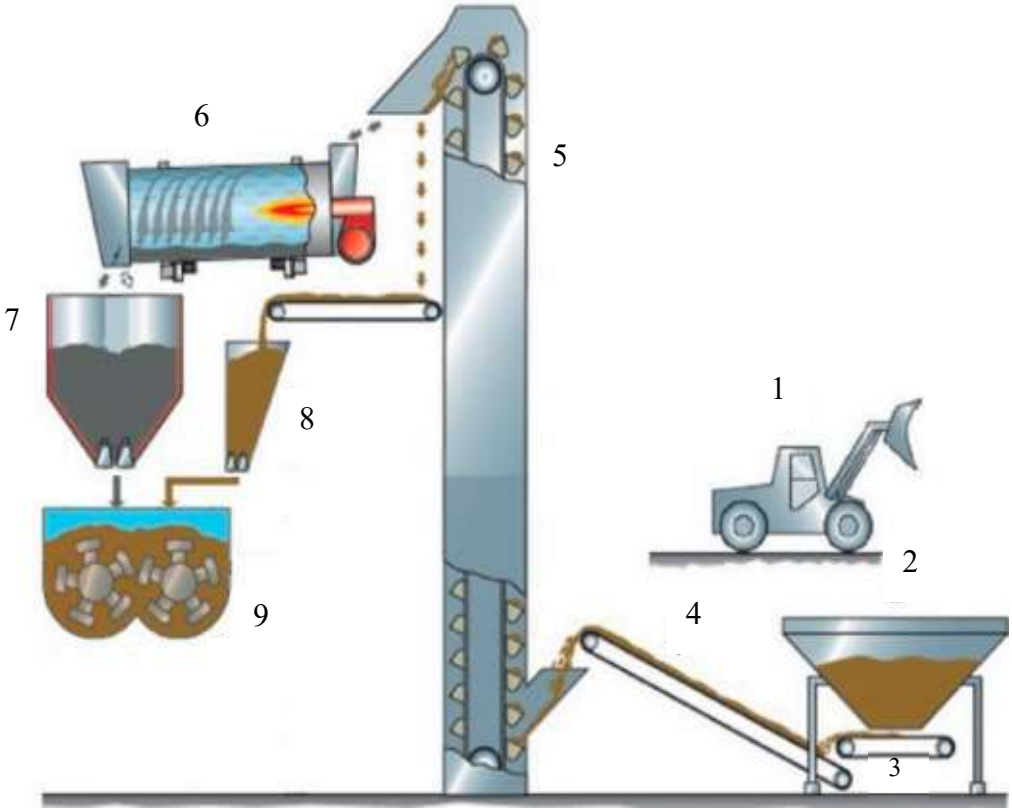
Şekil 2.19'da geri dönüştürülmüş asfalt agregası olarak yeniden kullanılması amacıyla, boyutunu küçültmek için işleme tesisinde atık asfalt bloklarının üzerinde gerçekleştirilen elek ve kırılma aşamaları gösterilmektedir. Geri dönüştürülmüş asfalt agregaları söküm alanında toplandıktan sonra, işleme tesisinde arıtılmaktadır. Bu arıtılma işlemi asfalt ile agregayı ayırmak amacı ile yapılmaktadır. RAP çoğunlukla yeniden asfalt üretmek için asfalt agregası olarak kullanılmaktadır (Borges Cabrera ve diğ., 2017).



Şekil 2.19 : Atık asfalt malzemeden asfalt ve agreganın ayrıştırılması süreci (Borges Cabrera ve diğ., 2017).

Ülkemizde üstyapı iyileştirme faaliyetleri her geçen yıl daha da yoğun bir şekilde gündeme gelmektedir. Bu nedenle eski asfalt atıkların içerisinde bulunan ekonomik değeri yüksek bitümlü bağlayıcı ve agreganın belirli işlemlerden sonra yeniden kullanılması maliyetleri azaltacağı gibi, çevrenin korunması açısından da son derece önemlidir. Bununla birlikte, Türkiye'de, hem agrega rezervlerinin hızla tükenmesi, hem de bitüm yönünden dışa bağımlılık ve çevre problemlerinin daha da önem kazanması ile atık malzemelerin yol yapımında yeniden kullanılması zorunluluğu doğmaktadır.

Asfalt geri dönüşüm ve rehabilitasyon birliği (Asphalt Recycling and Reclaiming Association-ARRA) soğuk geri dönüşüm (cold planing), sıcak geri dönüşüm (hot recycling), sıcak yerinde geri dönüşüm (hot in-place recycling), soğuk yerinde geri dönüşüm (cold in-place recycling) ve tam derinlikten geri kazanma (full depth reclamation) olmak üzere beş farklı geri dönüşüm tekniği tanımlamıştır. Şekil 2.20’ de atık asfalt malzemeden, soğuk ve sıcak geri dönüşüm teknikleri kullanarak geri kazanılmış agrega üreten bir geri dönüşüm tesisi örneği verilmiştir.



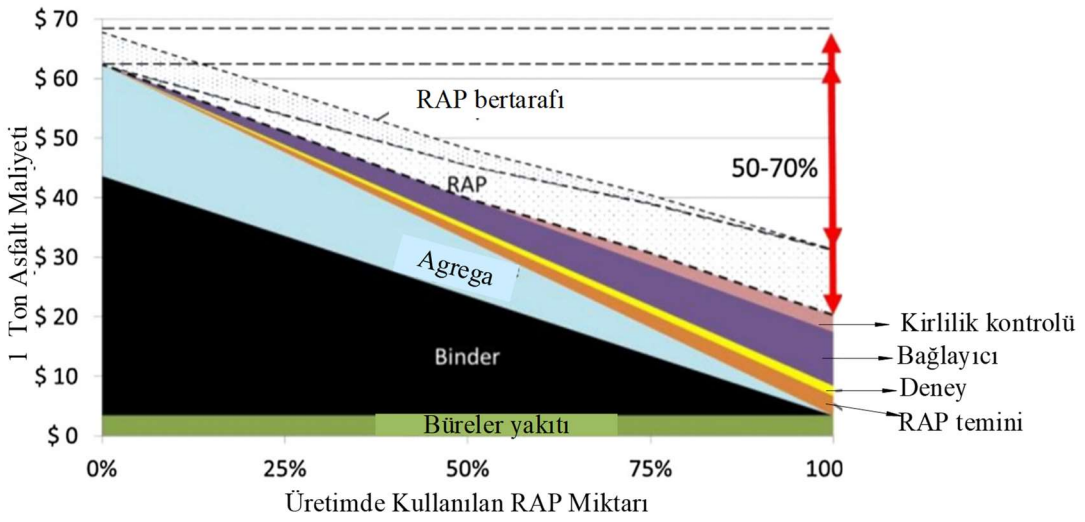
1: Ekskavatör
2: RAP besleyici
3: Bant
4: Konveyör
5: Asansör
6: Paralel tambur
7: Tartı cihazı ve geri dönüşüm kantarı ile geri dönüşüm tampon silosu
8: Tampon silosu ve tartılı bant aracılığıyla soğuk geri dönüşüm ilavesi
9: Mikser

Şekil 2.20 : RAP sıcak ve soğuk geri dönüşümünün teknolojik şeması (www.asphaltpavement.org/recycling).

Birçok faydası nedeniyle, RAP ulaştırma departmanları için doğal agrega yerine kullanılabilme potansiyeline sahip ikincil bir agrega türüdür. Amerika Ulusal Asfalt Kaplama Derneği, geri kazanılmış asfaltı sıcak asfalt üreticisi için çok değerli bir kaynak olarak tanımlamaktadır. Agrega ve sıvı asfalt içeren bu malzeme geri dönüşüm yapılarak kullanıldığında maliyet ve malzeme tasarrufu sağlamaktadır. Araştırmalar, geri dönüştürülmüş kaplamaların %100 doğal agrega ile yapılan kaplamalarla aynı dayanıklılığı sunduğunu, ancak bu yeni malzemelerin geri dönüştürülmüş malzemelerle ikame edildiğinde, tüketiciye önemli ölçüde maliyet tasarrufu sağladığını göstermiştir (NAPA, 2016).

1993 yılında, Çevre Koruma Ajansı ve Amerika Federal Otoyol İdaresi, Amerika'nın bir numaralı geri dönüştürülmüş ürünü olarak asfalt kaplamayı rapor olarak sunmuşlardır. Günümüzde de geri kazanılmış asfalt ABD'deki diğer ürünlerden daha fazla oranda geri kazanılmaya ve yeniden kullanılmaya devam etmektedir. Asfalt kaplamalarda geri dönüştürülmüş malzemelerin kullanımı her yıl yaklaşık 50 milyon metreküp depolama alanı tasarruf sağlamaktadır. Asfalt üreticilerinin geri dönüştürülmüş malzeme ve sıcak karışım asfalt kullanımı konusunda Ulusal Asfalt Kaplama Derneği (National Asphalt Pavement Association, NAPA) ve Federal Otoyol Yönetimi (Federal Highway Administration, FHWA) tarafından yapılan araştırmada, 2016 yılında yeni asfalt kaplamalarda kullanılmak üzere 79 milyon ton asfalt malzemenin geri kazanıldığını açıklanmıştır (www.asphaltpavement.org/recycling).

Literatürde asfalt üretimi için farklı oranlarda RAP malzemesi kullanılması durumunda üretim maliyetlerinin değerlendirilmesi için hesaplamalar yapılmıştır. Hesaplama için 2014 ortasından itibaren ABD, New Jersey'deki malzeme fiyatları kullanılmıştır. Maliyet hesabının zaman içinde değişiklik göstereceği ve kullanılan teknoloji ile yüklenicinin konumuna bağlı olarak değişeceği belirtilmiştir. Örneğin, büyük metropol alanlarında yenileme ve yapım aşamalarındaki RAP'ın depolanması ve imha edilmesi için ilave ödeme yapmak gerekebilmektedir. Kırsal alanlarda ise RAP malzemenin temini zor olabilir ve asfalt üreticilerinin bunu satın alması gerekebilir. Üretilen bir ton asfalt başına malzeme değişimi ile ilgili maliyetlerin hesaplama sonuçları Şekil 2.21'de verilmiştir. Şekil 2.21'den de görüldüğü gibi RAP kullanılabilirliği ile temin edilebilirliğine bağlı olarak %100 RAP karışımının ton başına maliyeti, doğal agrega kullanılarak elde edilen asfalt malzemeye kıyasla %50 ile %70 arasında azaldığı belirtilmektedir (Zaumanis ve diğ., 2016).



Şekil 2.21 : Doğal agrega ve %100 RAP karışımı il elde edilem asfalt malzeme maliyetleri (Zaumanis ve diğ., 2016).

RAP malzemenin yol altı dolgularında kullanılabilirliği araştırılmaktadır ve drenaj tabakalarında kullanılabilirliği de bu araştırmanın bir parçasıdır. Harianto Rahardjo ve arkadaşlarının 2013 yılında yaptıkları çalışmada kötü derecelenmiş çakıl ve kötü derecelenmiş kum sınıflarında yer alan geri kazanılmış asfalt ve geri kazanılmış beton numuneleri üzerinde yaptıkları kayma mukavemeti deney sonuçlarında kötü derecelenmiş çakıl RCA ve kötü derecelenmiş çakıl RAP numunelerinin yoğunluğunun kötü derecelenmiş kum RCA ve kötü derecelenmiş kum RAP numunelerinden daha yüksek olduğundan daha yüksek kesme kuvvetine sahip olduğunu bulmuşlardır (Rahardjo ve diğ., 2013).

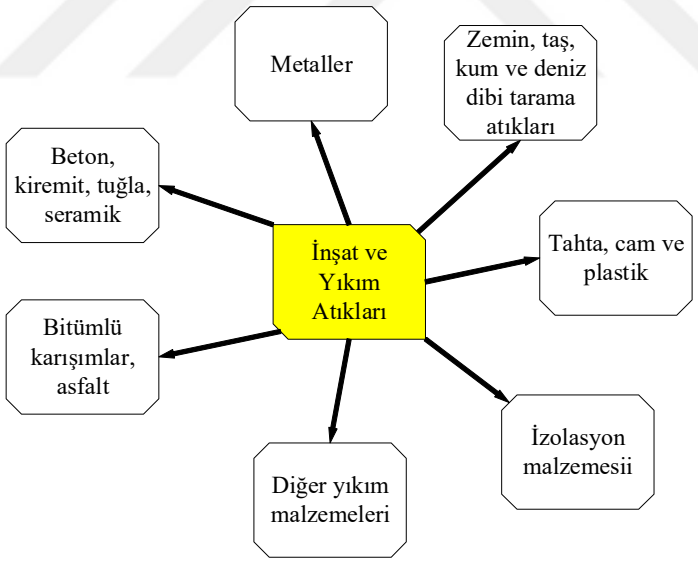
Luca Noferini ve arkadaşlarının 2017 yılında RAP asfalt kaplaması ile yapılan asfalt karışımlarının performansları üzerinde inceleme de farklı oranlarda RAP içeren ve doğal agrega üzerinde deneysel çalışmalar yapmışlardır. RAP içeriği arttıkça penetrasyonda bir azalma ve yumuşama noktasında bir artış olduğunu deney sonuçlarında bulmuşlardır. Penetrasyon ve yumuşama noktasının, karışımdaki RAP içeriğiyle orantılı olarak değiştiğini tespit etmişlerdir (Noferini ve diğ., 2017).

Ali Soleimanbeigi ve Tuncer B. Edil, Dist.M. tarafından 2015 yılında yapılan "Karayolu Dolgu Malzemesi Olarak Kullanım için Geri Dönüşümlü Malzemelerin Sıkıştırılabilirliği" başlıklı çalışmada döküm kumu (DK), geri kazanılmış asfalt (RAP), geri kazanılmış beton (RCA) gibi çeşitli geri dönüştürülmüş malzemelerin tek boyutlu sıkıştırılabilirliğini araştırmışlardır ve deney sonuçlarından; bitümlü geri dönüştürülmüş malzemelerin sıkıştırılabilirliğinin bitüm olmayan geri dönüştürülmüş

malzemelerin sıkıştırılabilirliğinden daha fazla olduğunu, artan sıcaklık ile RAP malzemenin sıkıştırılabilirliğinin arttığını bildirmişlerdir. Ayrıca RAP gibi bitüm içeren malzemelerin kullanımının, termal önyükleme ve uzun süreli yerleşimi azaltmak için yaz aylarında tercih edilmesini önermişlerdir (Soleimanbeigi ve Edil, 2015).

2.4.2 Geri dönüşüm beton malzeme

Yıkılan yollardan ve binalardan kaynaklanan inşaat atıklarının yeniden kullanılması çevre dostu bir çözüm olarak kabul edilmektedir. AB inşaat ve yıkıntı atıklarını Şekil 2.22'de görüldüğü gibi yedi sınıfa ayırmıştır. Bu yedi sınıftan geri dönüştürülmüş beton agregaları (RCA) ve geri kazanılmış asfalt kaplamalar (RAP) yol yapımında ve zemin hazırlıklarında en çok kullanılanlardır RCA ve RAP kullanımı dünyanın çoğu yerinde yaygın hale gelmiştir. ABD'de, üretimin yaklaşık %70'i yol yapımı için kullanılırken, Japonya'da geri dönüştürülmüş betonun yaklaşık % 96'sı yapısal yolların alt temeli olarak kullanılmıştır, Avustralya'da inşaat sektöründe beton ve asfaltın geri dönüşüm oranı sırasıyla %96 ve %99 olarak verilmiştir.

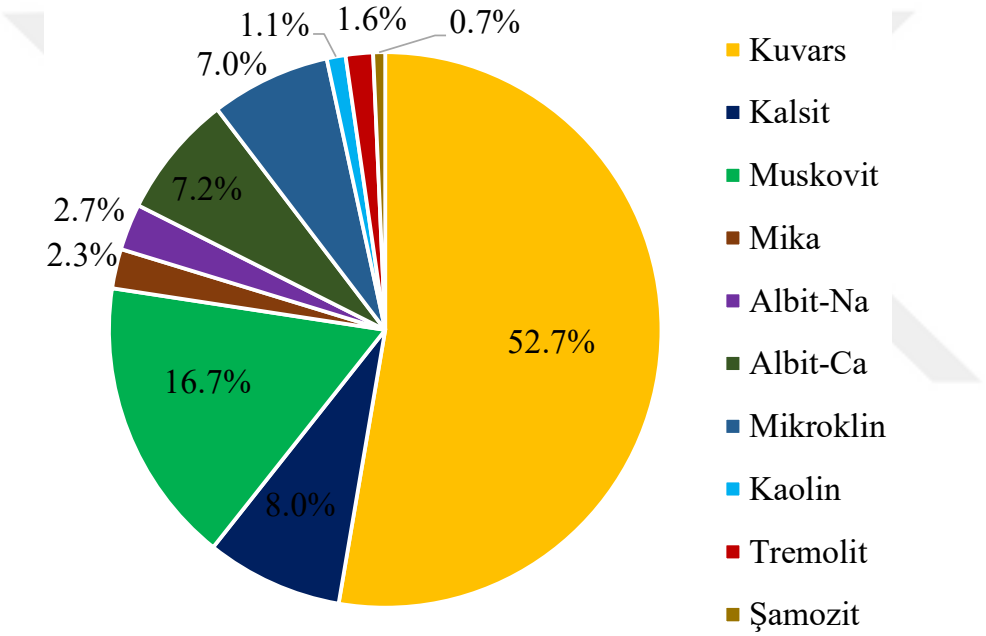


Şekil 2.22 : İnşaat ve yıkım atıklarının sınıflandırılması.

İnşaat ve yıkıntı atıkları içerisinde ağırlıkça en büyük payı beton atıkları oluşturmaktadır (Behera ve diğ., 2014; Demir, 2009; The U.S. EPA Municipal and Industrial Solid Waste Division Office of Solid Waste, 1998). Her bir metreküp betondan yaklaşık olarak 0.60 metreküp beton geri dönüştürülmektedir. Betonun ağır

matriksli yapısı, bozulmaması veya çok az güç ve performans kaybına uğraması ideal bir geri dönüşümlü malzeme olmasını sağlamaktadır.

RCA'daki kristal minerallerin oranları Şekil 2.23' de verilmiştir. RAP malzemede olduğu gibi RCA malzemenin de en önemli bileşeni kuvarstır. Ayrıca içeriğinde kalsit, mika, kaolin, şamozit, tramolit, vb. minerallerde bulunmaktadır, RAP malzemeden farklı olarak RCA malzemede muskovit mineralide bulunmaktadır. RCA malzemedeki muskovit mineralinin varlığının nedeni beton atık malzeme içinde bulunan tuğla ve kaya varlığıyla ilişkili olduğu belirtilmiştir (Hung ve diğ., 2017) . İçeriğindeki mineraller nedeni ile RCA malzemesi de RAP gibi tekrardan kullanılabilme potansiyeline sahiptir.

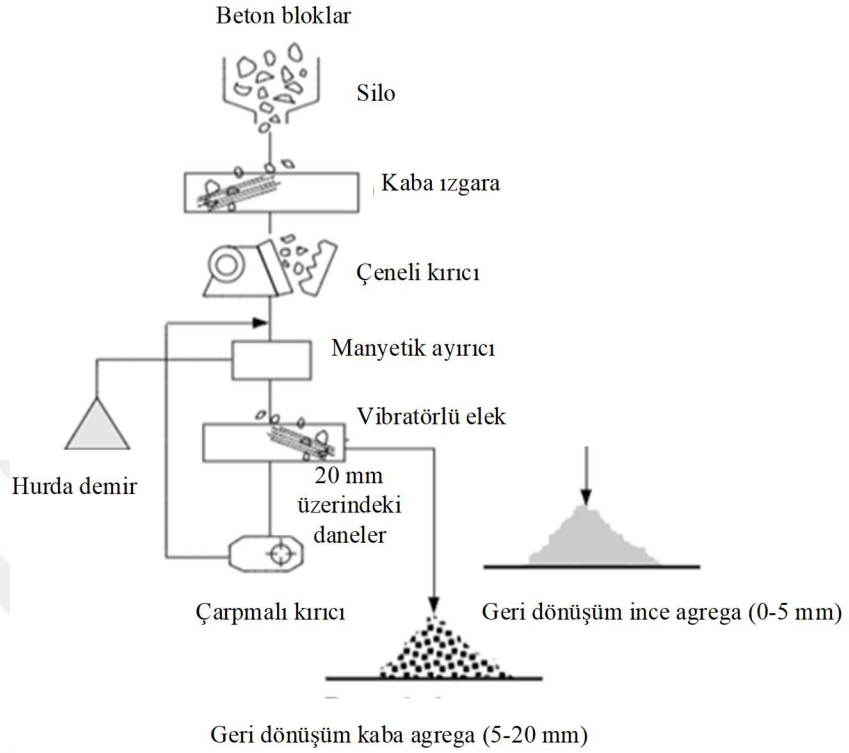


Şekil 2.23 : RCA malzemesinin mineralojik bileşeni (Hung ve diğ., 2017).

Kentsel dönüşüm, doğal afet yıkıntılarından, yangın sonucu oluşan yıkıntılardan, ulaşım sistemi ile ilgili çalışmalardan, bozuk beton üretiminden, kalite kontrol numunelerinden, tadilat ve tamirat faaliyetleri, vb. faaliyetler sonucu oluşan beton atıkları, geri kazanım tesislerinde alt yapı malzemesi olarak kullanabilmek için geri dönüştürülebilmektedir (Cardoso ve diğ., 2016). Şekil 2.24' te beton geri dönüşümü örneği verilmiştir.

Atık beton, kırıcılarda istenilen boyutlara getirilmekte, ürün kırıcıdan eleğe geçmeden önce, kırıcı üzerinde bulunan mıknatıs ile demir malzemelerin ayrıştırılması yapılmaktadır. Ayrıştırılması yapılan malzemeler ürün stok alanında stoklanmakta ve

sonradan talep edilen alanlarda kullanılarak sürdürülebilir malzeme yönetimine katkıda bulunulmaktadır.



Şekil 2.24 : Beton geri dönüşümü.

Geri kazanılmış beton agregasının (RCA), karayolunda doğal agreganın yerine kullanılabileceği belirtilmektedir (Aydilek ve diğ., 2017). Geri kazanılmış beton malzemenin ihtiva ettiği doğal agrega miktarı düşünüldüğünde bu çok şaşırtıcı değildir. RCA'nın mekanik ve çevresel özelliklerini değerlendirmek için yapılan araştırmaların çoğu, bu malzemenin yol uygulamaları için uygun özellikleri konusunda hemfikirdir.

Düşük üretim maliyeti ve zaman tasarrufu ile sürdürülebilirlik ve politik baskılar, karayolu uygulamalarında geri kazanılmış beton malzemesinin kullanımında önemli bir artışa neden olmuştur (Cooley ve Hornsby, 2012; Tanyu, 2012). Avrupa ülkelerinde geri dönüştürülmüş beton agregalar inşaat mühendisliğinin çeşitli uygulamalarında çok sık kullanılmaktadır. Literatürde RCA malzemenin kimyasal yapısı ve inşaat mühendisliğinin farklı alanlarında kullanımı ile ilgili çok fazla çalışma yapılmıştır ve yapılmaya devam etmektedir.

Geri kazanılmış beton agregasının, karayolu yapımında farklı aşamalarda doğal agreganın yerine en çok kullanılan geri kazanılmış malzeme olduğu bilinmektedir

(Aydilek ve diğ., 2017). RCA'nın mekanik ve çevresel özelliklerini değerlendirmek için yapılan geçmiş araştırmaların çoğu, bu malzemenin yol uygulamaları için uygun özellikleri taşıdığı konusunda hemfikirdir (Arulrajah ve diğ., 2012; Bestgen ve diğ., 2016; Cooley ve Hornsby, 2012; Engelsen ve diğ., 2017; Haider ve diğ., 2014)

Geri kazanılmış beton (RCA) malzemenin karayolu inşaatındaki kullanım alanlarından biri de drenaj sistemleridir. Drenaj sistemlerinde RCA malzemenin kullanımı ile ilgili de araştırmalar yapılmaktadır. Yapılan çalışmaların bir kısmında RCA'nın muhteviyatındaki kalsit nedeni ile geotekstilde veya diğer drenaj sistemi elemanlarında kalsit çökeltisinin birikmesine bağlı olarak tıkanma oluşabileceği bu nedenle de drenaj sisteminin geçirgenliğinin azalacağı ve işlevini yerine getiremeyeceği çekincesi bildirilmiştir. RCA'nın farklı uygulama alanlarında kullanımını teşvik etmek için fiziksel ve kimyasal özelliklerinin net bir şekilde belirlenmesi gerekmektedir. Özellikle drenaj yapılarında kullanılması durumunda uzun vadede kalsit çökelmesi nedeni ile oluşabilecek tıkanma potansiyelinin belirlenebilmesi için hızlandırılmış kalsit çökeltme (ACP) prosedürü kullanılarak araştırmalar yapılmıştır. Yapılan araştırmalarda geri kazanılmış beton malzemesinin ihtiva ettiği ince malzeme niktarının artması ile kalsit çökelmesinin arttığı bildirilmiştir. Çökelen kalsit miktarı RCA'nın kimyasal özelliğine ve depolama koşullarına bağlı olarak değişebilmektedir. Örneğin, uzun süre açık alanda depolanmış geri kazanılmış beton malzemesinde yağmur nedeni ile kalsit çökeltisine neden olan malzemenin yıkanmasından dolayı uygulamada daha az kalsit çökeltisi oluştuğu tespit edilmiştir. Bir RCA mazlemesinde önemli ölçüde kalsit çökelmesi meydana geliyorsa, özellikle drenaj sistemlerinde kullanımı öncesi yıkanarak yaşlandırılması gerekmektedir. Geri kazanılmış beton malzemede bulunan başlıca elementler Çizelge 2.4'de görüldüğü gibi betonun ana kimyasal bileşenleri oksijen (O), karbon (C) ve kalsiyum (Ca) olarak belirtilebilmektedir. Ayrıca RCA'nın kimyasal birleşiminde silikon (Si) ve alüminyum (Al), demir (Fe) ve sodyum (Na) mineralleride bulunmaktadır. Ayrıca çizelge 2.4'teki minerallerden geri kazanılmış beton malzemenin ana mineral birleşiminin kalsit ($CaCO_3$) ve kuvars (SiO_2) olduğu söyelenebilir. Bu da RCA'nın esas olarak hidratlanmış çimento, kum ve kireçtaşından oluştuğunu doğrulamaktadır. RCA'nın toplam uçucu içeriğini (LOI) belirlemek için 1000°C'de etüvde kurutulmuştur. Geri kazanılmış beton malzemenin LOI'nin doğal agregadan daha yüksek olduğu belirlenmiştir, bu da çimento hamuruna bağlı veya

hapsolmuş su miktarının doğal agregadan çok daha yüksek olduğunu gösterir (Nam ve diğ., 2016).

Çizelge 2.4 : RCA malzemesinin kimyasal içeriği (Nam ve diğ., 2016).

Element	Ağırlıkça %
Oksijen (O)	35.12
Karbon (C)	20.79
Alüminyum (Al)	2.30
Silisyum (Si)	7.15
Kalsiyum (Ca)	24.62
Demir (Fe)	1.63
Sodyum (Na)	0.18
LOI (Loss on Ignition)	8.21

Yapılan araştırmalar, RCA malzemesinin depolanma koşullarına (yağmur ve aşırı ısı gibi atmosferik koşullara maruz kalması, sıkça ıslanması veya kurutulması, daha soğuk bölgelerde donma ve çözülme meydana gelmesi) bağlı olarak kimyasal yapısında değişim olduğunu açıkca göstermiştir. Bu koşullar altında zamanla RCA'nın kimyasal özelliklerinde meydana gelen değişiklikler daha önce birçok araştırmacı tarafından incelenmiştir.

Ülkemizde, 2012 yılında çıkan 6306 sayılı 'Afet Riski Altındaki Alanların Dönüştürülmesi Hakkında Kanun' ile riskli bulunan yaklaşık 6~7 milyon yapının yıkılması planlanmış ve yıkım çalışmaları hala devam etmektedir ve inşaat ve yıkıntı atıklarının miktarı her geçen gün artmaktadır. Çevreye olan etkileri açısından, inşaat endüstrisi tarafından üretilen katı atıkların depolama maliyetlerini düşürmesi, atık depolama gereksinimini azaltması, inşaat için zeminden elde edilen doğal kaynakların kullanımını azaltması, atık malzemelerin daha çok değerlendirilmiş olması, enerji israfını azaltması ve sürdürülebilirliğin artması gibi olumlu etkileri nedeniyle geri dönüştürülmüş agrega kullanımı tercih edilebilmektedir (Ok ve diğ., 2020). Ülkemizde miktarı her gün katlanarak artan inşaat ve yıkıntı atıklarından kaynaklanacak olan çevre sorunlarının giderilmesi, kısıtlı depolama sorununa katkı sağlanması ve bu atıkların ekonomik faydaya dönüştürülmesi amacıyla 2013 yılında Altyapı ve Kentsel Dönüşüm Hizmetleri Genel Müdürlüğü, İnşaat ve Yıkıntı Atıklarının Değerlendirilmesi Projesini yayımlamıştır. Kullanımdaki artış ile birlikte, mekanik kaliteyi ve çevresel uygunluğu teyit etmek için detaylı araştırmalar, RCA'nın

uzun vadeli performansıyla ilgili soruları cevaplamak için çok önem kazanmıştır (Cooley ve Hornsby, 2012; Soleimanbeigi ve Edil, 2015).

Beton atıklarının; agrega malzemesi olarak yeniden kullanılmasına yönelik fiziksel ve kimyasal özelliklerini belirlemek için çok sayıda çalışma yapılmış ve yapılmaya devam etmektedir. Düşük üretim maliyeti, zaman tasarrufu ve sürdürülebilirlik sağlandığı için karayolu uygulamalarında geri dönüşümlü beton malzemesinin kullanımına yönelik araştırmalar yapılmaktadır (Abbaspour ve diğ., 2018; Cooley ve Hornsby, 2012). Geri dönüşüm malzemelerin yol inşaatında kullanımındaki artış ile birlikte, mekanik kaliteyi ve çevresel uygunluğu teyit etmek için detaylı araştırmalar, geri dönüşüm malzemenin uzun vadeli performansıyla ilgili araştırmalar yapılmaktadır (Cooley ve Hornsby, 2012; Sanger ve diğ., 2020). Geri kazanılmış beton (RCA) malzemenin fiziksel ve mekanik özelliklerini belirlemeye yönelik yapılan araştırmalarda RCA'nın yol yapımı için uygun özelliklere sahip olduğu konusunda hemfikirdir (Arulrajah ve diğ., 2012; Soleimanbeigi ve Edil, 2015). Amerika Karayolları Otoriteleri tarafından 2016 yılında yayınlanan bir araştırmada, geri dönüştürülmüş beton agreganın (RCA), karayolunda temel yol/alt taban katmanında doğal agrega kullanımının yerini alması için en çok kabul gören malzemelerden biri olduğu bildirilmiştir. Gupta ve Kneller (1993) tarafından yapılan araştırmada tüfsü malzemenin kuzeydoğu Ohio'da karayolları boyunca drenaj kanallarını tıkadığını gözlemlemişlerdir. Önceki çalışmalar, alt temel malzemelerinde bulunan serbest kirecin (CaO) tüf birikiminin kaynağı olduğunu göstermektedir. Dokuz farklı ocaktan elde edilen çelik cüruflarının ve iki farklı geri kazanılmış beton malzemenin tüf çökeltisini değerlendirmek için araştırmalar yapmışlardır. RCA alanlarından toplanan tüf örneklerinin daha az kalsiyum karbonat içeriğine sahip olduklarını tespit etmişlerdir. Snyder (1995) ve Snyder ve Bruinsma (1996) RCA agregası ve geotekstil sisteminin tıkanmasıyla ilgili endişelerini belirtmişlerdir. RCA agregasından sızan kalsiyum çökeltisi nedeni ile arazi alanlarından çıkarılan geotekstillerin geçirgenliğinde bir azalma olduğunu belirtmelerine rağmen geçirgenlik değerlerindeki azalmanın RCA' dan kalsiyum bazlı iyonların sızmasının doğrudan bir sonucu olduğunu gösteren güçlü kanıtlar sunulamamıştır. Beton atıklarından üretilen geri kazanılmış agregaların fiziksel, kimyasal ve mineralojik özellikleri üzerine yapılan çalışmalarda kalsit ($CaCO_3$), en çok incelenen faz olup, incelenen RCA' ların yüksek

oranda karbonatlı olduğu görülmüştür. Kuvars ve feldispatlar da örneklerde bol miktarda bulunmuştur (Evangelista ve diğ., 2015).

Sadecki ve diğ. (1996), bir depolama alanında üç farklı stok bulunduğunu ve bu stoklardan toplanan sızıntı suyunun bir yıl boyunca izlendiğini ve incelendiğini araştıran bir çalışmanın sonuçlarını bildirmişlerdir. Sızıntı suları üzerinde yapılan analizler sonucunda elde edilen parametreler arasında sınırlayıcı olmamak koşuluyla pH, iletkenlik, asılı katılar, uçucu katılar, alkalinite, kalsiyum, magnezyum, alkali elementlerin ve ağır metallerin varlığı tespit edilmiştir. Kimyasal analiz sonuçları, zamanla RCA stokları için sızıntı suyunun pH'sında azalma olduğunu göstermiştir (iri RCA için 10.5'den 9.7'ye ve ince RCA için pH 12'den 9.5'e). Toplanan atık partiküllerinde ise alkali elementlerin ve toplam katıların süzülmesi eğilimi gözlemlenmemiştir. İstatistiksel analiz, beton atıkların toplam katı madde konsantrasyonu ile her bir olaydaki yağış miktarı arasında bir korelasyon olmadığını göstermiştir. Bununla birlikte kaba RCA'dan ağır metallerin ve magnezyumun (ortalama değer) süzülmesinin genellikle ince RC 'dan daha yüksek olduğu ve iri RCA yerine ince RCA için kireç içeriğinin daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Steffes (1999), damıtılmış suyun düzenli aralıklarla RCA malzemesi içeren bir kutu içerisinden akmasına ve her bir döngüden sonra malzemenin kurumasına izin vererek deneyler gerçekleştirmiştir. Kutulardan toplanan suyun pH değerleri haftalık olarak bir yıl süre boyunca kaydetmiştir. Deneylerin sonuçları, RCA kutularından toplanan suyun pH değerlerinin 12.5 aralığına yükseldiğini ve bir yıl sonra pH'ın 11.5 değerine kadar düştüğü tespit edilmiştir. Sızıntı suyunun pH'ındaki azalma ve yaşlanmaya maruz kalan RCA materyalinden farklı elementlerin sızdırma konsantrasyonundaki değişiklikler birçok araştırmacı tarafından da bildirilmiştir ve bu değişiklikler genellikle RCA' da karbonasyon oluşumuna bağlanmıştır (Engelsen ve diğ., 2017; Özkök ve diğ., 2016).

RCA'nın stoklama koşullarına bağlı olarak karbonasyon sürecinde (yaşlanma) oluşabileceği belirtilmiştir (Cardoso ve diğ., 2016). RCA örneklerinin 1, 7 ve 28 gün süreyle nem odasında (sıcaklık 21 ± 2ºC ve% 98 bağıl nem ile kontrollü olarak) bekletildiği bir çalışmada, ürlenme sonrası RCA'nın pH'ı ve Ca, Cr, Cu ve Fe'nin toplam konsantrasyonları ölçülmüştür. Sızıntı suyunun pH'ının kürlenme süresine bağlı olarak değiştiği, Ca, Cr ve Cu'nun toplam süzülen konsantrasyonlarının kürlenme süresinin artması ile azaldığı, fakat Fe konsantrasyonun da böyle bir eğilimin olmadığı

tepit edilimştir (Özkök ve diğ., 2016). pH ve çeşitli elementlerin süzülmüş konsantrasyonları üzerinde etkili olduğu düşünülen bir diğer önemli parametre, RCA içindeki parçacık boyutu değişimi ve agregadaki ince daneli malzemenin varlığıdır. Tamirisa (1993), farklı parçacık boyutlarına sahip RCA agregasının pH'sının birbirine çok yakın olduğunu belirtmiştir. Bununla birlikte, ince daneli RCA malzemesinde elektrik iletkenliğinin kaba daneliden çok daha yüksek olduğunu tespit etmiştir. Chen ve diğ. (2012), çakıl boyutlu (75-4.75 mm), kum boyutlu (4.75-0.075 mm) ve toz (<0.075 mm) olarak ayrılmış olan dökme ve ayrıştırılmış RCA numunelerinden toplanan sızıntı suyunun pH değerini incelemişlerdir. ABD'deki 7 farklı eyaletten toplanan RCA'daki sonuçlar, çakıl ebatlı RCA malzemenin sızıntı suyunun pH'ının genellikle toplu numunenin pH'ına çok yakın olduğunu ve daha ince daneli RCA'nın pH'ından (kum boyutlu ve ince tozlar) daha yüksek olduğunu göstermiştir. Chen ve diğ. (2012) Cr, Cu ve çinko gibi bazı eser metallerin serbest bırakılmasının parçacık boyutuna bağımlı olduğunu göstermiştir (ince danelilerde daha yüksektir). Aydilek (2015) RCA malzemesinin sızıntı suyunun pH'ının ve Ca konsantrasyonunun partikül boyutlarından bağımsız olduğunu göstermiştir. Ayrıca RCA sızıntı suyundaki Cu ve Fe minerallerinin numunenin parçacık boyutundaki artış ile azaldığını tespit etmişlerdir. Kang ve diğerleri, yol altı drenaj sistemlerinde geri kazanılmış beton malzemenin kullanımına yönelik fiziksel ve kimyasal deneyler yapmışlardır. Laboratuvar sabit seviyeli permeabilite deneyi sonucu elde edilen permeabilite değerlerinin ince dane miktarından etkilendiğini göstermişlerdir. Geri kazanılmış beton numunelerinin kalsit çökeltilerini belirlemek için yapılan deneylerde, kireçtaşına kıyasla daha fazla olduğunu belirlemişlerdir. Fakat deneysel çalışmalarda elde ettikleri verilerde bu durumun filtre tıkanmasında ihmal edilebilir bir etkiye sahip olabileceğini ifade etmişlerdir. RCA malzemenin tıkanma ve geçirgenlik performansını ince daneli malzeme miktarının daha fazla etkilediğini belirtmişlerdir. Ayrıca geri kazanılmış beton-geotekstil drenaj sisteminde, geotekstilin görünür gözenek boyutunun (AOS), yol altı drenajının tıkanma potansiyeli üzerinde büyük bir etkiye sahip olduğunu belirtmişlerdir (McCulloch ve diğ., 2017). Abbaspour ve diğ. (2016) geri kazanılmış beton agregasının karayolu alt drenaj sistemlerinde kullanımı üzerine gerçekleştirdiği çalışmasında farklı yaşlardaki RCA örneklerinin tek tabaka örgüsüz geotekstilin filtrasyon performansına fiziksel ve kimyasal etkisini incelemişlerdir. Fiziksel olarak RCA malzemesinin doğal agrega malzemesi ile karşılaştırıldığında tıkanma davranışı bakımından oldukça karşılaştırılabilir bir performans gösterdiği, kimyasal olarak ise

sahada beklemiş (yaşlandırılmış) RCA malzemesinden sızan metal konsantrasyonlarının bekleme esnasında oluşan karbonasyon sebebiyle taze (yeni üretilmiş) RCA malzemesine göre daha az olduğunu bildirmişlerdir (Abbaspour ve diğ., 2016). Karayolları drenaj sistemlerinde kullanılan örgülü geotekstilin farklı ince dane oranlarına (0, 2, 4 ve 6) sahip RCA ile kullanımı durumunda tıkanma davranışının değişimini incelemişler, deneyler sonucunda ince dane oranının artmasıyla geotekstil-RCA sisteminin geçirimliliğinin azaldığını fakat tıkanmanın gerçekleşmediğini tespit etmişlerdir. Bu gözlemler drenaj sistemlerinin doğru tasarımının önemini ortaya koymaktadır (McCulloch ve diğ., 2017; Nam ve diğ., 2014). Geri kazanılmış beton, yol kaplama uygulamaları için doğal agrega malzemesine alternatif bir malzeme olarak kabul edilmiştir. Gelecekteki çalışmalarda, geri kazanılmış beton agreganın efektif ve maksimum ölçüde kullanılabilineceği alanları belirlemek, farklı koşullara ve senaryolara dayalı olarak en faydalı kullanım seçeneklerini tanımlamak için bir yaşam döngüsü seçenekleri değerlendirmesi gerekmektedir (Nwakaire ve diğ., 2020).

Engelsen ve diğ., geri kazanılmış beton malzemesinin sızıntı suyu pH'ının laboratuvar ve saha araştırmalarını eşzamanlı gerçekleştirmişler ve her iki çalışmada da laboratuvarda, saha deneylerine göre önemli ölçüde daha yüksek sızıntı suyu pH'ı ölçüldüğünü bildirmişlerdir (Engelsen ve diğ., 2017). Madras Natarajan ve diğ.' de sızıntı suyu pH'ının saha ve laboratuvar ölçümleri arasındaki tutarsızlığı göstermişlerdir; bu mevcut laboratuvar metodolojisinin sahadaki sızıntı suyu koşullarını yetersiz şekilde tanımladığını göstermektedir. Geri kazanılmış beton malzemenin sızıntı suyu kimyasında temas süresi önemlidir, çünkü daha uzun temas süresi daha fazla mineral çözünmesine neden olur. RCA'yı sahada etkileyen drenaj tasarımı, yağış sıklığı, yağış süresi, doygunluk derecesi, hava sıcaklığı, alt temel zemin özelliklerindeki değişim ve trafik yükleri gibi birçok parametrenin laboratuvar yöntemlerinde modellenmesi zordur (Sanger ve diğ., 2020).

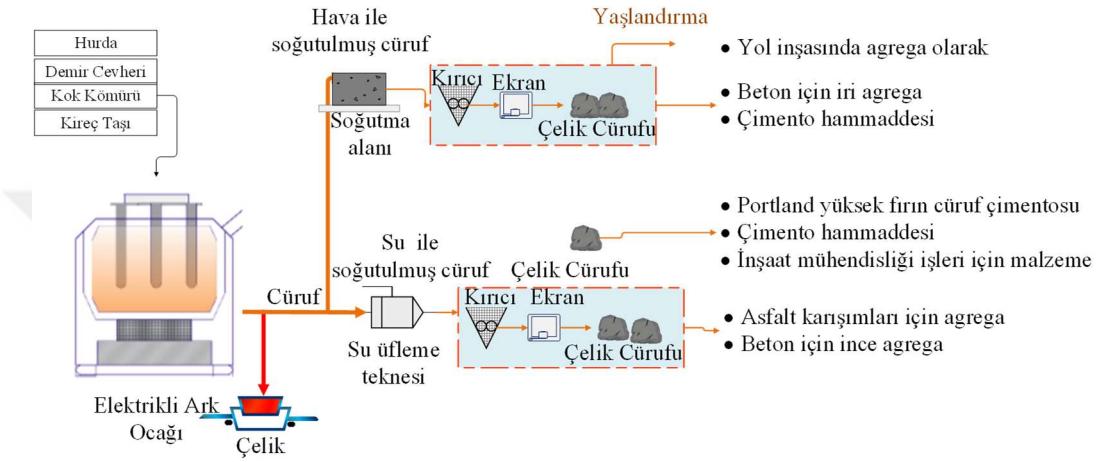
Geri kazanılmış beton malzemenin çevresel uygunluğu ve filtre malzemesi olarak geotekstil malzeme ile hidrolik uyumluluğunun bir tasarımdan önce araştırılması gerekmektedir. Bilgen ve diğ. 2020 yılında sızıntı suyunun su kalitesi limitlerini karşıladığından emin olmak için, Maryland'deki bir yol inşaat sahasından bir RCA'yı sızıntı özellikleri açısından değerlendirmişlerdir ve tespit edilebilir kirletici maddelerin yüzey suyuna çok az veya hiç ulaşmadığını göstermişlerdir (Bilgen ve diğ., 2020).

ABD'nin birçok eyaletinde RCA karayolu drenaj malzemesi olarak kabul edilmekledir (Tanyu, 2012). Drenaj uygulamalarında RCA içerdiği kalsiyum esaslı iyonlar nedeni ile tıkanmaya neden olabileceği için kontrollü kullanılması gerektiği önerilmektedir. Fakat yapılan araştırmalarda geri kazanılmış beton (RCA) ve geotekstilden teşkil edilen drenaj sistemlerinin tıkanmasının doğrudan RCA malzemesinin kimyasal yapısındaki kalsiyumdan kaynaklandığını gösteren kanıtlar bulunamamıştır. Örneğin, drenaj tabakasının %100 doğal agrega kullanılarak inşa edildiği bir saha uygulamasında 4 yıllık hizmetten sonra geotekstil numuneler çıkarılıp geçirgenliği kontrol edildiğinde, RCA malzeme ile inşa edilen diğer yerlerden çıkarılan bir geotekstil malzemeye göre daha fazla azalma gösterdiği tespit edilmiştir. Bu gözlemler, agrega-geotekstil drenaj sistemlerinin doğru tasarımının önemini ortaya koymaktadır. Geçmişte yapılan çalışmalar, yer altı sistemlerinde RCA-geotekstil sistemlerinin hidrolik uyumluluğu hakkında bilgi eksikliği olduğunu ve sonuç olarak, RCA malzemenin muhteviyatında bulunan ince dane miktarının göç potansiyelini ve bunun geri kazanılmış beton-geotekstil sisteminin hidrolik uyumluluğu üzerindeki etkileri incelenmelidir. Ayrıca RCA-geotekstil drenaj sistemlerinin davranışında seçilen geotekstilin özellikleri de önem arz etmektedir.

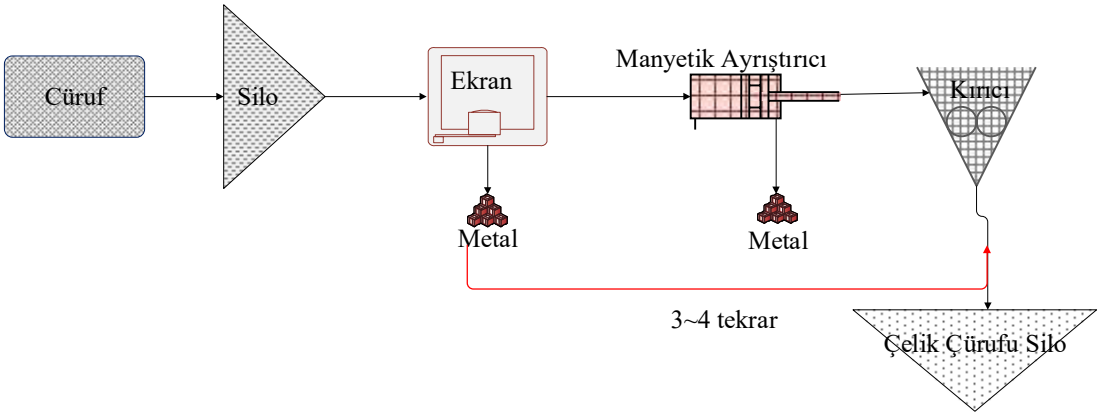
2.4.3 Çelik cürufu

Çelikhane cürufu, çelik üretimi prosesinde metal eriyiğinin rafinasyonu ve oksitlenmesi esnasında, yoğunluğunun çelikten daha az olması sebebiyle, çeliğin üzerinde oluşur ve 1300 °C veya daha yüksek sıcaklıklarda ocaktan alınmaktadır. Pota ocağında gerçekleşen ikincil metalurji işlemlerinde, alaşımlama, indirgeme, deoksidasyon, desülfürizasyon gibi prosesler sonucunda da cüruf oluşur. Yani cevherlerin demire, sıcak demirin çeliğe dönüştürülmesinden, bir elektrik ark fırınında hurdanın eritilmesinden veya daha sonra ham çeliğin işlenmesinden çelik cürufu oluşmaktadır. Çelik üretiminin bir yan ürünü olan çelik cürufu, erimiş çeliğin çelik üretim fırınlarındaki kirliliklerden ayrılması olarakta tanımlanabilmektedir. Cüruf erimiş bir sıvı eriyiği olarak meydana gelir ve soğutma üzerine katılaşan silikatların ve oksitlerin kompleks bir çözeltisidir. Elektrik ark ocağı (EAO) prosesinde Şekil 2.25 (a)'da görüldüğü gibi EAO ve pota ocağı cürufu olmak üzere iki ayrı cüruf oluşur. EAO cürufu, cüruf kuyularında yerinde soğutma yapıldıktan sonra kamyonlara yüklenerek depolama alanına götürülür. Pota ocağı cürufunda ise potalar beton zemine devrilir orada su ile soğutularak depolama alanlarına alınır. Bazı EAO tesislerinin

bünyelerinde Şekil 2.25 (b)'deki gibi cüruf kırma, eleme ve metal ayrıştırma üniteleri mevcuttur. Cüruf'un ihtiva ettiği çelik gibi metal alaşımları metal ayrıştırma yöntemi (manyetik ayırma) ile geri kazanılarak tekrar sistemde hurda olarak kullanılmaktadır. Metallerin cüruftan ayrılma işleminin yapılabilmesi için soğumuş çelik cürufu kırıcıda kırılır, çelik cürufunun ihtiva ettiği metaller, manyetik ayırma ile geri kazanılır. Genel olarak, metal geri kazanım oranını artırmak amacıyla, kırma ve manyetik ayırma işlemi, Şekil 2.25 (b)'de gösterildiği gibi birkaç kez tekrarlanır (Kumar, 2019).



(a)



(b)

Şekil 2.25 : (a) Çelik cürufunun üretimi ve kullanımı. **(b)** Şematik kırma akışı, manyetik ayırma ve çelik cürufu ayırma (Kumar, 2019).

Çelik üretiminde atık olarak kabul edilen ve düzenli depolama alanlarında tutulan çelikhane ve pota ocağı cürufları, artık teknolojik yöntemlerin uygulanması ile çeşitli sektörlerde hammadde olarak değerlendirilebilinmektedir. Böylece söz konusu cüruflar başta karayollarında temel, alt temel ve dolgu olmak üzere, çimento sektöründe klinker üretiminde, park sahaları gibi alanlarda asfalt içinde, beton bloklar

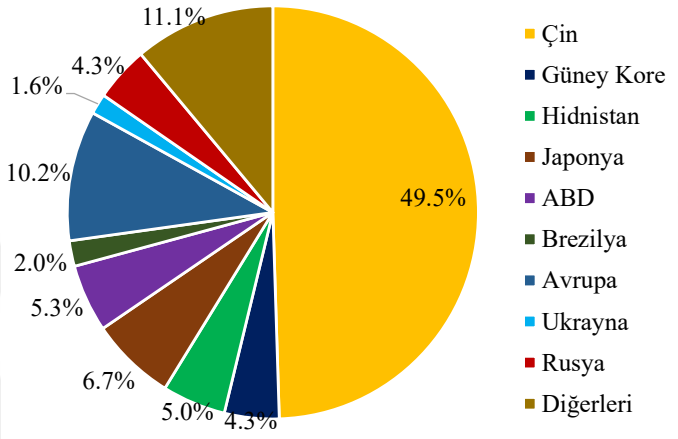
ve parke taşı olarak çeşitli uygulamalarda yapay agrega olarak kullanılabilmektedir. Günümüzde EAO cürufunun geri dönüşümü, çelik üretim endüstrisinde tamamlayıcı bir uygulama yerine bir zorunluluk haline getirilmektedir EAO cürufunu geri dönüştürme çabalarında tek bir uygulamaya odaklanmak yerine, birden çok olası seçenek için geniş ölçekli kullanıma dayalı olarak yürütülmesi gerekmektedir (Teo ve diğ., 2020).

Demir çelik endüstrisinde yılda yaklaşık 1.3 milyar ton çelik üretilirken, 500 milyon ton yan ürün, katı atık ve çamurun ortaya çıktığı tahmin edilmektedir. Bir ton çelik üretimi sırasında yaklaşık 400-450 kg katı atık oluşmaktadır. Bu katı atıklar genelde cüruflar, tozlar, çamurlar, haddehane tufalı, kullanılmış refrakterler vs. dir. Çevresel sorumluluğu karşılamak üzere metalürji endüstrisi cüruflarını proses etme ve azaltma yönünde çabalar gösterilmektedir. Cürufların bileşimleri, mineral yapıları ve soğutma hızları kullanımlarında önemli bir rol oynamaktadır. Farklı metalürjik proseslerden elde edilen metalürjik cüruflar, farklı cüruf karakteristiklerine bağlı olarak farklı şekilde kullanılmaktadır (Worldsteel Association, 2014). Dünya Çelik Birliği çelik endüstrisinin yan ürünleri ile ilgili yayımlamış olduğu bilgi notunda; çelik cüruflarının (BOF ve EAO cürufları) bir kısmının geri kazanılarak fırında veya sinterde kullanılabildiği ve yaklaşık %50 oranında geri kazanılmış cürufun inşaat uygulamalarında öncelikli olarak da yollarda kullanıldığı belirtilmiştir. Dünyada çelik cürufunun geri kazanım oranı ortalama %80'in üzerindedir. Çelik cürufunun geri dönüştürülmesi ile doğal kaynakların korunmasına önemli bir katkıda bulunulmaktadır. Yalnızca Almanya'da inşaat sektöründe demir ve çelik cürufu kullanımı, bir milyar tondan fazla doğal agreganın kullanılmasını engellemiştir. Alman Yapı Malzemeleri Araştırma Enstitüsü tarafından 2008 yılında çimento endüstrisinde CO_2 emisyonlarının yaklaşık 22 milyon ton azaldığı raporlanmıştır. Böylece sürdürülebilirliğe ve iklim değişikliğiyle mücadeleye olumlu katkıda bulunulmaktadır.

Çevresel ve ekonomik yarar açısından, birçok ülkede halen, çelik cürufu kullanımının artma potansiyeli mevcuttur. Amerika Ulusal Cüruf Birliği'nin yayımladığı bildiride demir çelik cüruflarının yerleşim, tarım, endüstri ve inşaat uygulamalarında kullanılabilecek uygun agrega materyalleri olduğu belirtilmiştir. Cüruflar, US EPA ve ASTM prosedürleri takip edilerek testlerden geçirilmiş ve cüruf uygulamalarının çevre dostu bir yaklaşım olduğu belirtilmiştir. Yapılan insan sağlığı ve ekolojik risk değerlendirmesine göre; demir çelik cüruflarının yerleşim, tarım, endüstri ve inşaat

uygulamalarında kullanımı insan sağlığına ve çevreye ciddi bir tehdit oluşturmamaktadır. Cüruftaki metallerin insanlar, hayvanlar ya da bitkiler tarafından alınması ya da bitkilerde biyolojik birikimi söz konusu değildir.

Dünya Çelik Birliği (2016) verilerine göre dünya ham çelik üretimi 2015 yılında 1620 milyon tona ulaşmıştır. Şekil 2.26'da görüldüğü gibi, Çin, Avrupa, Japonya ve Amerika Birleşik Devletleri en büyük ham çelik üretimi yapan ülkelerdir ve toplam çelik üretiminin %71.7'si bu ülkelerde yapılmaktadır.



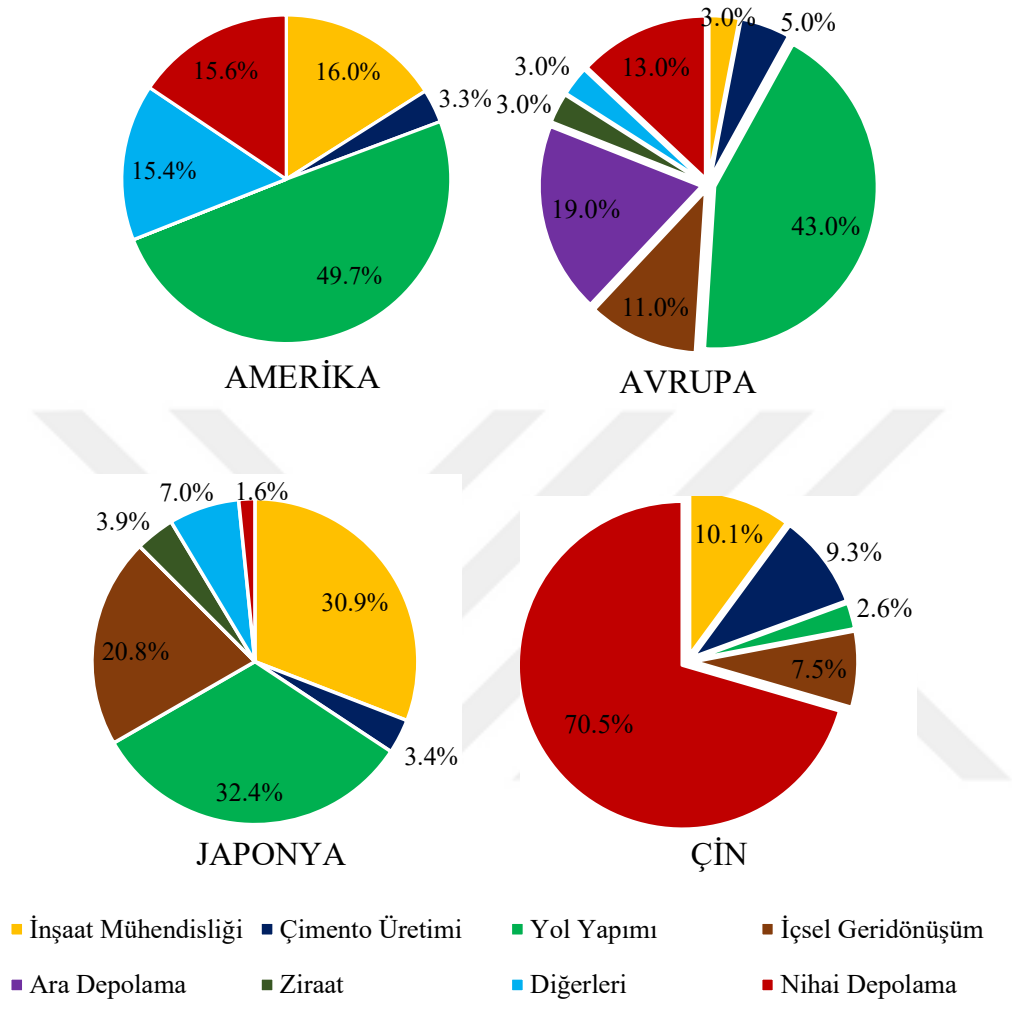
Şekil 2.26 : Dünya çapında ham çelik üretimi (Guo ve diğ., 2018).

Tüm dünyadaki çelik endüstrisi halihazırda bir dizi yenilikçi önlem almıştır ve çelik üretimi esnasında oluşan çelik cürufunun % 00 kullanım için daha fazla araştırma yapmaktadır. Çelik cürufunun kullanımında ve yönetiminde güncel gelişmelerden bazıları yollarda temel malzemesi, yol kaplama malzemesi, gübre ve zemin iyileştirmesinde, sinter malzemesi, sıcak metal defosforizasyonu, vb. olarak kullanılmasıdır. çelik cüruf özelliklerinin ve uygulamalarının net bir şekilde tanımlanması için veri tabanı oluşturulması düşünülmektedir (Kumar, 2019).

Dünyanın belli başlı bölgelerindeki çelik cürufunun ana uygulamalarını anlamak için, Amerika, Avrupa, Japonya ve Çin'de çelik cürufunun üretim ve kullanım yaklaşımı Şekil 2.27'de verilmiştir.

Çelik cürufu Japonya, Avrupa, Amerika Birleşik Devletleri ve Çin'de büyük ölçüde yol yapımı, çimento üretimi, iç geri dönüşüm, inşaat mühendisliği ve tarımda kullanılmaktadır. Nippon Cüruf Birliği'nin (2016) verilerine göre, Japonya'daki çelik cüruf üretimi 2016 yılında yaklaşık 14.1 milyon tona ulaşmış ve kullanım oranı %98.4 olmuştur. Bunun %30.9'u, kıyı koruma dolguları, yumuşak zemini iyileştirmek için zemin kaplamaları, yol alt katmanları ve setler dahil olmak üzere yol uygulamalarında

kullanılmıştır. Japonya'da, çelik cürufu deniz suyundaki hidrojen sülfit içeriğini azaltmak için de kullanılmaktadır (Guo ve diğ., 2018). Çelik cürufunun etkili kullanımı, kıyı deniz ortamını önemli ölçüde iyileştirebilir.



Şekil 2.27 : Amerika Birleşik Devletleri, Avrupa, Japonya ve Çin'de çelik cürufu kullanımı (Kumar, 2019).

Euroslag Derneği, her iki yılda bir Avrupa'da (17 ülke dahil) çelik cüruf kullanımı hakkında bilgi yayınlamaktadır ve 2012 yılında çelik cüruf kullanımının yaklaşık %87 oran ile 21.8 milyon ton olduğunu bildirmişlerdir. Almanya ve Fransa gibi bazı Avrupa ülkelerinde çelik cürufu kullanım oranı %90'ın üzerindedir. U.S. Geological Survey (2013) verilerine göre, Amerika Birleşik Devletleri'nde çelik cüruf üretimi 2013 yılında 7.8 milyon tona ulaşmıştır. Bu çelik cürufunun yaklaşık %49.7'si yol yapımında ve %16'sı asfalt betonunda kullanılmıştır, ABD'de çelik cürufunun yalnızca %15.6'sı nihai atık olarak atık depolama alanına gönderilmektedir. Çin'de çelik cüruf üretimi 2013 yılında 100 milyon tona ulaştığı, çelik cüruf kullanımı çok

düşük olduğundan, birikmiş 300 milyon ton çelik cürufunun atık depolarında depolandığı bildirilmiştir. En büyük çelik üreticisi olan Çin, yollar ve tarım için çelik cürufu kullanımında diğer ülkelerden daha geridedir.

A.B.'de ham çeliğin yıllık üretimi 170 milyon ton (Mt), Türkiye'de tam kapasite çelik üretimi 50 Mt olarak verilmektedir. Çelik yapımı prosesi esnasında, toplam üretimin %15-20'i cüruf olarak hesaplanmaktadır. Buna göre A.B. yılda 30 Mt ve Türkiye 9Mt çelik üretmektedir. Bunun da ötesinde, 2020'de dünyada çelik üretiminin 1781 Mt olacağı tahmin edilmektedir ve bu miktar da cüruf için farklı uygulamaların gerektiğini açıklamaktadır. Hindistan'da ise yaklaşık olarak yılda 17000 ton demir cürufu üretildiği belirtilmektedir. Dünya için verilen rakam ise yılda 400 milyon tondan daha fazla demir ve çelik cürufu oluştuğu şeklindedir (Gökalp ve diğ., 2018; Uysal ve Bahar, 2018). TÜİK tarafından yürütülen imalat sanayi su, atık su ve atık istatistikleri 2018 yılı anket çalışması sonuçlarına göre, demir ve çelik sektöründen kaynaklanan toplam 11.2 milyon ton atığın 8.2 milyon tonunu yanmadan kaynaklanan atıklar oluşturmaktadır. Yanmadan kaynaklanan atıklar termal ıslah ve yanma işlemlerinden kaynaklanan kül ve cüruf miktarı ile baca gazı arıtımından kaynaklanan atıkları içermektedir. Yanmadan kaynaklanan atıklar Avrupa İstatistiksel Atık Sınıflamasında 12.4 kodu ile listelenmektedir. Oluşan 8.2 milyon ton yanma atığının %91.6'sı ise geri kazanılmıştır (Val ve Orman, 2005).

Sürdürülebilir kalkınmayı sağlamak için, çevre sorunları nedeniyle çelik cürufunun (SS) büyük ölçekli kullanımı esastır. Bu bağlamda inşaat sektörü harcanılan malzeme miktarının çokluğu nedeni ile önemli bir rol oynamaktadır. Bazı gelişmiş ülkelerde yüksek düzeyde kullanım, gelecek için umut vermektedir. Yol uygulamalarında hammadde olarak çelikhane cüruflu yapay agreganın kullanılması ile doğal agrega üretimi sırasında meydana gelen, doğal alanların tahribi, tozlaşma, sera gazı emisyonları, gürültü ve görüntü kirliliği gibi olumsuz çevresel etkiler azaltılabilecektir. Ayrıca, mukavemetinin yüksek olması nedeni ile çelik cürufu inşaat sektörünün birçok alanında da yapı malzemesi olarak kullanılmaktadır. Böylelikle, hammadde tüketiminin azaltılması ile sürdürülebilirlik desteklenerek, bir endüstri kolunun yan ürünü başka bir sektörün hammaddesi konumuna gelmektedir.

Çizelge 2.5'te farklı ülkelerdeki çelik cürufunun kimyasal bileşiminin tipik örnekleri verilmiştir. Çelik cürufun ana bileşenleri CaO, Fe, SiO_2, MgO ve MnO'dur. Çelik cüruf, %38-48 CaO aralığı ile kalsiyumsiliktir ve SiO_2 aralığı %11-20'dir. Çelik cüruftaki demir içeren mineraller manyetik ayırma ile çelik cürufundan ayrılmaktadır.

Çizelge 2.5 : Farklı ülkelerdeki çelik cüruf içeriği (ağırlıkça %).

	CaO	SiO_2	Al_2O_3	MgO	MnO	P_2O_5	Fet	S
Türkiye (Alanyalı ve diğ., 2006)	38.62	19.28	2.71	8.05	7.52	—	22.61	0.28
Japonya (Gao ve diğ., 2015)	45.8	11.0	1.9	6.5	5.3	1.7	17.4	0.06
Brezilya (Oliveira ve diğ., 2004)	45.2	12.2	0.8	5.5	7.1	—	18.8	0.07
İsveç (Tossavainen ve diğ., 2007)	45.0	11.1	1.9	9.6	3.1	0.23	23.9	—
Fransa (Waligora ve diğ., 2010)	47.71	13.25	3.04	6.37	2.64	1.47	24.36	—
Çin (Rao ve diğ., 2014)	42.92	11.51	1.4	4.36	4.04	0.83	23.74	0.07

Literatürde, inşaat mühendisliği uygulamalarında özellikle agrega olarak çelik cürufunun kullanılmasında muhteviyatındaki serbest CaO ve MgO nedeniyle hacim istikrarsızlığı, krom, kurşun, civa gibi toprağı ve suyu kirleticiler içermesi nedeni ile kullanımında dikkat edilmesi gerektiği bildirilmiştir. Çelik cürufunun inşaat mühendisliği uygulama alanlarında karşılaşılan bir diğer problem ise doğal agregaya kıyasla SS'nun yüksek su emme kapasitesine sahip olmasıdır. Sonuç olarak, inşaat endüstrisinde kullanılmadan önce bu problemlerin çözümü için SS'nin önceden fiziksel ve kimyasal özelliklerinin tayin edlimesi, gerekiyorsa bazı süreçlerden geçirilerek (yaşlandırma vb.) kullanılması gerekmektedir. Ayrıca kullanım alanlarının çeşitlendirilmesi için daha fazla çalışma yapılmalıdır.

Çelik cürufunun inşaat sektöründe kullanım uygunluğunun değerlendirilmesine yönelik çalışmalar incelendiğinde, özellikle yüksek fırın ile üretilen çelik cürufu (SS), granül baz, beton ve sıcak karışım asfalt agregaları ve tamamlayıcı çimentolu malzemeler gibi çok çeşitli otoyol uygulamalarında kullanıma uygun olduğu görülmektedir (Diotti ve diğ., 2021; Maharaj ve diğ., 2017; Morata ve Saborido, 2017; Grubeša ve Barišić, 2016; Wang, 2020). Mathur ve diğ. (1999) yüksek fırın cürufu,

aşınmış çelik cürufu, granüle cüruf, uçucu kül ve kireç karışımlarının, düşük hacimli trafik yollarının alt temel veya temel katmanlarında doğal olarak mevcut agregaların ikamesi olarak kullanılmak üzere performansını incelemişlerdir. Pamukçu ve Tuncan (1993), alt temel ve taban katmanı olarak kullanılan çimento ile stabilize edilmiş çelik cüruf agregasının özelliklerini değerlendirmişlerdir. Çalışmada, çelik cüruf karışımlarının çimento ile stabilize edilmiş doğal agregalarla karşılaştırılabilir mukavemet değerleri sergilediğini göstermiştir. Kamon ve diğ. (1993), kaolinit ve CAS (karbonatlı-alümina tuzları) ile iyileştirildiğinde, EAO cürufunun (paslanmaz çelik üretiminden elde edildi), güçlü mukavemet kazanımı davranışı gösterdiğini ve dolayısıyla alt taban olarak potansiyel bir kullanım gösterdiğini belirtmişlerdir. Yol tabanlarında ve alt temellerde kullanıldığında çelik cürufunun tatmin edici performansı literatürdeki birçok araştırmada gösterilmiştir. Rohde ve diğ. (2003) düşük hacimli yollar için temel malzeme olarak EAO cürufunun kullanımını araştırmışlardır. Çalışmada, EAO cürufunun esneklik modülünün doğal agregalardan çok daha yüksek olduğu ve buna ek olarak, düşük hacimli yollarda temel malzeme olarak EAO cürufunun kullanımının toplam yol maliyetini önemli ölçüde düşürebileceği sonucuna varılmıştır. Aiban (2006), ağırlıkça % 30 ila % 85 çelik cürufu ile çelik cürufu ve doğal agregaların (marn ve kum) karışımlarını içeren yol tabanlarının tatmin edici CBR değerleri (% 455 kadar yüksek) sergilediğini göstermiştir. Çelik cürufunun diğer malzemelerle (uçucu kül, çimento, yüksek fırın cürufu vb.) karıştırılması da yol temel malzemesi olarak kullanılmak üzere birkaç araştırmacı tarafından araştırılmıştır. Mymrin ve diğ. (2005), yol taban tabakası olarak çimento ile aktive edilmiş çelik cürufu ve doğal toprak karışımlarının kullanımının, yol taban tabakası kalınlığındaki azalma nedeniyle yol yapım maliyetini düşürebileceğini göstermiştir. Son on yılda çelik cüruflarının asfalt karışımlarında hem kaba hem de ince agrega olarak uygunluğuna odaklanan kapsamlı araştırmalar yapılmıştır. Bazı başarısız vaka geçmişlerine rağmen, literatürdeki çalışmalar, hacim stabilitesini sağlamak için uygun kalite kontrol önlemleri alınırsa, asfalt karışımlarında çelik cüruf agregalarının (hem EAO hem de BOF proseslerinden) kullanılabileceği konusunda hemfikirdir. Asfalt karışımlarında kullanılan çelik cüruf agregası homojen yoğunluk ve kaliteye sahip olmalıdır (Farrand ve Emery 1995; Bagampadde ve diğerleri 1999; Xue ve diğerleri 2006; Wu ve diğerleri 2007). Wu ve diğ. (2007), asfalt karışımlarında gözenekli bir EAO cüruf agregasının kullanımını incelemiş ve taş-mastik asfalt karışımlarının hazırlanmasında 3 yıl yaşlandırılmış EAO cüruf agregasının kullanımının umut verici

olduğunu belirtmişlerdir. EAO cürufu içeren test yolları, 2 yıllık hizmetten sonra mükemmel performans göstermeye devam etmiştir. Günümüzde inşaat ve yıkım malzemelerinin (C&D) yol kaplamalarının inşası veya rehabilitasyonu kullanımı için doğal agregalara alternatif olarak kullanılmaktadır. Çelik cürufu da bitümlü karışımların üretiminde doğal agrega yerine kullanılabilecek mekanik özelliklere sahiptir. Bu uygunluğun ispatı için farklı yüzdelerde C&D malzemeleri ve çelik cürufu ile yapılmış asfalt karışımının fiziksel ve mekanik özelliklerini değerlendirmek için laboratuvar deneyleri yapılmıştır. Çelik cürufunun kullanılan karışımlarda malzemelerin daha yüksek sertlik modülüne sahip olduğu belirlenmiştir. Malzeme karışımında %4.5 bitüm ve %30 cüruf kullanılarak optimum karışım elde edilmiştir. Araştırmalar, döngüsel ekonomiyi ve sürdürülebilir inşaatı teşvik etmek için sürdürülebilir kalkınma hedefleriyle belirlenen hedefleri teşvik etmek için çelik cürufu malzemenin yol altyapılarında kullanılma olasılığını göstermiştir (Dondi ve diğ., 2021; Hasita ve diğ., 2021).

Çelik cürufunun, açısal şekli ve pürüzlü yüzey yapısı nedeniyle mükemmel mukavemet özelliklerine sahip olduğu bildirilmiştir (Deniz ve diğ. 2009). Çelik cürufu ayrıca yüksek özgül ağırlığa sahiptir ve iyi bir sıkıştırma davranışı sergilmektedir. Ancak, bazik oksijen fırınlarından (BOF) ve elektrik ark ocaklarından (EAO) elde edilen çelik cürufu, nem mevcudiyetindeki hacimsel dengesizliklerinden ötürü otoyol uygulamalarında kullanılırken dikkat edilmesi gerekmektedir. Serbest kireç (CaO) ve serbest periklasın (MgO) genişlemesinin yanı sıra dikalsiyum silikatın (C_2S) dönüşümü ve CaO ve Mg silikatların demir ve karbonatlaşmasının oksidasyonu çelik cürufların hacimsel dengesizliğiyle sonuçlandığı yapılan çalışmalarda bildirilmiştir (Wang 2010). Verhasselt ve ChoqSuet (1989), çelik cüruf numunelerinde bir dizi hızlandırılmış şişme deneyi yapmışlar ve kaldırımlarda kullanılan cürufların kritik CaO içeriğinin %1'lik maksimum doğrusal genişleme sınırı ile %4.5 olması gerektiğini belirtmişlerdir. Aynı çalışmada, kum tabakasının içindeki boşlukların cürufun şişmesini tolere edebilmesi nedeniyle kum tabakalarının çelik cüruf tabakasının üstüne ve altına yerleştirilmesini önerilmiştir. Geiseler (1996), çelik cürufun hacimsel genişlemesini, otoparkların yapımında veya peyzaj projelerinde olduğu gibi belirli uygulamalarda kısıtlamaya gerek olmadığını ifade etmiştir. Ayrıca Geiseler (1996), yaşlanmamış cürufun serbest kireç içeriğinin, bağlanmamış katmanlar ve bitümlü (asfalt) yol tabakalarında kullanılmak üzere sırasıyla %7 ve %4' ü geçmemesini

önermiştir (Geiseler, 1996). Bir başka çalışmada Yıldırım ve Prezzi (2011), Sınıf C-Uçucu külünün ağırlıkca %10 ilave edilmesinin, EAO cüruflarının yanı sıra yaşlandırılmış ve taze BOF çelik cürufunun şişme değerlerini ihmal edilebilir seviyelere düşürebildiğini göstermiştir (Yildirim ve Prezzi, 2011). Yzenas (2008) otoklav testleri yapmıştır ve çelik cürufunun inşaat agregaları olarak uygunluğunu değerlendirmek için bir ölçek geliştirmiştir. Bu ölçeğe göre, hacimsel genişlemenin %11'ine kadar çıkan bir çelik cüruf numunesi "uygun" bir materyal olarak sınıflandırılmıştır. Ölçülen volümetrik genişleme %11 ile %16 arasında ise, malzeme "marjinal" olarak adlandırılır ve daha fazla araştırma yapılması önerilmektedir. Hacimsel genişlemesi %16'dan büyük olan cüruf malzemeler uygun malzemeler olarak değerlendirilmemektedir. Bununla birlikte, Juckes (2003), çeşitli SS malzemelerinin şişme davranışını hem laboratuvarda hem de saha uygulamalarında değerlendirmiş ve araştırma sonuçları, aynı malzemenin laboratuvarda ve saha da şişme davranışının çok farklı olabileceğini göstermiştir. Laboratuvar ortamındaki şişme deneyleri hızlıdır ve laboratuvar deneyleri ile elde edilen veriler, bir çelik cüruf numunesi için maksimum şişme miktarını vermektedir. Bununla birlikte, şişme oranı, atmosferik koşullar altında çok daha düşük bulunmuştur. Çelik cürufunun içeriğinde bulunan serbest kirecin (CaO) agrega içerisinde gözle görülebilir şekilde cepler oluşturabildiği ve bu ceplere çatlaklar sayesinde su ulaştığında orantısız hacimsel genleşme oluşabildiği belirtilmiştir. Çelik cürufunun hacimsel genleşmesinin büyük kısmı serbest CaO yüzünden olsa da içeriğindeki MgO de uzun dönemde şişme potansiyelinde etkilidir. Dayıoğlu (2018), önceki araştırmalarda çelik cürufunun yol tabakalarında kullanılmadan önce atmosferik koşullar altında yaşlandırılması gerektiğini ileri süren araştırmalara alternatif bir çözüm yöntemi araştırmak için SS'in mekanik özelliklerini korurken, şişme potansiyelini azaltan yenilikçi bir yöntem önermiştir. Çelik cüruf materyalleri bitümlü asfalt materyalle kaplanmış veya su arıtma rezidüel (WTR) ile karıştırılmıştır. Bu karışımlar, bakir çelik cüruf malzemesiyle birlikte, hızlandırılmış şişme deneylerine tabi tutulmuştur. Genel olarak sonuçlar, çelik cürufunun otoyol dolguları için uygun bir sürdürülebilir yapı malzemesi olabileceğini ve çelik cürufunun sızıntı suyunun, çevrede tipik bir doğal oluşumdan geçtikten sonra yüzey sularını kirletmeyeceğini göstermiştir (Dayioglu ve diğ., 2018).

Dünyanın en büyük çelik üreticilerinden biri olan Türkiye'de çelikhane cürufu miktarı ton ham çelik başına, 150-200 kg arasındadır (2015, Demir Çelik Cüruf Raporu).

Ülkemizde şu ana kadar demir-çelik üretiminden elde edilen cürufun büyük kısmının atıl durumda saklama alanlarında bekletildiği ve her yıl 3 milyon tondan fazla EAO cürufunun bu atıl yığına eklendiği bilinmektedir. Türkiye'de çelikhane cürufunun karayollarında standart bir ürün olarak kullanılabilmesi için araştırmalar yapılmaktadır. Çelikhane cürufunun yol alt ve üst yapısında kullanılabilirliğinin ve performansının belirlenebilmesi için ülkemizde üretim yapan farklı tesislerdeki SS'ları farklı çalışmalarda incelenmiştir. Cürufun yapısal davranışının araştırılması kapsamında çelikhane cürufunun yol uygulamalarında granüler tabakalarda, bitümlü sıcak karışımlarda yapay agrega olarak kullanılması durumları araştırılmış, bağlayıcı oranı ve sıkıştırma miktarının, Türkiye'de geçerliliği olan KTŞ' de verilen limitler dâhilinde olduğu belirlenmiştir (Karadağ ve diğ., 2020). Ilıcalı (1988) çalışmasında Erdemir çelik cüruflarının yol üst yapısında kullanılabilirliğini araştırmıştır. Çelik cürufunun fiziksel özelliklerinin üstyapı tabakalarında kullanımına uygun değerlere sahip alternatif bir agrega olduğu sonucuna, yol inşasında kullanılacak agregaların özelliklerini belirleyen deneyler yapılarak ulaşılmıştır. Çelik cürufu ile oluşturulan bitümlü karışımın ağır trafikli yollarda aşınma tabakasında da kullanılabileceği belirtilmiştir . Fırat ve diğ. 2019'da yaptıkları çalışmada belirli oranlarda çelikhane cürufu, uçucu kül ve dolguya uygun bir zemin malzemesi ile karışım hazırlandığında CBR değerinde %130 oranında bir artış görüldüğü ve çelikhane cürufunun güvenle yol dolgu malzemesi olarak kullanılabileceği sonucuna varmışlardır (Karadağ et al., 2020). Karadağ ve diğ. (2020) çelik cürufunun yol temel ve alttemel yapımında kullanılması durumunu sonlu elemanlar metodu ile modelleyip çözümlemişlerdir. Sonuçlar bütün olarak değerlendirildiğinde ise Türkiye'de çelik cürufunun doğal agrega yerine yol üst yapısında güvenle kullanılabileceği kanıtlanmış olup yalnızca alt temelde kullanılması durumunda tekrarlı trafik yükleri altında hem yol performansını artıracağı hem de doğal kaynakların tüketimi azaltılıp demir çelik endüstrisinin atık ürünü olan çelik cürufunun geri dönüşümü sağlanacağını belirtmişlerdir (Karadağ ve diğ., 2020).

Geçmişten günümüze yapılan çalışmalarda çelik cüruflarına ait bazı fiziksel ve mekanik özellikler çizelge 2.6'daki gibi verilmiştir. Çelik cürufunun özgül ağırlığının 3.1 ile 3.6 arasında değiştiği yapılan çalışmalarda belirtilmiştir.

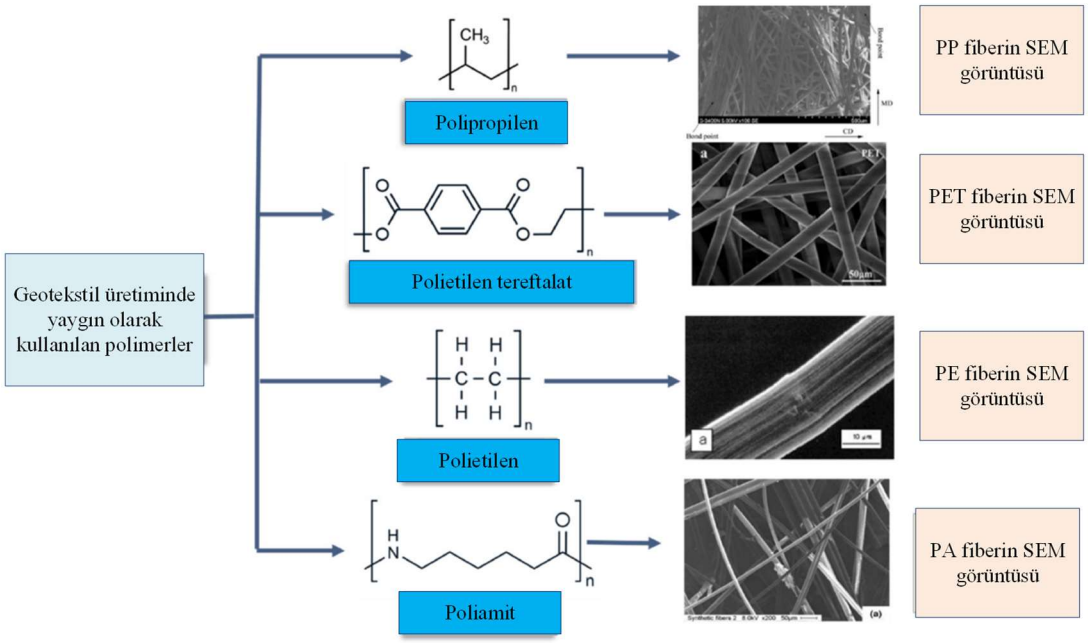
Çizelge 2.6 : Çelik Cürufunun Bazı Fiziksel ve Mekanik Özlellikleri (Noureldin ve McDaniel, 1990)

Mühendislik Özellik	SS
Özgül Birim Hacim Ağırlığı	3.1~3.6
Birim Hacim Ağırlık (kN/m^3)	16.00~19.20
Maksimum Kuru Birim Hacim Ağırlık (kN/m^3)	23~24
Optimum Su Muhtevası (%)	8~12
Kayma Mukavemeti Açısı	40°~50°
Kalifornia Taşıma Oranı (CBR)	300'e kadar
Los Angeles Aşınma Yüzdesi	%20~%25
Su Emme Yüzdesi	%0~%3

Literatürde, çelik cürufunun geoteknik özelliklerini değerlendiren çalışmalar oldukça sınırlıdır. Bu, çelik cürufunun istenmeyen özelliklerinden, yani hacim kararsızlığından ve yüksek özgül ağırlığından kaynaklanıyor olabilir. Bununla birlikte, çelik cürufları diğer çok uygun özelliklere (yüksek CBR, yüksek kayma mukavemeti açısı, vb.) sahiptir ve literatürdeki birkaç çalışma, çelik cüruflarının umut verici uygulamalarını göstermiştir ve geoteknik uygulamalarda çelik cürufları kullanma potansiyelini göstermiştir. Barra ve diğ. (2001), elektrik ark ocağı (EAO) cürufunun (0-5 mm boyut aralığında, MgO≤%5) çimento ile iyileştirilmiş zeminlerle karıştırılmasını incelemişlerdir. Bu araştırmada, Barselona'da yaygın olarak ağırlıkça %8-12 çimento ile iyileştirilmiş killi bir zemin, mukavemetini arttırmak için farklı oranlarda EAO cürufu ile karıştırılmıştır. EAO cürufunun üstün mekanik özellikleri ve su ile reaksiyonunun yarattığı bağlanma etkisi nedeniyle, kil zeminde önemli bir iyileşme gözlenmiştir. Bu çalışma ile zemin iyileştirme projelerinde çelik cürufunun kullanımının, çimento ihtiyacını azaltması nedeniyle maliyeti önemli ölçüde düşürebileceğini göstermiştir . Poh ve diğ. (2006), aktivatörler kullanıldığında ince daneli zeminlerin iyileştirilmesinde, ince daneli BOF cürufundan yararlanılabilineceğini göstermişlerdir. Ghionna ve diğ. (1996) düzenli depolama sahalarında yapısal dolgu malzemesi olarak çelik cürufu kullanma potansiyelini incelemişler, çelik cürufunun çakıl ve kum gibi malzemelerle seyreltilmesinin şişme potansiyelini azaltabileceğini göstermişlerdir

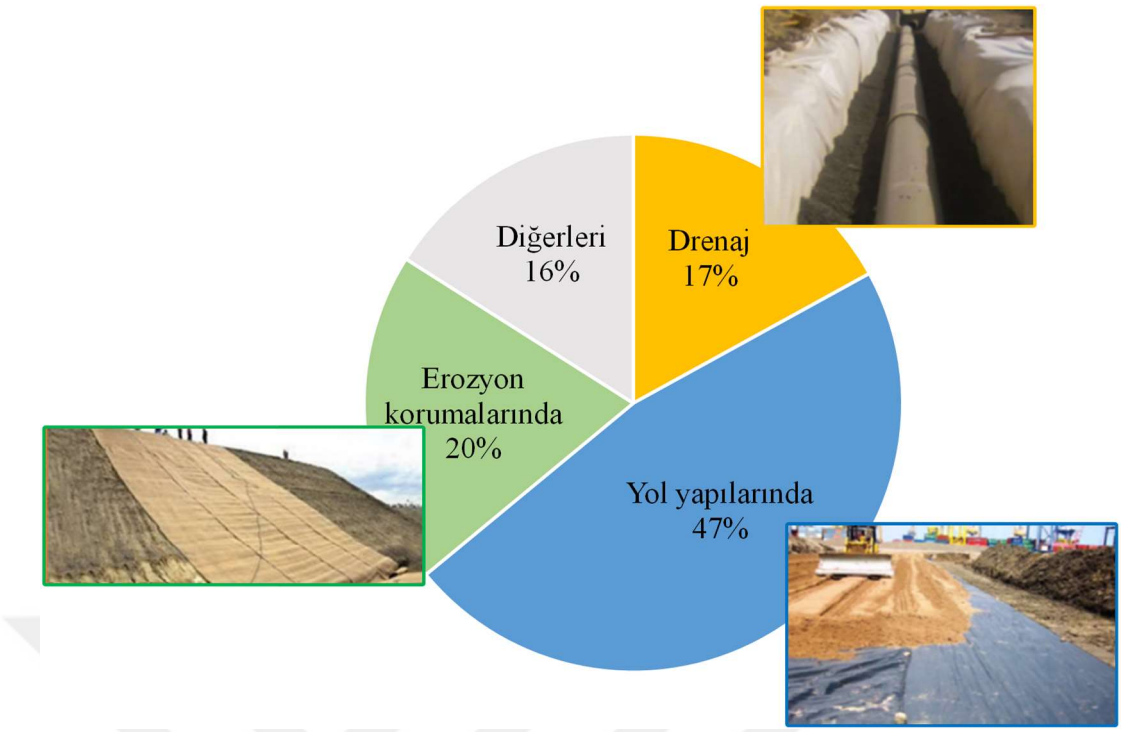
2.5 Drenaj Amaçlı Geotekstil Kullanımı

Geotekstiller, plastik polimerlerden oluşan geçirgen geosentetiklerdir. Şu anda, geotekstillerin temel malzemesi esas olarak sentetik elyaftır. Polipropilen düşük maliyeti, kabul edilebilir gerilme özellikleri ve kimyasal yapısı nedeniyle geotekstil üretiminde en yaygın kullanılan elyaflardan biridir. Bunu polietilen tereftalat (PET) ve polietilen (PE) izlemektedir (Wu ve diğ., 2020). Şekil 2.28'de geotekstillerin üretildikleri elyaf türüne bağlı olarak SEM görüntüleri verilmiştir.



Şekil 2.28 : Geotekstil üretiminde yaygın olarak kullanılan polimerler ve SEM görüntüleri (Wu ve diğ., 2020).

Geotesktillerin çeşitli geoteknik uygulamalarda kullanımı ekonomi, yerleştirme kolaylığı ve sürdürülebilirliği açısından giderek artmaktadır. Geotekstil malzemelerinin seçimi, sadece sahadaki geotekstillerin performans gereksinimleri göz önünde bulundurularak değil, aynı zamanda ürün maliyeti de dikkate alınarak projenin gerçek durumuna uygun olmalıdır. Şekil 2.29'da geotekstil malzemenin inşaat mühendisliği uygulama alanlarındaki oranı verilmiştir. Şekil 2.29'da da görüldüğü gibi geotekstiller en fazla yol uygulamalarında kullanılmaktadır. Geotekstillerin çok fazla kullanıldığı inşaat mühendisliği uygulamalarından bir diğeri ise, yapıların stabilitesi ve güvenliği için gerekli olan drenaj sistemlerin yapımında kullanılmasıdır.



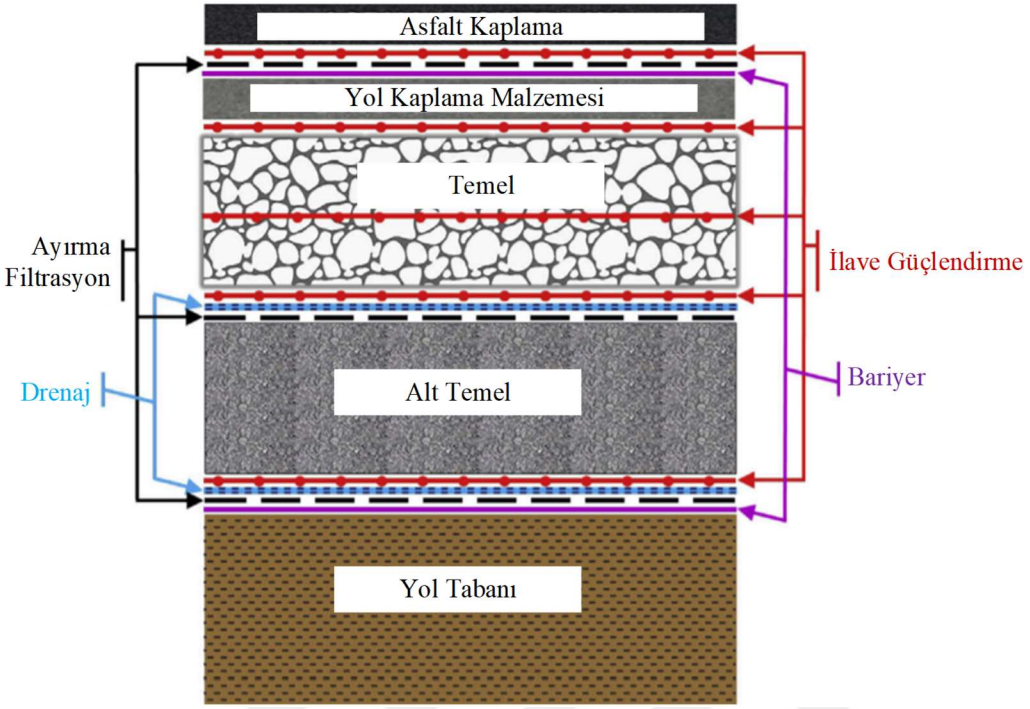
Şekil 2.29 : Uygulamaya alanına göre küresel geotekstil pazar payı (Wu ve diğ., 2020).

Yol yapımında geotekstil malzeme kullanımı gittikçe popüler hale gelmektedir. Şekil 2.30'da yol uygulamalarında geotekstil katmanların konumu ve bu geotekstillerin işlevleri içeren bir yol kesiti verilmiştir.

Bir yol kesitinde geotekstil aşağıdaki işlevlerin bir veya daha fazlasını yerine getirmek amacı ile kullanılabilir. Bu işlevler şunları içerir:

1) Ayırma: İki farklı malzeme arasına yerleştirilen geotekstil, iki malzemenin bütünlüğünü ve işlevselliğini koruma görevi üstlenmektedir.
2) Filtreleme: Geotekstil, uygulama alanının üstündeki ince parçacıkları tutarken, düzlemi boyunca sıvı akışına izin vermektedir. Bu işlevi yerine getirmek için anahtar tasarım özellikleri arasında geotekstilin geçirgenliği ve gözenek boyutu dağılımı önemli parametrelerdir.
3) Takviye: Geotekstil, zemin-goetekstil kompozitinin stabilitesini korumaya veya iyileştirmeye yönelik çekme kuvvetleri geliştirir. Bu işlevi yerine getirmek için önemli bir tasarım özelliği, geotekstilin çekme dayanımıdır.
4) Sertleşme: Geotekstil, zemin-geotekstil kompozitindeki deformasyonları kontrol etmeye yönelik çekme kuvvetleri geliştirmektedir.
5) Drenaj: Geotekstil, yapısının düzlemi içinde sıvı (veya gaz) akışına izin

verir. Bu işlevi ölçmek için önemli bir tasarım özelliği, geotekstilin geçirgenliğidir. (Zornberg ve diğ., 2017a).



Şekil 2.30 : Karayolu uygulamalarında geosentetiklerin çoklu fonksiyonları (Zornberg ve diğ., 2017a).

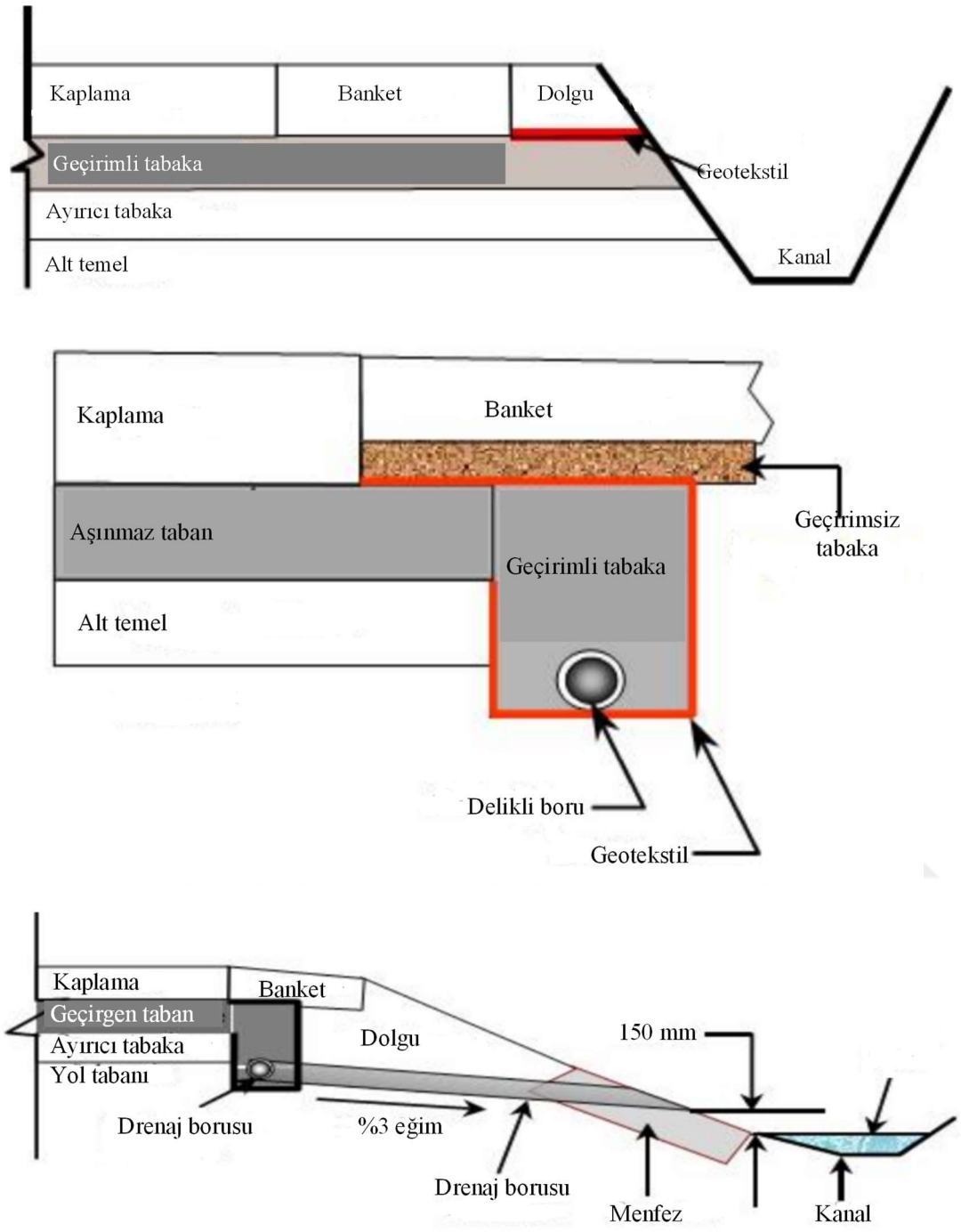
Geotekstillerin geoteknik uygulamalarından biri de zemin danelerinin geotekstil düzlemi boyunca sınırlı göçüyle yeterli su akışına izin veren filtrasyon işlevi için filtre malzemesi olarak kullanılmasıdır. Özellikle, kum ve çakıl gibi doğal filtre malzemelerinin az olduğu veya kullanımlarının çevre düzenlemeleri tarafından kısıtlandığı bölgelerde taşıma ve montaj kolaylığı nedeni ile geotekstiller drenaj tabakalarında filtre malzemesi olarak kullanılmak için tercih edilmektedir.

Filtrasyon mekanizmasında boşluk oranı, dane boyutu dağılımı hatta danelerin şekli (keskin temas noktaları) önemli rollere sahiptir. ISO18228-3 Tasarım Standardı Geosentetiklerin filtrasyon amacı ile kullanılması durumunda özellikle geotekstilin görünür göz açıklığı, permeabilitesi ve açıklık yüzdesi gibi parametrelerine dikkat edilmesi gerektiği belirtilmektedir. Şekil 2.31'de drenaj sistemlerinde geotekstilin farklı uygulama şekillerine örnekler verilmiştir.

Bir zemin uygulamasında, akış geotekstil düzlemine dik doğrultuda gerçekleşiyorsa, geotekstil filtrasyon görevi görüyor demektir. Bu uygulamalarda geotekstil bir filtre gibi davranarak, suyun geçişine izin verir. Buna karşın belirlenmiş en küçük dane çaplı zemini tutar ve sürüklenmesine izin vermez (Kermani ve diğ., 2020).

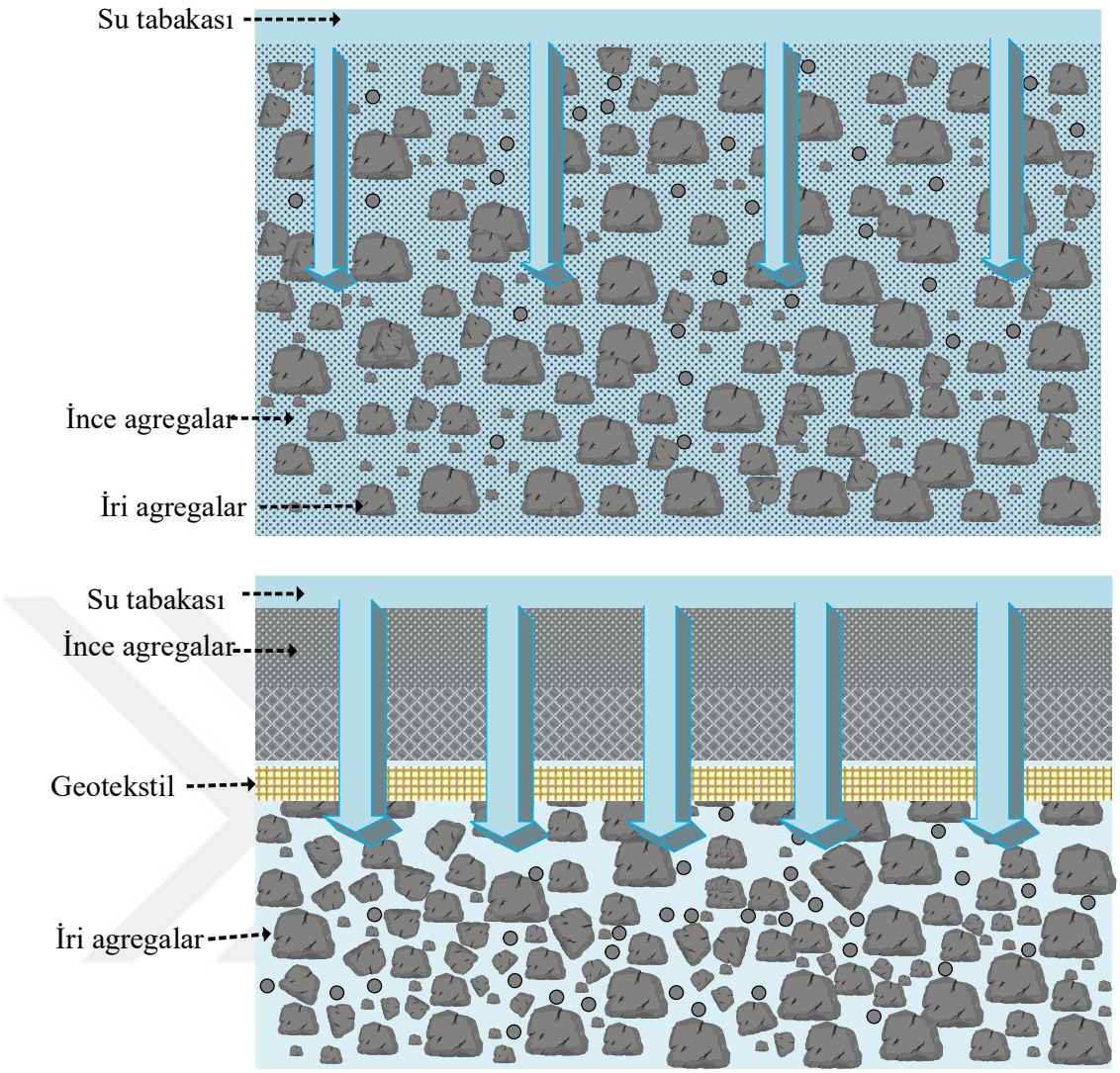
Bir geotekstil, dane göçünü kontrol ederken Şekil 2.31'deki gibi sıvının (su) geçmesine izin veriyorsa bir filtreleme görevini yerine getirdiği düşünülmektedir. Bu nedenle geotekstil, tutulan agrega ile drenaj malzemesi veya delikli boru ile tutulan agrega arasına yerleştirilmelidir. Filtrasyon amaçlı olarak genellikle örgüsüz, iğne ile delinmiş geotekstiller kullanılmaktadır. Özetle, geotekstil filtrasyonun işlevi, sıvının elyaf mazlemenin içinden hareketine müsaade ederken agrega danelerinin geçişine izin vermemektir. Bu nedenle, geotekstil aynı anda iki çelişkili talebi karşılamalıdır: su akışına müsaade eden gözenekli bir yapı ve agregaların tutulmasını sağlayan sıkı bir elyaf yapısı. Bu tür uygulamalarda, geotekstil ürünü şu şekilde seçilmelidir:

1) Geotekstil, suyu çapraz düzlemde ve / veya düzlem içi yönlerde iletmek için yeterli hidrolik iletkenliğe sahip olmalıdır.
2) Bitişik agrega daneleri geotekstil katmanı boyunca hareket etmemelidir.
3) Geotekstil, servis ömrü boyunca sıvı akışları tarafından taşınabilecek ince parçacıklar nedeni ile tıkanmamalıdır.



Şekil 2.31 : Drenaj sistemlerinde geotekstil uygulanması örnekleri.

Şekil 2.32'de görüldüğü gibi drenaj sistemlerinde geotekstil uygulanması durumunda ince danelerin su ile sürüklenmesine müsaade edilmemektedir. Bu da ancak uygun gözenek açıklığına sahip geotekstilin drenaj sistemlerinde kullanılması ile mümkündür.



Şekil 2.32 : Geotekstilin filtrasyon fonksiyonu.

Filtrasyon uygulamasında kullanılacak geotekstilin yukarıda sayılan görevleri yerine getirebilmesi için uygun maksimum gözenek açıklığına, yeterli su geçirgenliğine, uygun sıkışma oranına ve yüksek poroziteye sahip olması istenmektedir. Geotekstilin yerleştirilmesinden sonra, zemin içindeki su ile birlikte bir miktar ince daneli zemin de taşınmaktadır. İlk etapta taşınan bu malzemenin geotekstilden geçmesi beklenmektedir. Eğer bu ince daneler geotekstil bünyesinde tutulursa, az geçirimli bir tabaka oluşur ve suyun akışı engellenir. Su akışına engel olmamak ve boşluk suyu basıncının oluşumunu önlemek için geotekstilin geçirgenliği en az zemin geçirgenliği kadar olmalıdır.

İri daneli zeminler yerine filtrasyon veya drenaj amaçlı örgüsüz geotekstil kullanımı, karayolları drenaj uygulamalarında çok tercih edilmektedir. Geotekstiller, zemine oranla çok daha yüksek geçirgenliğe sahiptirler. Özellikle gözenekli olduklarında ve

yeterli eğim sağlandığında, kendi düzlemlerinde suyu iletebilirler. Bu özellikleri nedeniyle su tahliyesinin gerekli olduğu birçok mühendislik uygulamasında kullanımı büyük avantajlar sağlamaktadır. Filtre malzemesi olarak kırmataş kullanılması durumunda, kırmataşın köşeli yapıda olması nedeniyle kenetlenmenin fazla olması, permeabilitenin düşmesi ve köşeli kırmataş malzemenin geotekstile zarar vermesi gibi olumsuzluklar ortaya çıkabilir. Özellikle yüksek plastisiteli kil olan bölgelerde kırmataş drenaj sistemlerin tıkanmasına karşı geotekstilin kullanılması halinde geotekstilin yırtılıp hasar görmemesi için geotekstil malzemesi üzerine 20-30 cm kalınlığında dere malzemesi serilmeli veya dayanımı yüksek olan geotekstil kullanılmalıdır.

Yol altı drenaj sistemlerinde, drenaj boruları etrafında sarılan geotekstilin geçirgenliğinde zamana bağlı olarak azalma olduğu yapılan araştırmalarda gösterilmiştir (Snyder (1995) ve Snyder ve Bruinsma (1996)). Fakat bazı araştırmalarda da iklim şartlarına bağlı olarak, drenaj boruları etrafında sarılan geotekstilin 2~5 yıl hizmet ömrü sonunda incelendiğinde dahi, geçirgenlik ve drenaj performansında herhangi bir kaybın görülemediği de araştımalar sonucunda görülmüştür (Sabiri ve diğ., 2020). Bakımı kolay ve uzun ömürlü olan geotekstil filtreler, kentsel alanlarda kum filtrelerine bir alternatif olarak kullanılmaktadır. Franks (2015) tarafından yapılan çalışmada, Maryland'deki yağmur suyunun arıtılması için geotekstil filtrenin saha etkinliği incelenmiştir. Sonuçlar, getoekstil filtrenin, park yeri yağmur suyundaki toplam askıda katı madde konsantrasyonlarını önemli ölçüde azaltabildiğini göstermektedir. Uygulama alanından çıkarılan geotekstilin gözeneklerinde tıkanma olduğu, geçirimlilik değerinin %65–82 oranında düştüğü tespit edilmiştir. Buna rağmen uygulama sahasından çıkarılan geotekstillerin nihai hidrolik iletkenliklerinin tipik tıkanmamış tek tip kumdan 25 kat daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Bu çalışma sonucunda elde edien bilgilere dayanarak, geotekstillerin elverişli geçirgenlik değerleri ve basit kurulumları göz önüne alındığında geleneksel kum filtreleri yerine kullanılabilineceği düşünülmektedir (Franks ve diğ., 2015). Geotekstiller, zemine oranla çok daha yüksek geçirgenliğe sahiptirler. Özellikle gözenekli olduklarında ve yeterli eğim sağlandığında, kendi düzlemlerinde suyu iletebilirler. Bu özellikleri nedeniyle su tahliyesinin gerekli olduğu birçok mühendislik uygulamasında kullanımı büyük avantajlar sağlamaktadır (Ajmeri ve Ajmeri, 2016).

Geotekstillerin önemli kullanım alanları arasında drenaj ve filtrasyon uygulamalarında bulunduğundan dolayı, geotekstillerin hidrolik özellikleri son derece önemlidir. Geotekstillerin hidrolik özellikleri, çok uzun bir geçmişi olmayan yeni yöntem ve araçlarla belirlenir. Bu özelliklerin en önemlileri porozite, permitivite ve transmisivite olarak sıralanabilir (Shukla ve Yin, 2006). Porozite, geotekstilin boşluk hacminin toplam hacmine oranıdır. Geotekstil tabakasının, kendi düzlemine dik doğrultudaki geçirimliliğine permitivite adı verilir. Permitivite, bir geotekstilin kendi düzlemine dik bir akış durumundaki geçirimlilik katsayısının geotekstil tabakası kalınlığına oranı olarak da tanımlanabilir (Koerner ve diğ., 1988). Geotekstillerin diğer bir önemli hidrolik özelliği transmisivitedir. Transmisivite bir geotekstil tabakasının, kendi düzlemi boyunca geçirimliliğini ifade eder. Birim genişlikten, birim hidrolik eğim altında, birim zamanda geçen su miktarı olarak da tanımlanabilir. Geotekstilin kendi düzlemi boyunca geçirimlilik katsayısının, tabaka kalınlığı ile çarpılması sonucu elde edilmektedir.

Geoteknik uygulamalarında filtre tabakası olarak çoğunlukla, örgüsüz geotekstil ve granül agrega tabakasından oluşan bir sistem tercih edilmektedir. Geotekstillerin filtrasyon performansını görünür açıklık boyutu (AOS) belirlemektedir. Geotekstil ve granüler malzemeden oluşan drenaj tabakasının performansının değerlendirilmesi için, geotekstil ve granüler malzemeden oluşan sistemlerde fiziksel tıkanmayı araştırmak için çoğunlukla ASTM D5101 standartında tanımlanan uzun süreli filtrasyon deneyi yapılmaktadır. Aydilek ve Edil, kirlenmiş atıksu arıtma çamurları ve farklı örgüsüz geotekstillerden oluşan drenaj sistemlerinin filtrasyon davranışlarını belirlemek için uzun süreli filtrasyon deneyleri yapmışlardır. Çamur-örgüsüz geotekstil sistemlerinin filtrasyon performansı laboratuvarda belirlendikten sonra saha uygulama alanlarında gözlem hücreleri açılarak performansları değerlendirilmiştir. Araştırma sonucu seçilen geotekstil türünün, çamur – örgüsüz geotekstil sisteminin filtrasyon davranışına etkisinin önemini göstermiştir. Permittivite oranı (ΨR) olarak adlandırılan bir başka oran, filtrasyon deneyinden sonra geotekstil permitivitesinin, geotekstilin başlangıç permitive değerine oranı olarak tanımlanır. Bu oran, tıkanmamış bir geotekstil için 1'e eşit olmalıdır, bu da geotekstilin kapasitesinde herhangi bir değişiklik olmadığını gösterir. Uygulamaların ve diğer faktörlerin (örneğin kimyasal ve biyolojik tıkanıklık) kritikliği göz önünde bulundurulduğunda, çamurlar için filtreler kullanıldığında %20'ye varan bir azalmaya (bu 0.8'lik bir geçirgenlik oranına

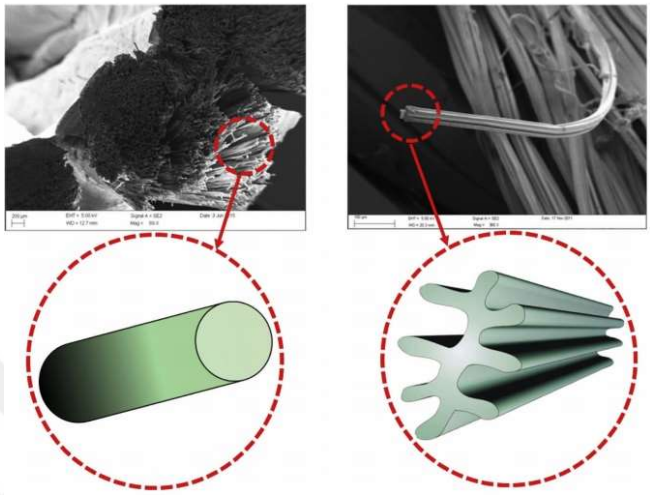
karşılık gelir) izin verilmektedir. Aydilek ve Edil (2002), KR= 3 ve ΨR =0.8, çamur-geotekstil sistemlerinin kabul edilebilir tıkanma sınırı olarak belirtmişlerdir (Aydilek ve Edil, 2002).

Bazı uygulamalar için, örgüsüz bir geotekstil filtre malzeme, deformasyonlara karşı gerekli mekanik özelliklere sahip olmayabilir ve genellikle tasarımda ilave bir örgülü geotekstil kullanılır. Güçlendirme, bu iki katmanlı geotekstil sistemlerden beklenen önemli bir işlev olsa da, filtrasyon, uzun vadeli performans için kritik olan başka bir işlevdir. Kutay (2005) tarafından yapılan araştırmada, dört farklı örgülü/örgüsüz geotekstil kombinasyonunun uçucu kül ve deniz dibi tarama malzemesinin performansının değerlendirilmesi için bir laboratuvar deney programı gerçekleştirilmiştir. Ayrıca deney sonuçlarının karşılaştırılabilmesi için iki örgülü geotekstilin tek tabaka olarak performansı değerlendirilmiştir. Sonuçlar, hem uçucu kül ve hem de taranmış çökeltilerin, örgülü geotekstil ve örgülü/örgüsüz geotekstil kombinasyonların filtre performansının başarılı olduğunu göstermiştir. Ayrıca, tek tabaka örgülü bir geotekstil yerine iki katmanlı bir geotekstil sisteminin kullanımının filtrasyon kapasitesini önemli ölçüde arttırdığını göstermiştir. Çökelti-geotekstil arayüzünde, uçucu kül-geotekstil arayüzünden daha yüksek miktarlarda ince malzeme birikimi olduğu tespit edilmiştir (Kutay ve Aydilek, 2005). Ayrıca ince dane oranı yüksek geomalzemeler yüksek tıkama potansiyeline sahip malzemelerdir .

Drenaj ve filtre amaçlı kullanılan geotekstillerde, kulanıldıkları alana göre farklı tıkanma mekanizmaları gelişmektedir. Örneğin katı atık sahalarındaki drenaj ve filtre katmanları, diğer mühendislik çalışmalarına göre daha şiddetli tıkanma mekanizmalarıyla başa çıkmak zorundadır. Sızıntı suyu, filtrelerin fiziksel, kimyasal ve biyolojik olarak tıkanmasına neden olabilen karmaşık ve heterojen bir malzemedir ve farklı araştırmacılar, laboratuvar ve saha koşullarında granüler ve geotekstil tıkanmaları üzerine çalışmalar yapmışlardır.

Geleneksel geotekstiller yalnızca doymuş koşullar altında düzlem içi akış sağlayabilirken, gelişmiş bir yanal drenaja sahip geotekstillerin temel amacı, doymamış koşullar altında akışı harekete geçirmektir. Bu şekil 2.33'de görüldüğü gibi geotekstil elyaflarında yapılan küçük oluklar ile sağlanmaktadır. Şekil 2.33'de geleneksel geotekstil elyafının büyütülmüş görüntüsünde bu olukların olmadığı görülmektedir. Bu yapıdaki geotekstilin gözenek boşluklarından suyun drenajı, yalnızca bitişik zemin doygunluğa ulaştıktan sonra yerçekimi nedeni ile

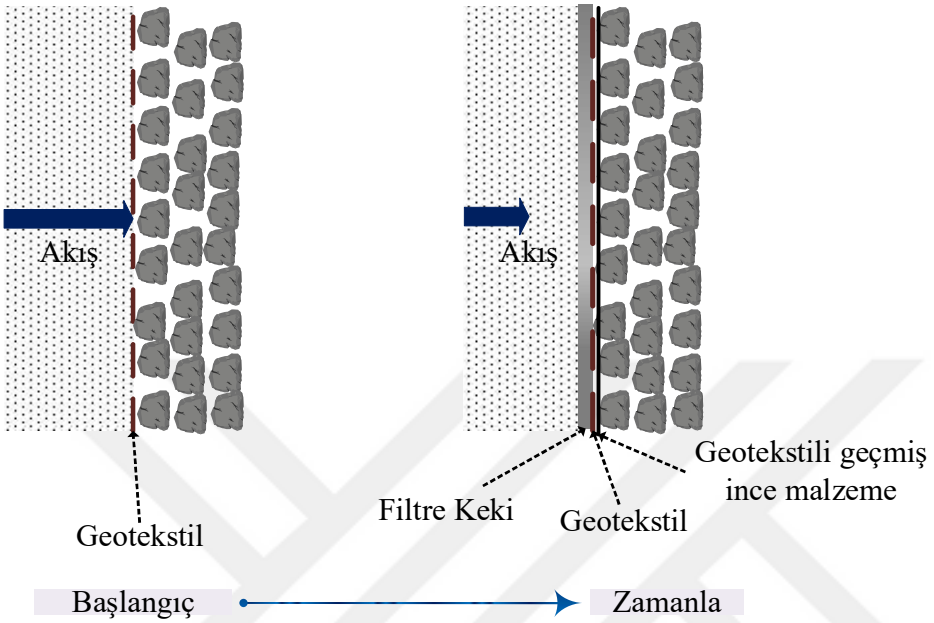
yapılabilmektedir. Gelişmiş bir yanal drenaja sahip geotekstil kesitinden görülebileceği gibi liflerde bulunan oluklar, kılcal borular gibi davranarak, sıvıyı dar kanallardan elyafın uzunlamasına ekseni boyunca iletir. Daha doğrusu, elyaf etrafındaki zeminden suyu çekmekte ve kanalları boyunca iletmektedir (Zornberg ve diğ., 2017a).



Şekil 2.33 : Geotekstil üretiminde kullanılan liflerin kesitleri, (a) geleneksel lif, (b) oluklu elyaf lif (Zornberg ve diğ., 2017a)**.**

Drenaj amaçlı kullanılan geotekstillerde fiziksel, kimyasal ve biyolojik olmak üzere farklı tıkanma türleri gerçekleşebilmektedir. Fiziksel tıkanmaya granüler malzemenin ihtiva ettiği ince dane oranı ve geotekstilin görünür açıklık boyutu ile ilgili olduğu birçok araştırmada bildirilmiştir. Nam ve diğ. (2014) ve McCulloch ve diğ. (2017), laboratuvarda %0, 2, 4 ve 6 ince dane oranlarına sahip RCA malzemesi ile drenaj sistemlerinde kullanılan örgülü bir geotekstilin tıkanmasını incelemiştir. Sonuçlar, RCA-örgülü geotekstil sisteminin geçirgenliğinin RCA'nın ince dane oranındaki artışla azaldığını, ancak geotekstilin tıkanmadığını belirtmişlerdir (McCulloch ve diğ., 2017; Nam ve diğ., 2014). Şekil 2.34'den görüldüğü gibi drenaj sisteminde akış koşullarına bağlı olarak zamanla geotekstil malzemenin üstünde göç eden ince danelerin birikimi ile filtre keki oluşabilir. Bu filtre keki oluştuktan sonra, akış en küçük agrega danelerinin tutulması, suyun geçişinede izin verilmesi şeklinde devam etmektedir. Filtre keki oluşumu, agrega-geotekstil sisteminde denge olarak kabul edilebilir. Sistem, köprüleme ağı oluşturarak filtrasyon işlemi açısından dengeye ulaşırsa, geotekstil malzemenin hizmet ömrü için filtrasyon işleminden şüphe duyulmayabilir. Koerner ve Ko'ya göre geotekstil filtrenin memba tarafında filtrasyon

kekinin oluşması için gereken süre 24 ile 1000 saat arasında değişmektedir. Filtre kekinin bir sonucu olarak gözlemlenen filtrasyon davranışı, geotekstil görünür açıklık boyutunun (AOF), yoğunluğunun ve agrega malzemenin dane çapı dağılımının bir fonksiyonudur (Aydilek ve diğ., 2005).

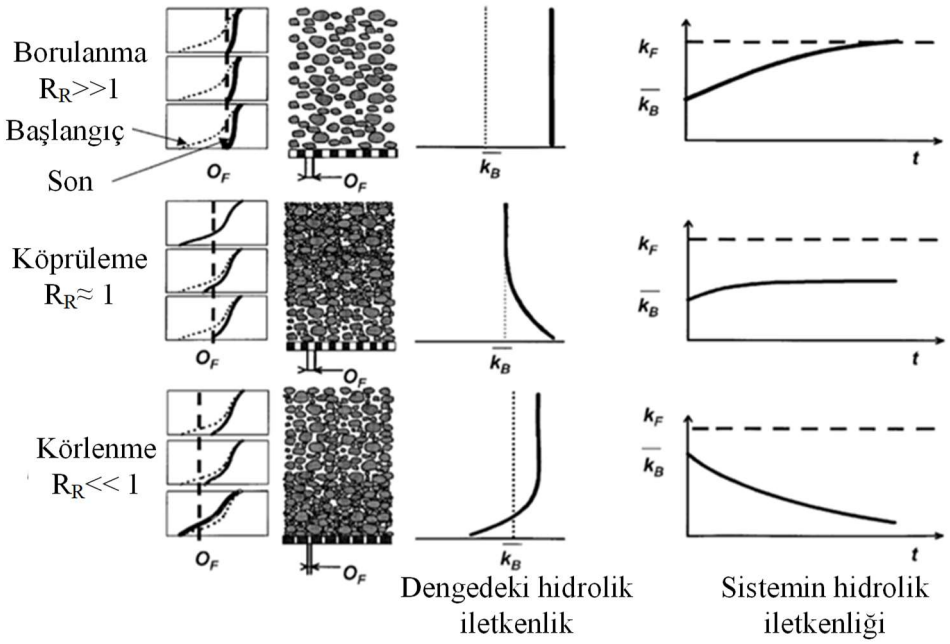


Şekil 2.34 : Agrega-geotekstil drenaj sisteminin zamana bağlı davranışı (Miszkowska ve diğ., 2017)**.**

Sistemde filtre keki oluşmasında geotekstilin karakteristik gözenek açıklık boyutu ve geçirgenlik parametreleri etkilidir. Gözeneklerin çok büyük olması durumunda zemin daneleri gözeneklerden kolaylıkla geçebilir ve sistemde borulanma yaşanabilir. Borulanma ile çeşitli boyutlarda zemin danelerinin kaybını içeren erozyon gelişebilir. Öte yandan, geotekstil gözenekleri çok küçükse, zaman geçtikçe, geotekstil tıkanarak zemin danecikleri birikmeye başlayarak, körlenme veya tıkanma gelişebilir. Tıkanma, geotekstilin çok küçük görünür göz açıklığına sahip olması nedeniyle gelişen başka bir durumdur. Bu durumda geotekstil yüzey ile doğrudan temas eden iri danecikler filtre açıklıklarını tıkayarak ince daneciklerin ve suyun geçişini engeller.

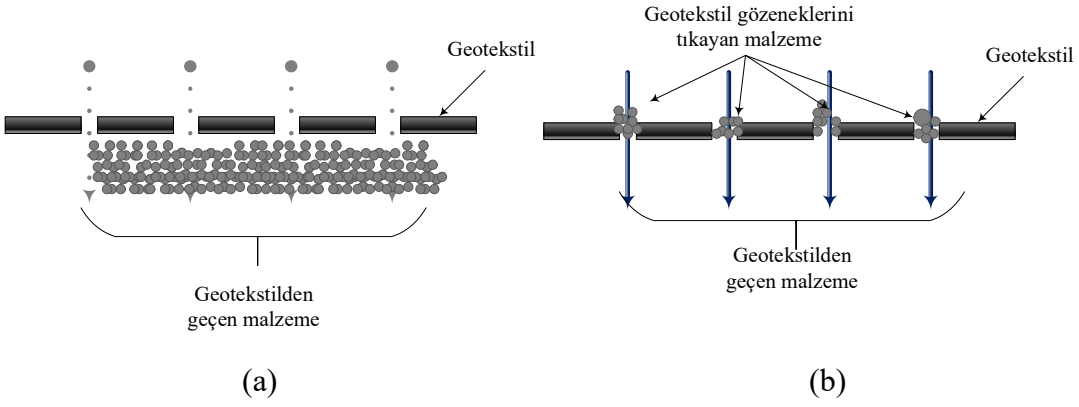
Fiziksel tıkanma nedeni ile geotekstilde körlenme meydana gelebilmektedir. Körlenme, ince danecikler geotekstil ara yüz bölgesinde göç ettiğinde ve biriktiğinde meydana gelir ve bu, ara yüz bölgesinde gözenekliliğin azalmasına yol açar. Daha sonra, hidrolik iletkenlik ince partikül biriktirme bölgesinde lokal olarak artar, ancak geotekstil ile arayüz bölgesinde azalır. Bu nedenle sistem, hidrolik iletkenlik açısından dengeyi sağlayamaz ve ortalama geçirgenlik zaman geçtikçe azalabilir. Geotekstilin

çok dar gözenek açıklıkları nedeniyle ince parçacıklar filtre kumaşına nüfuz ederken tıkanma meydana gelecektir. Geotekstilin üst yüzünde ince danecikler birikebilir ve bu biriken danecikler drenaj kanallarının çalışmasını engelleyebilir. Kalın örgüsüz geotekstiller daha büyük tıkanma riskine sahiptir. Borulanma, köprüleme ve tıkanma kavramsal olarak Şekil 2.35' de gösterilmektedir. Drene edilecek zemin ve geotekstil filtre kombinasyonunun tutma oranı, R_R (O_F/d_I)geotekstilin en büyük açıklık boyutu ile tutulacak parçacıkların karakteristik boyutu arasındaki oran olarak tanımlamaktadır. Lafleur deney programında agreganın d çapını belirlerken minimum miktarda yıkanmış parçacıklar içeren d_I değerini belirlemişlerdir. Karakteristik dane boyutunu (d_I) tanımlarken 2.5 kg/m^2'den daha az agreganın yıkandığı dane çapı olarak tanımlanmıştır ve %I değerini belirlemişlerdir. İyi derecelendirilmiş zeminlerde %50<I<%80 için kararlı kombinasyonların oluştuğu bildirilmiştir. Kötü dercelenmiş zemin için, minimum yıkanan malzeme miktarı minimum boşluk oranında meydana gelmiştir. Uygun geometrik ve hidrolik kouşllara sahip bir agregada ince daneler mevcutsa iri danelerin kenetlenmesi ile ince malzemelerin yıkanması engellenebilir. Ayrıca temel agregasının ve filtre malzemesinin arayüz bölgesindeki danelerin uzun vadede stabilitesini sağlamak için geotekstilin eşdeğer açıklık boyutunun iyi seçilmesi gerekmektedir. R_R değerine göre drenaj sisteminde 3 farklı durumun oluşabileceği düşünülebilir. Bu durumlar, $R_R>>1$ ise sistemde borulanmanın meydana geldiği, $R_R\approx1$ olması durumunda sistemin dengede olduğu, $R_R<<1$ değerinde ise sistemde tıkanma (körlenme) olduğu şeklinde tanımlanmaktadır. Şekil 2.35'de iyi derecelenmiş agregalarda, boşluk oranı, dane boyutu dağılımı, hidrolik iletkenliğin değişimi arasındaki ilişki verilmiştir. Ayrıca Şekil 2.35'de, hidrolik iletkenliğin derinlik ile değişimi de görülmektedir (Lafleur, 1999). Agrega ve geotekstilden oluşan drenaj sisteminin uzun vadede stabilitesini sağlamak için hem agreganın dane çapı dağılımı hem de geotekstilin gözenek açıklığı (O_F) dikkatlice seçilmelidir.



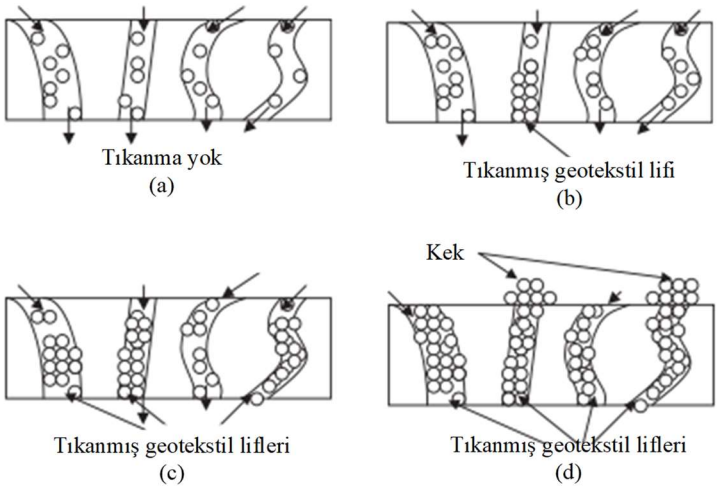
Şekil 2.35 : Farklı Geotekstil açıklık boyutu ve zemin davranışları ile ilişkili mekanizmalar (J.Lafleur, 1999) **(a)** Borulanma, **(b)** köprüleme, **(c)** körelme. (Lafleur, 1999)

Şekil 2.35'te sol taraf: Agrega dane boyutu dağılımı ve geotekstil çevresindeki değişimi (noktalı eğri: başlangıç dane çapı dağılım eğrisi; düz eğri: son dane çapı dağılım eğrisi) grafiğini, merkez sol: Ortaya çıkan granüler yapının şematik halini, merkez-sağ: geotekstil ile olan mesafeye bağlı olarak ortaya çıkan agrega hidrolik iletkenliğinin profilini (k_B: zeminin başlangıçtaki hidrolik iletkenliği (noktalı çizgi)), sağ taraf: k_F'nin k_B'ye (geotekstilin başlangıçtaki hidrolik iletkenliği) kıyasla zamana bağlı olarak değişimini göstermektedir. Borulanma ve tıkanma durumları ayrıntılı olarak Şekil 2.36'da gösterilmektedir.



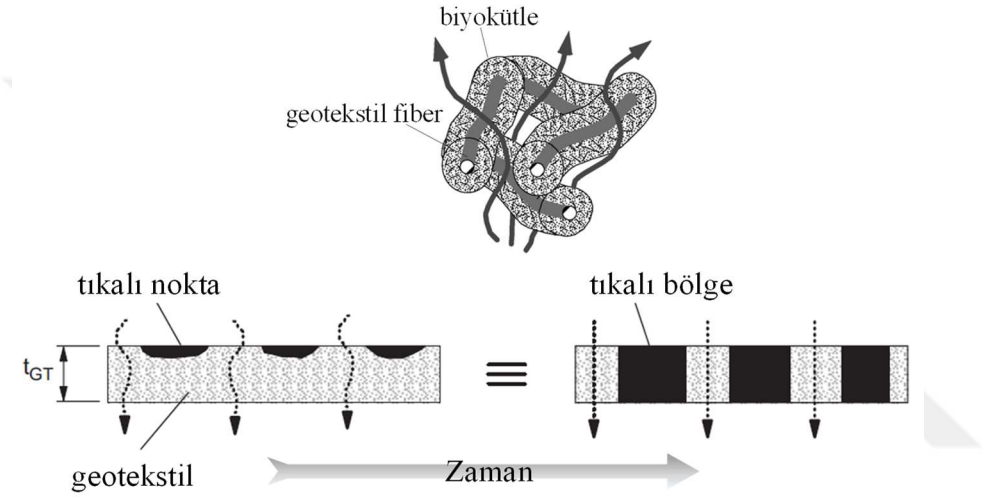
Şekil 2.36 : (a) Geotekstil gözenek açıklığı büyük olduğu için dane göçü yaşanıyor **(b)** Geotekstil gözenek açıklığı küçük tıkanma yaşanıyor.

Örgüsüz geotekstilin kimyasal tıkanması, ince agreganın fiziksel göçü nedeni ile ilgili tıkanmadan farklı mekanizma ve davranışlarda oluşur. McIsaac ve Rowe (2006), bir mezokozm hücre (büyük ölçekli deney tankları) düzeneği kullanarak bir çöp sahasında tipik bir sızıntı suyu toplama sistemini simüle edip örgüsüz geotekstilin, örgülü geotekstile göre kimyasal tıkanmaya karşı daha yüksek direnç gösterdiğini bildirmişlerdir (McIsaac ve Rowe, 2006). Bir filtre malzemesinde açık gözenekler, suyla beraber ince daneciklerinde geçebildiği bir boru hattı oluşturmaktadır. Tıkanma olmadığı sürece, filtre sisteminde dolaşan suyun toplam akış hızı, her bir borudaki farklı akış hızlarının toplamı olarak tanımlanmaktadır. Suyla beraber ince daneciklerinde hareket ettiği sistemde, süspansiyon halindeki danecikler aşamalı olarak her boruya yerleşerek parçacık birikimine yol açmaktadır, bu durumda borularda danecik birikimine rağmen sistemin çalışmasını engelleyecek herhangi bir tıkanma gözlemlenmemektedir, tıkanmanın meydana gelmediği düşünülmektedir (Şekil 2.37a). Böyle bir birikme, akış hızına ve borunun boyutuna bağlı olarak farklı sürelerde meydana gelmektedir. Zamanla bazı borular tıkanabilir ve bu da boruda "biriken, yığılan" partiküllerin aşamalı olarak artmasına yol açabilir (Şekil 2.37b). Borularda parçacıklar birikirken veya yığılırken gittikçe daha az sayıda boru su akışına açık kalabilir ve seri halinde birikim baskın hale gelir (Şekil 2.37c). Ayrıca, tamamen tıkanmış bazı boruların üzeri "kek" şeklinde biriken parçacıklarla tamamen doldurulmuş olabilir (Şekil 2.37d) (Faure ve diğ., 2006).



Şekil 2.37 : Daneciklerin birikme mekanizması: **(a)** tüm borular açık (tıkanma yok), **(b)** birkaç boru tıkalı, **(c)** boruların çoğu tıkalı ve **(d)** geotekstilin üzerinde filtre keki oluşmuş (Faure ve diğ., 2006).

Biyolojik tıkanma nedeniyle geotekstil geçirgenlik katsayılarında büyük düşüşler gözlemlenmiştir. Deneylerden sonra geotekstil numunelerinin görsel ve mikroskobik incelemeleri sonucu tıkanma mekanizmasının geotekstilin ilk lif katmanlarında yoğunlaştığı görülmüştür. Şekil 2.38 (a)' da bu durum görülmektedir Şekil 2.38 (b)' de ise geotekstil lif kalınlığının tamamında oluşan biyolojik tıkanma görülmektedir. Geçirgenlik katsayısının zamanla azalması, geotekstil içindeki biyokütlenin artmasıyla tutarlıdır. Geotekstil kalınlığı ve lifler arasındaki mesafenin biyolojik tıkanma gelişimi için ilgili parametreler olmadığı deney sonuçları ile gösterilmiştir (Palmeira ve diğ., 2008).



Şekil 2.38 : (a) Biyolojik tıkanma **(b)** Geotekstil tıkanmış yüzey alanının zamanla değişimi (Palmeira ve diğ., 2008).

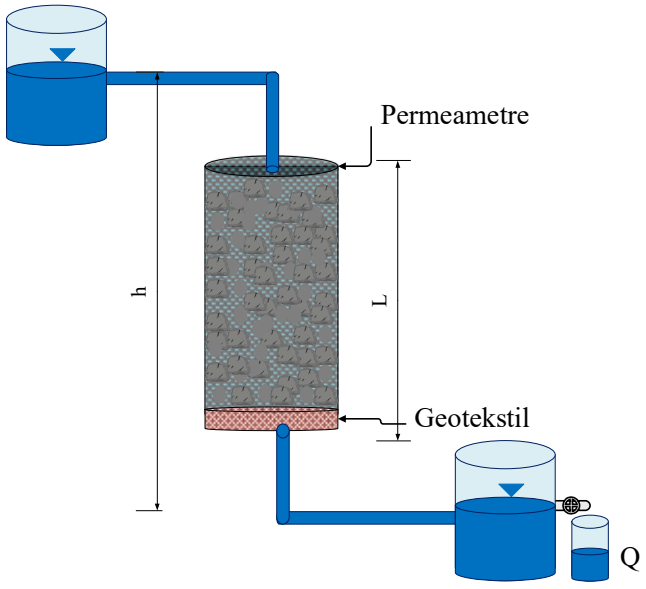
Örgülü geotekstilin kimyasal tıkanması sadece ince danelerin fiziksel göçü ile ilgili değildir. McIsaac ve Rowe (2006) bir çöp sahasında tipik bir sızıntı suyu toplama sistemini modellemişler ve örgülü geotekstilin kimyasal tıkanmaya karşı örgüsüz geotekstilden daha yüksek direnç gösterdiklerini tespit etmişlerdir (McIsaac ve Rowe, 2006). Nam ve diğ. (2014) Fransız kanalizasyonlarında kullanılan örgülü bir geotekstilin RCA numunesi ile laboratuvarda %0, 2, 4 ve 6 ince dane oranları ile tıkanma davranışlarını incelemişlerdir, ince dane oranı arttıkça geotekstilin kimyasal tıkanma potansiyelinin arttığını bildirmişlerdir. (Nam ve diğ., 2014).

Çoğu geotekstil, toprak kirliliğiyle ilgili çevresel sorunları içeren poliolefin, polyester veya poliamid ailesinin polimerlerinden oluştuğu için uzun süreli kullanım sürecinde rüzgar, su, sürtünme ve UV radyasyonu gibi dış çevresel faktörler nedeniyle sentetik polimerlerin çökmesine neden olarak çevredeki ortamda mikro plastiklerin birikmesine neden olabilirler. Son yıllarda, yeşil geotekstiller, akıllı geotekstiller ve

yüksek performanslı geotekstiller üzerinde çalışmalar yapılmaktadır. Doğal liflerden yapılan geotekstillerin özellikleri çoğu uygulamanın ihtiyacını karşılamakta, düşük maliyete ve biyolojik olarak parçalanabilirliğe sahiptirler. Bu nedenle, doğal geotekstiller, sentetik geotekstillerin yerini alma potansiyeline sahiptirler (Sabiri ve diğ., 2020).

2.6 Uzun Süreli Filtrasyon Deneyi

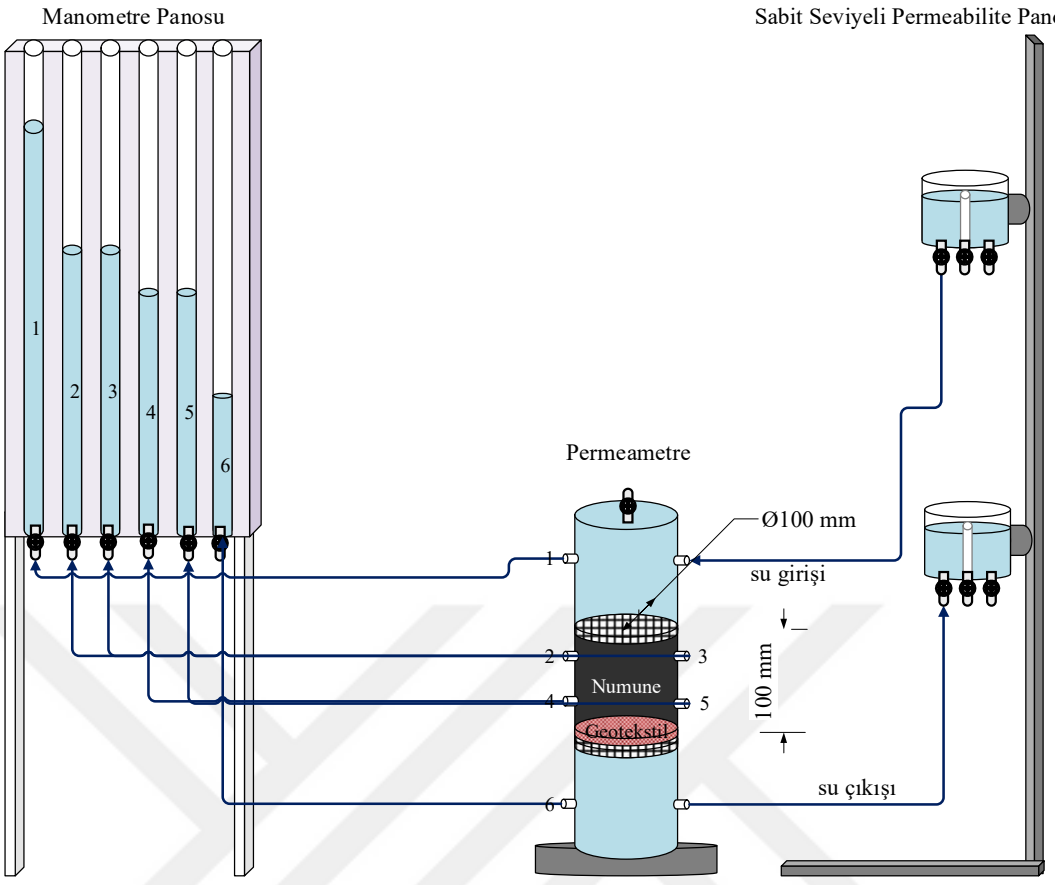
ASTM (1990) plastisite indisi %5'in altında olan zeminlerin geotekstil tıkanma potansiyelini değerlendirmek için D5101 standartını oluşturmuştur. Bu standartın güncel hali 2012 yılında yayınlanan D5101-12'dir. ASTM D5101 standartında geotekstillerin suya doygun agregalar ile uyumluluğunu tek yönlü akış koşulları altında belirlemek için tanımlanan deney yöntemi açıklanmıştır. Bu deney yöntemi, belirli hidrolik eğimler altında agrega-geotekstil sisteminin zamana bağlı geçirgenliğinin belirlenmesinde kullanılmak üzere tasarlanmıştır. Elde edilen sonuçlar agrega-geotekstil sisteminin uyumluluğunun bir göstergesi olarak kabul edilmektedir. Bir projenin tasarım aşamasında agrega-geotekstil performansını (örneğin, tıkanma, partikül kaybı) belirlemeye yardımcı olabilecek niteliksel veriler sağlamak için ASTM D5101 standarında tanımlanan deney yöntemi kullanılmaktadır. Şekil 2.39' da verilen Sabit seviyeli permeabilite deney düzeneği geliştirilerek ASTM D5101 standartında tanımlanan uzun süreli filtrasyon deney sistemi tasarlanmıştır.



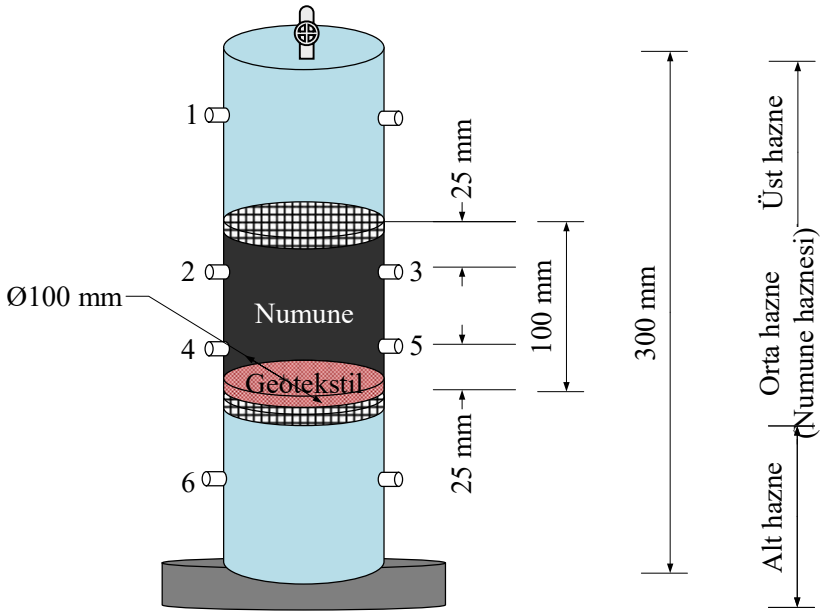
Şekil 2.39 : Sabit seviyeli permeabilite deneyi.

ASTM D5101 standartında tanımlanan uzun süreli filtrasyon deney sistemi ve permeametresi Şekil 2.40'ta verilmiştir. Şekil 2.40 (a)'da görüldüğü gibi uzun süreli filtrasyon deney sisteminin ana ekipmanları olarak agrega-geotekstil permeametresi, iki adet sabit su seviyeli hazne ve manometre panosudur. Deney permeametresi 3 bölümden oluşmaktadır. Şekil 2.40 (b)' de verilen üst hazne, su haznesine bağlanır ve içindeki basınç da hazneye bağlı bir manometre ile izlenir. Orta hazne, granüler malzemenin (doğal agrega veya geri dönüşüm malzeme) geotekstil üzerine yerleştirildiği alandır. Hem granüler malzeme hem de geotekstilin bulunduğu orta bölüm, üstünde ve altında delikli geçirgen plakalar kullanılarak sabitlenmektedir. Permeametrenin çapı en az 10 x d_{100} olması gerekmektedir, burada d_{100} permeametre içine yerleştirilen zeminin en büyük dane çapıdır. 16 mm'den daha büyük danelerin (elek #5⁄8 inç) olduğu durumlarda, deney için sadece 16 mm'den küçük çaplı agregalar kullanılmalıdır. Şu ana kadar ASTM D5101 standartına uygun olarak imalatı yaptırılmış deney sistemlerinde permeametre çapı maksimum 100 mm dir.

Granüler malzeme üzerindeki su basıncı orta bölüme yerleştirilmiş iki farklı seviyede yer alan dört manometre ile ölçülmektedir. Manometreler orta bölümün alt kısmından 25 mm (2-3 manometreleri) ve 75mm (4-5 manometreleri) yüksekliklere yerleştirilmektedir. Alt bölme ise benzer şekilde, çıkış haznesine bağlanır ve içindeki basınç 6 numaralı manometre kullanılarak ölçülmektedir.



(a)



(b)

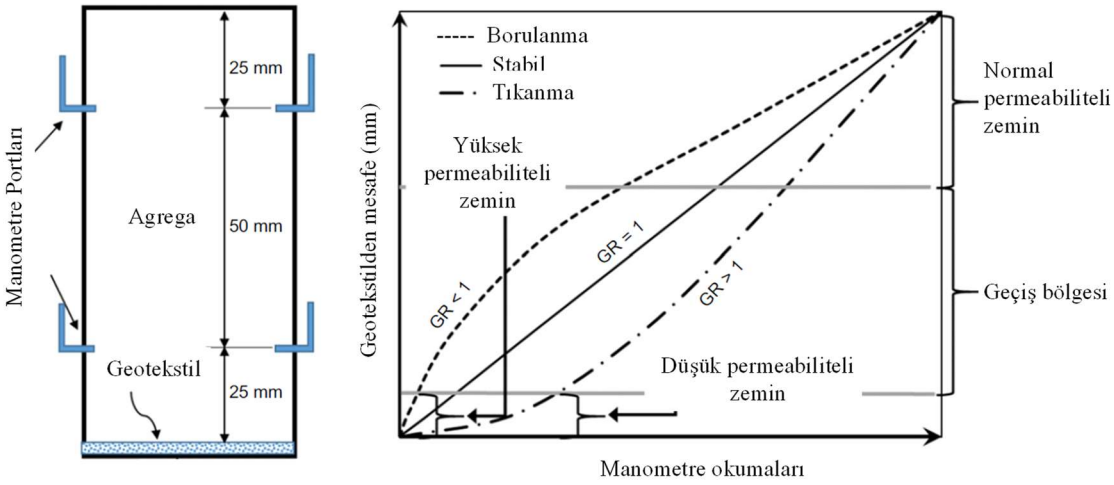
Şekil 2.40 : ASTM D5101 sandartında tanımlanan **(a)** uzun süreli filtrasyon deney düzeneği. **(b)** ASTM D5101 deney sistemi permeametresi

2-3 ve 4-5 manometreleri basınç okumaları arasındaki fark, agrega hidrolik eğimini, 4-5 ve 6 manometre basınç okumaları arasındaki fark, agrega ve geotekstilin oluşturduğu sistemin hidrolik eğimini temsil eder, elde edilen bu değerler arasındaki oran hidrolik eğim oranı olarak tamınlanır ve sistemin tıkanmasını değerlendirmek için kullanılmaktadır. Bir diğer tıkanma endeksi olan geçirimlilik oranı ise agreganın permeabilite katsayısının (k_{agrega}), agrega ve geotekstilin oluşturduğu sistemin permeabilite katsayısına (k_{sistem}) oranıdır.

$$GR = \frac{i_{agrega+geotekstil}}{i_{agrega}} \tag{2.3}$$

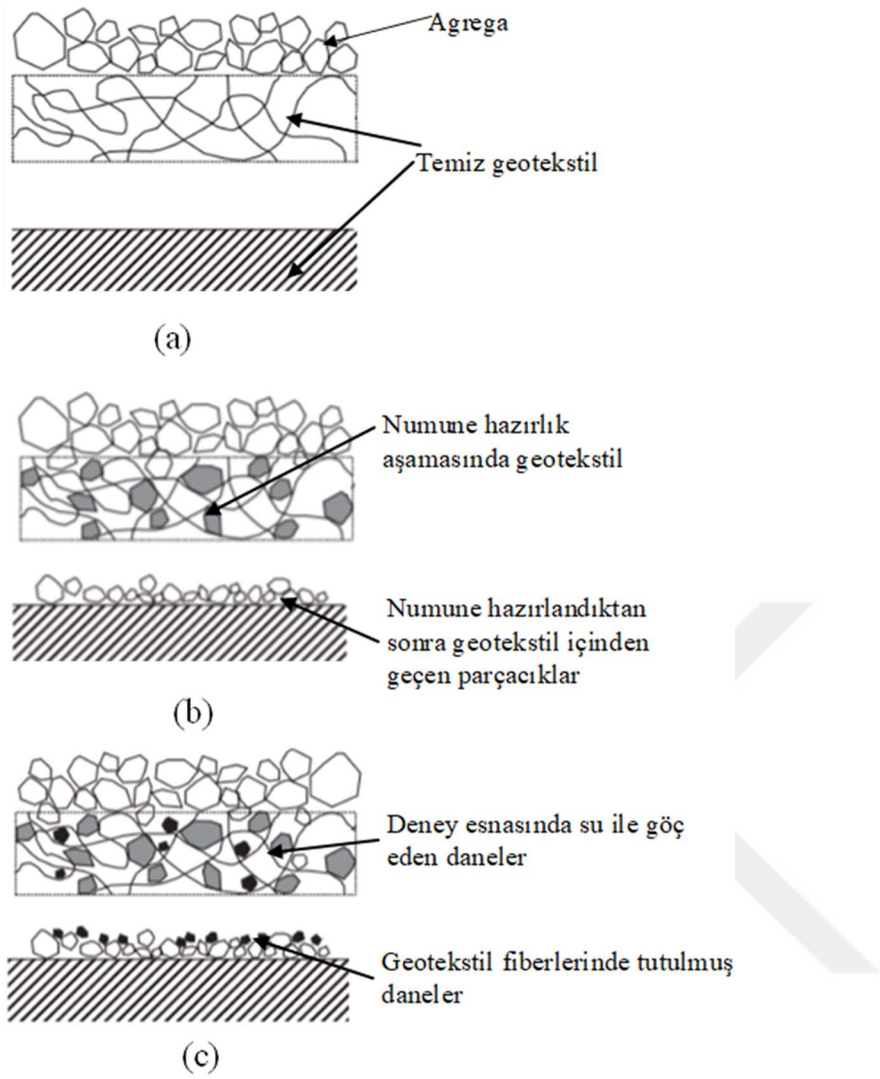
$$\mathrm{KR} = \frac{\mathrm{k_{agrega}}}{\mathrm{k_{sistem}}} \tag{2.4}$$

Agrega-geotekstil sistemi herhangi bir akış kısıtlaması yaşarsa, geotekstile yakın bölgedeki permeabilite değerinin, agreganın permeabilitesinden daha düşük olması beklenir. Bu durumda agrega-geotekstil sisteminde geçirimlilik oranının 1'den büyük olacağı için (KR> 1) sistemde tıkanma meydana geldiği söylenebilir. Şekil 2. 41'de de görüldüğü gibi tıkanma veya körleşme durumunda, numune hücresindeki hidrolik yük kaybı dağılımının dışbükey bir şekle sahip olması beklenmektedir. Borulanma durumunda ise geotekstile yakın bölgedeki permeabilite değerinin, agreganın permeabilitesinden daha büyük olması beklenir (Abbaspour ve diğ., 2018).



Şekil 2.41 : Farklı senaryolar için uzun süreli filtrasyon deneylerinde agrega numunesi içindeki manometre yük kaybı dağılımı (Abbaspour ve diğ., 2018).

Uygulamada örgüsüz geotekstiller daneli agreganın serilmesi ve sıkıştırılması aşamalarında veya hizmet ömrü boyunca sızıntı kuvvetlerinin etkisi ile dane göçü ve göç eden bu danelerin geotekstil malzemede tutulması sonucu tıkanabilir. Sahada geotekstil ve agrega malzemenin yerleştirilmesi esnasında geotekstil boşluklarına agrega daneleri nüfuz edebilir, bu durum agrega-geotekstil drenaj sistemini geçirgenliğini, geotekstilin tutma kapasitesini etkileyebilir. Sahadaki koşulların laboratuvarda modellenmesi için yapılan uzun süreli filtrasyon deneyi ile sahada oluşacak tıkanma davranışlarının laboratuvarda incelenmesi amaçlanmaktadır. Böylece agrega-geotekstil sisteminin arazide uygulama esnasında göstereceği filtrasyon performansı ile ilgili ön bilgi edinilmiş olunmaktadır. Agrega ve geotesktilden oluşan drenaj sisteminin tıkanma performansını laboratuvarda değerlendirmek için hazırlanacak olan deney numunesinde başlangıçta, numune hazırlama aşamasında ve deney sonrasında agrega daneciklerinin geotekstil lifleri ile nasıl etkileşime girdiği şematik olarak Şekil 2.42'de gösterilmiştir. Şekil 2.42(a), geotekstilin deneyin tüm aşamalarında agrega ile temas etmeyeceği varsayımını göstermektedir. Şekil 2.42(b), geotekstil numunesinin numune hazırlandıktan sonra gerçek durumunu gösterir, burada bazı agrega daneleri geotekstil içinden geçerken diğerleri geotekstilin lifli yapısı içinde yakalanmıştır. Uzun süreli filtrasyon deneyi esnasında daha fazla geotekstil tıkanması ve agrega danelerinin borulanması meydana gelecektir. Bununla birlikte, geotekstil içindeki parçacıkların varlığı, filtreden geçebilenlerin boyutunu sınırlayacaktır (Şekil 2.42(b)). Deneyin sonunda, geotekstil içinden geçen agrega daneleri, yukarıda açıklanan mekanizmaların kombinasyonlarının sonucudur (Şekil 2.42(c)). Ayrıca, sıkıştırılması nedeniyle büyük parçacıkların geotekstil boşluklarından atılmasının bir sonucu olarak, bazı borulu agrega danelerinin geotekstilin gözenek boyutundan daha büyük olması beklenmektedir. Agrega ve getoekstil drenaj sisteminin uyumu ve uygunluğunu değerlendirmek için yapılan uzun süreli filtrasyon deneyinde (LFT) elde edilen veriler ile tıkanmayı tanımlayan ve en önemli tıkanma endekslerden biri olan hidrolik eğim oranı (GR) belirlenebilmektedir. ASTM D5101'de GR değeri geotekstil tabakanın üstündeki 25 mm ve 75 mm arasında kalan agrega için hesaplanmaktadır. Ayrıca GR değeri farklı seviyelere yerleştirilen manometre okumaları dikkate alınarakta hesaplanabilmektedir (Palmeira ve diğ., 2005).



Şekil 2.42 : Geotekstilde numune hazırlama ve deney esnasında borulu veya hapsolmuş daneler (a) Deney başlangıcında olağan varsayım, (b) Numune hazırlandıktan sonraki gerçek durum (c) Deney sonunda durum (Palmeira ve diğ., 2005).

İnce dane miktarı fazla olan agrega-geotekstil sisteminde tıkanma derecesini değerlendirmek için hidrolik eğim oranının (GR), deney sistemindeki nispeten küçük bir agrega-geotekstil temas bölgesinin analizinden dolayı temsili olmadığını ve tıkanma performansını değerlendirmek için alternatif oranların kullanımını tavsiye edilmektedir. Uzun süreli filtrasyon deneyi (LFT) bir performans değerlendirme prosedürüdür ve yan duvar sızıntısı olasılığının olmadığı, %100 doygunluk elde edildiği varsayılarak sahadaki koşullarının modellenemesi, biyolojik tıkanma (yosunların büyümesi) potansiyeli ve uzun deney süresinde akışın stabilizasyonunu sağlamak için gerekli olan tüm veriler bu deneyden elde edilmektedir. Bu deneyin; numune hazırlanması (yerleşimi ve sıkıştırma, doygunluğun sağlanması, vb.), deney

numunesinin kurulumu ve deney esnasında (sızıntıya engel olan yosunların oluşmasına engelleme vb.) aynı koşullarda tekrarlanabilirliği hakkında bazı endişeler bulunmaktadır. Bu nedenle uzun süreli filtrasyon deneyinin (LFT) büyük hassasiyet göstererek, biyolojik tıkanmanın yaşanmaması için gerekli önlemler alınarak gerçekleştirilmesi gerekmektedir (Aydilek ve Edil, 2003; Fischer ve diğ., 1999).

Aydilek ve Edil (2002), atık su arıtma çamuru ve dokuz farklı örgülü geotekstilden oluşan sistemlerin filtrasyon performansını incelemişlerdir. Karşılaştırma yapabilmek için bu geotekstilleri ayrıca çamurla aynı dane çapı dağılımına sahip siltli kum ile de uzun süreli filtrasyon deneyine tabi tutmuşlardır. Uzun süreli filtrasyon deneyi öncesi ve sonrasında geotekstil numuneleri üzerinde görüntü analizleri yapmışlardır. Arazi deney hücrelerinde de geotekstillerin atık su arıtma çamuru ile filtrasyon performansını da gözlemlemişlerdir. Arazide, bir kapak altına yerleştirilmiş olan geotekstiller, 6 ila 12 aylık bir süre sonra çıkarılmıştır. Araziden gözlemler sonucu çıkarılan geotekstiller üzerinde geçirgenlik deneyleri ve görüntü analizleri yapılmıştır. Çamurun filtrasyon özelliklerinin, aynı dane boyutu dağılımına sahip olsalar bile, siltli kumunkinden farklı olduğunu bildirmişlerdir. Organik kütlenin varlığı ve çamurun farklı yapısı, daha karmaşık filtrasyon davranışı göstermesine neden olmaktadır. Uzun süreli filtrasyon deneyi çamur malzeme üzerinde yapıldığında belirli sınırlamalara sahiptir. Hesaplanan hidrolik eğim oranı (GR), organik çamur için gerçek tıkanma davranışını yansıtmamaktadır. Bununla birlikte, başka bir tıkanma parametresi olan geçirgenlik oranı (KR) tıkanmanın daha iyi anlaşılmasına izin vermektedir (Aydilek ve Edil, 2002). Ayrıca Aydilek ve Edil (2003), laboratuvarda kirlenmiş organik atık su arıtma çamuru ile altı farklı örgüsüz geotekstilin filtrasyon performansını uzun süreli filtrasyon deneyi ile değerlendirmişlerdir. Performans karşılaştırması yapabilmek için çamurla aynı dane çapı dağılımına sahip inorganik siltli kum ile altı farklı örgüsüz geotekstilin filtrasyon davranışlarınıda incelemişlerdir. Bu iki malzeme ve geotekstilden oluşan drenaj sisteminin uzun süreli filtrasyon deneyleri, uzun süreli filtrasyon deneyi öncesi ve sonrası geotekstil numuneleri üzerinde optik görüntüleme yapmışlardır. Deney sonuçları, çamurun filtrasyon özelliklerinin aynı dane çapı dağılımına sahip olmalarına rağmen siltli kum malzemeninkinden farklı olduğunu belirlemişlerdir. Ayrıca arazide bir kapak altına yerleştirilmiş olan geotekstiller 12 aylık bir süre sonra çıkarılmıştır. Araziden gözlemler sonucu çıkarılan geotekstiller

üzerinde geçirgenlik deneyleri ve görüntü analizleri yapılmıştır (Aydilek ve Edil, 2003).

Kutay ve Aydilek (2005) uçucu kül ve deniz dibi tarama malzeme ile iki tabakalı geotekstil sistemlerinin uzun süreli filtrasyon performansını incelemişlerdir. Geotekstil olarak 4 farklı gözenek açıklığına sahip örgüsüz geotekstil ile iki farklı örgülü geotekstillerin kombinasyonlarını kullanmışlardır. Geotekstil filtre tasarımında, bu sistemlerin filtreleme özelliklerinin tek katmanlı sistemlerden oldukça farklı olabileceğini belirlemişlerdir. Uçucu külün filtrasyon özelliklerinin deniz dibi taranmış malzemenin filtrasyon özelliklerinden farklı olduğunu bildirmişlerdir. Genel olarak, deniz dibi taranmış malzeme için daha yüksek GR ve KR değerleri elde etmişlerdir. Tek örgülü bir geotekstil yerine iki katmanlı örgülü / örgüsüz bir geotekstil kullanımı, filtrasyon performansını önemli ölçüde arttırmıştır. Çoğu durumda iki katmanlı geotekstil sistemleri, daha düşük GR ve KR değerleri elde edilmesini sağlamıştır. Hem kohezyonsuz uçucu kül hem de kohezif deniz dibi tarama malzemesi için benzer durum elde edilmiştir. Uzun süreli filtrasyon deneyi uçucu kül ve deniz dibi taranmış malzeme gibi ince daneli mazlemelerin değerlendirilmesinde kullanıldığında belirli sınırlamalara sahip olduğunu belirtmişlerdir. ASTM D5101'de önerilen 24 saatlik zaman periyodu, ince daneli malzemelerde sabit bir hidrolik iletkenlik elde etmek için genellikle yeterli olmadığını ve 24 saatte elde edilen değerlerin yanıltıcı olabileceğini ifade etmişlerdir (Kutay ve Aydilek, 2005).

Patricia I. Dolez ve diğerleri (2017), atık malzeme ve örgüsüz geotekstilden oluşan drenaj sistemlerinin filtrasyon davranışını incelemişlerdir. Atık malzeme ve geotekstil sistemlerinin geçirgenliğinin her zaman geotekstilin geçirgenliğinden birkaç kat daha düşük olduğunu bildirmişlerdir. Ayrıca deneysel çalışmalarında 100 günden fazla bir süre boyunca geotekstilde tıkanma veya körleşme gözlemlenmemiştir. Bu sonuçlar, geotekstillerin ince daneli atıkların filtrasyonu için kullanılabileceğini göstermiştir (Dolez ve Blond, 2017).

Geri kazanılmış betonun (RCA) ince dane miktarındaki artış, filtrasyon üzerine analiz edilen geotekstillerde herhangi bir tıkanma belirtisi göstermemesine rağmen, örgüsüz geotekstilin akış kapasitesini azaltma eğiliminde olduğu belirlenmiştir (McCulloch ve diğ., 2017; Nam ve diğ., 2014). Bazı durumlarda, geotekstil geçirgenliklerinde ve RCA'yı filtreleyen karakteristik gözenek boyutlarında %30-50'lik bir azalma gözlenmiştir; ancak, deney sonrası geotekstillerin agreganın 10 katından fazla geçirgenliğe sahip olduğu belirlenmiştir, bu da geotekstilin akışı engellemeyeceğini ve

geri kazanılmış beton-geotekstil filtre sisteminin genel hizmet verilebilirliğini azaltmayacağını göstermektedir (Abbaspour ve diğ., 2018). Abbaspour ve diğerleri (2018), geri kazanılmış beton agregası (RCA) ve tipik olarak yol altı drenaj sistemlerinde kullanılan örgüsüz geotekstilin hidrolik uyumluluğunu değerlendirmek için uzun süreli filtrasyon deneyleri yapmışlardır. Deneysel çalışmada, kullanılan RCA numunelerini tek bir tesisten elde etmişler ve laboratuvarda yaşlandırmışlardır. Laboratuvar deneyleri sonucunda yaşlanmanın RCA'nın hidrolik özelliklerini olumsuz etkilemediğini göstermişlerdir. RCA partiküllerinin, geotekstillerin tıkanmasına neden olmadığını bildirmişlerdir. Çalışmada kullanılan örgüsüz geotekstillerin geçirgenliklerinde ve gözeneklerinde sırasıyla %8 ve %46'ya varan azalma yaşandığını, ancak bu azalmaların RCA-geotekstil sistemlerinin hizmet verilebilirliğinde gözle görülür bir azalmaya neden olmadığını bildirmişlerdir.

Bilgen ve diğerleri tarafından 2020 yılında, %96.8 kum ve %3.2 ince malzeme içeren geri kazanılmış beton (RCA) ve geotekstilden oluşan drenaj sistemlerinin davranışını belirlemek için uzun süreli filtrasyon deneyleri (LFT) yapmışlardır. LFT sonuçları, RCA'nın örgülü geotekstil ile filtrelenebileceğini göstermiştir. Uzun süreli filtrasyon deneylerinden elde edilen geçirgenlik oranı (KR), filtrasyon sonrası deney numunelerinde gerçekleştirilen gözenek boyutu ve yüzde açık alan ölçümleri ile sistem geçirgenliğinde %5-35 azalma olduğu belirlenmiştir. Laboratuvar uzun süreli filtrasyon deneylerinin fiziksel tıkanmayı ölçtüğü ve geotekstil malzemede kalsiyum veya magnezyum çökelmesinin neden olduğu herhangi bir kimyasal tıkanmanın gözlemlenmediğini bildirmişlerdir (Bilgen ve diğ., 2020).

Literatürde, ASTM D5101 standartında tanımlanan uzun süreli filtrasyon deney sistemi ile yapılan çalışmaların ve yukarıda verilen çalışmaların bir bölümü çizelge 2.7'de özetlenmiştir. Çizelge 2.7'de görüldüğü gibi atık malzeme olarak uçucu kül ve geri kazanılmış beton agregaları kullanılarak uzun süreli filtrasyon deneyleri yapılmamıştır. Ayrıca bu zamana kadar yapılan uzun süreli filtrasyon deneylerinin çoğunda agrega-geotekstil sisteminde örgülü getoekstil kullanılması tercih edilmiştir ve deneye tabi tutulan en küçük eşdeğer gözenek boyutuna sahip geotekstilin 0.15 gözenek açıklığına sahip örgüsüz geotekstil (NW) olduğu Çizelge 2.7'de görülmektedir. Bu zaman kadar yapılan deneysel çalışmalarda, en düşük hidrolik eğim değeri i=1, en büyük hidrolik eğim değeri ise i=7.5 uygulanmıştır.

Çizelge 2.7 : Literatürde ASTM D5101 standardında yapılan uzun süreli filtrasyon deney sonuçları.

Çalışma	Agrega	Geotekstil	Geotekstilin gözenek açıklığı	Hidrolik eğim (i)	GR	KR
Aydilek ve Edil (2002)	Çamur	W, SF, PP (A)	0.60	7.5	2.5	1
		W, SF, PP (E)	0.60		7	2.3
		W, SF, PP (F)	0.60		10	2.4
	İnorganik Siltli Kum	W, SF, PP (A)	0.60		1.5	1.3
		W, SF, PP (E)	0.60		1.1	1
		W, SF, PP (F)	0.60		1.6	0.6
Kutay ve Aydilek (2005)	Uçucu kül	W1	0.15	6	0.72	0.68
		W5	0.60		1.4	0.86
		W5/ NW1	0.60/0.15		0.69	0.68
		W5/ NW2	0.60/0.21		0.86	0.85
		W5/NW3	0.60/0.30		0.88	0.83
		W5/NW4	0.60/0.30		1.2	1.23
	Deniz dibi tarama malzemesi	W1	0.15		1.35	1.26
		W5	0.60		2.62	1.14
		W5/ NW1	0.60/0.15		2.5	1.4
		W5/ NW2	0.60/0.21		1.46	1.64
		W5/NW3	0.60/0.30		2.59	1.31
		W5/NW4	0.60/0.30		1.85	1.08
Abbaspour ve diğerleri (2019)	Geri Kazanılmış Beton Malzeme	NW1	0.21	1	1.4	
		NW, NP, PP		2.5	2.2	
				5	9.2	
Bilgen ve Diğerleri (2020)	Geri Kazanılmış Beton Malzeme	W1	0.30	1.0	0.78	0.76
				2.5	0.54	0.64
		W2	0.60	1.0	1.54	1.05
				2.5	1.41	1
		W3	0.43	1.0	0.43	1.2
				2.5	0.21	1.35

Yukarıda literatürde yapılan çalışmaların özetinden de anlaşılabileceği gibi karayolu drenaj sistemlerinde kullanım amacıyla geri kazanılmış beton (RCA) ve uçucu kül ile teşkil edilecek sistemlerin filtrasyon davranışları ASTM D5101 standarında tanımlanan uzun süreli filtrasyon deneyleri yapılarak incelenmiştir. Fakat endüstriyel atık olarak tanımlanan bu iki malzeme haricindeki hiçbir atık malzemenin karayolu drenaj sistemlerinde kullanımı ile ilgili bir bilgiye rastlanmamıştır. Oysa çelik cürufu, geri kazanılmış asfalt gibi iyi mühendislik özelliklerine sahip ve doğal agrega yerine

kullanılabilecek bir çok atık malzeme mevcuttur. Çizelge 2.7'den de anlaşılacağı gibi daha önce bu konuda yapılmış çalışmalarda, bu çalışmada kullanılan geri kazanılmış asfalt ve çelik cürufu agregaları ve 0.08 görünür göz açıklığına sahip örgüsüz geotekstil ile 0.33 ve 0.66 hidrolik eğim (i) değerleri kullanılmamıştır.

Tıkanma parametrelerinden hidrolik eğim oranı, geomalzeme–geotekstil temas alanındaki hidrolik eğimin geomalzemenin hidrolik eğimine oranı olarak tanımlandığını belirtilmişti. ASTM D5101, GR tıkanma sınırını 1 olarak verirken, ABD Ordusu Mühendisleri GR değerlerini 3'e kadar kabul edilebilir olarak vermektedir. Önceki araştırmalar, 24 saatlik zaman periyodunun stabilize bir hidrolik eğim oranı elde etmek için genellikle yeterli olmadığını göstermiştir (Fischer 1994; Akram 1995) ve uzun süreli deneylerin yapılması önerilmektedir. Fischer (1994) de, hidrolik eğim oranının, nispeten küçük bir zemin-geotekstil temas bölgesinin analizinden dolayı temsili olmadığını ve alternatif oranların kullanımını tavsiye etmiştir. Bu tavsiye özellikle çamurlar için doğrudur.

2.7 Geotekstil İnce Kesit Numunesi Hazırlama ve Görüntü Alımı

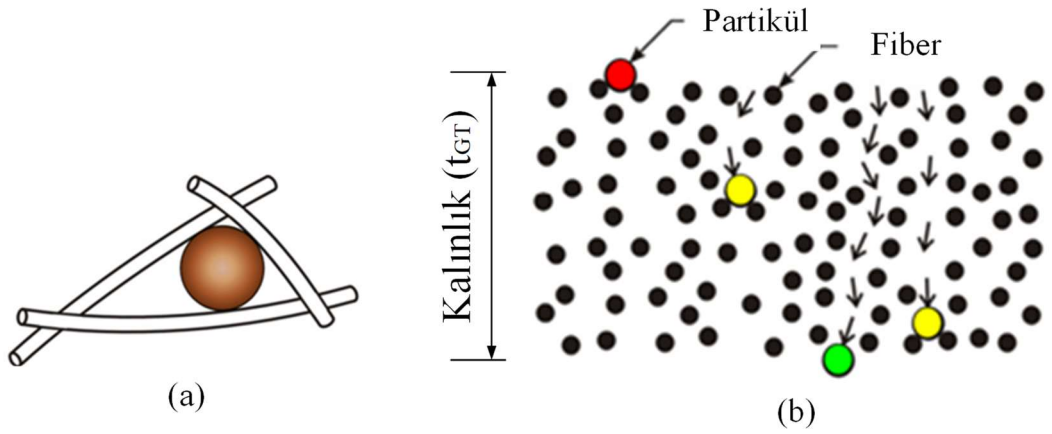
Geotekstillerin gözenek açıklığı boyut dağılımını belirlemek için bir dizi yöntem geliştirilmiştir. Gözenek açıklığı boyut dağılımı örgüsüz geotekstillerin çeşitli zeminlerle temas ettiğinde tıkanma ve daneleri tutma potansiyellerini belirlemek için önemlidir. Bu da geotekstillerin filtre ortamındaki işlevlerini belirlemek için gözenek açıklığı boyut dağılımının belirlenmesinin önemli olduğunu göstermektedir.

Bir geotekstilin filtrasyon performansı, gözenek açıklığı boyut dağılımı (pore size distribution(PSD)) ile kontrol edilmektedir. PSD'yi belirlemek için mevcut yöntemler çoğunlukla dolaylıdır ve dezavantajlar içermektedir. Görüntü analizi yöntemi geotekstilin enine kesit görüntüsünde elyaf kalınlığını ve gözenek açıklığını ölçebilen benzersiz ve doğru bir yöntem sağlamaktadır.

Örgüsüz geotekstilin gözenek açıklığı boyut dağılımını doğrudan belirlemek için kullanılan iki yöntem mevcuttur. Bunlar kuru eleme yöntemi ve görüntü analizidir. ASTM D4751 standardında tanımlana kuru eleme deneyi, mevcut bir standartı olduğu için daha yaygın olarak kullanılmaktadır. Kuru eleme deneyi, AOS (apparent opening size) yani O_{95}'i belirlemek için doğru bir yöntemdir (Luettich ve diğ., 1992). Ancak bununla birlikte, son çalışmalar daha küçük gözenek açıklık boyutlarına sahip bir

geotekstilin filtrasyon performansını önemli ölçüde etkileyebileceğini ve tam bir PSD eğrisinin belirlenmesi gerektiğini göstermiştir. Görüntü analizi yöntemi, kanıtlanmış bir prosedürün bulunmaması nedeniyle örgüsüz geotekstillerin PSD tayininde nadiren kullanılmaktadır. Fakat görüntü analizindeki son teknolojik gelişmeler, örgüsüz geotekstillerin PSD'sini daha doğru ve doğrudan belirlemek için imkan sunmaktadır. (Aydilek ve diğ., 2002; Bhatia ve Suits, 1996; Christopher ve Fischer, 1992).

Bir geotekstil filtre malzemesi olarak kullanılması durumunda gözenekli yapısında daralma meydana gelebilir. Bir daralmanın boyutu, daralmadan geçen en büyük kürenin çapı olarak tanımlanmaktadır. Şekil 2.43 (a)'da filtre görevi gören bir geotekstilin fiber elyafları arasındaki boşlukta duran bir danecik görülmektedir. Bu küre şeklindeki daneciğin çapı iki elyaf lifi arasındaki tıkanma ve boşluktaki daralmanın boyutunu belirlemek için kullanılmaktadır. Geotekstil gözeneklerinden geçen danecikler geotekstilin düşey düzlemi boyunca hareket edebilir. Partikül filtrasyon yolu boyunca geotekstil elyafları arasında meydana gelen tıkanmaya bağlı olarak ya iki elyaf arasındaki boşlukta kalacak veya hareketine devam edecektir. Şekil 2.43 (b)'den görüldüğü gibi bir partikül geotekstilin üstünde veya içinde sıkışıp kalabilir veya geoteksitilin içinden geçep çıkabilir (Giroud, 2010).



Şekil 2.43 : (a) Geotekstil elyafları arasındaki daralmayı tanımlayan küre şeklindeki parçacık, **(b)** Üstünde bir parçacığın durduğu (kırmızı), iki parçacığın durduğu (sarı) ve içinden geçmiş bir parçacığın (yeşil) geotekstildeki şematik görünümü (Giroud, 2010).

Görüntü analizi yöntemi, her bir geotekstil için tam bir gözenek açıklığı boyut dağılımı (PSD) eğrisi sağlamak üzere çeşitli matematiksel algoritmaları kullanılarak geliştirilmiştir. Geotekstilin görüntü analizinden iki karakteristik gözenek açıklığı boyutu O_{95} ve O_{50} belirlenmekte, laboratuvar deneylerinden, analitik denklemlerden

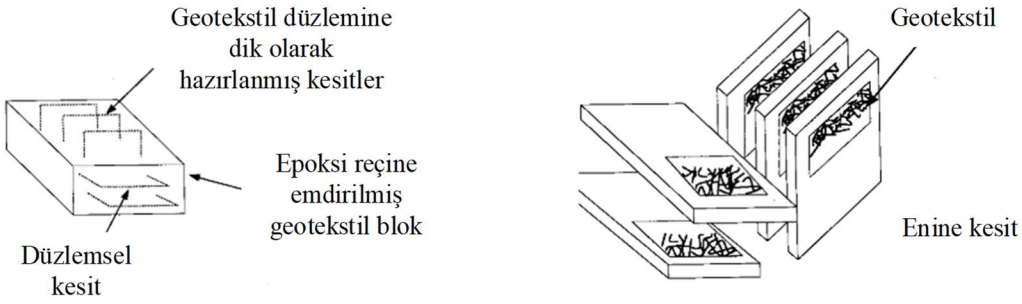
elde edilen ve üreticinin bildirdiği açıklık boyutları (AOS) karşılaştırılmaktadır. Çeşitli geotekstillerin görüntü tabanlı O_{95} gözenek açıklık boyutu, üreticinin bildirdiği AOS ile laboratuvar kuru eleme deneyinden belirlenenlerle karşılaştırılabilir düzeydedir.

Aydilek ve diğerleri (2002) örgüsüz geotekstillerin mikroskopik görüntülerini elde etmek için yatay ve düşey düzlemde ince kesitler hazırlamışlardır. Geotekstilin ince kesitleri, genellikle ince kaya kesitlerinin hazırlanmasında kullanılan prosedürler izlenerek hazırlanmıştır. İnce kesit işlemi, düzlemsel kesitlerin yanı sıra geotekstil düzlemine dik olan bölümleri de içermektedir (Aydilek ve diğ., 2002) . İnce kesitlerin hazırlanması Şekil 2.44'te verilen bir dizi ardışık adımdan oluşmaktadır.



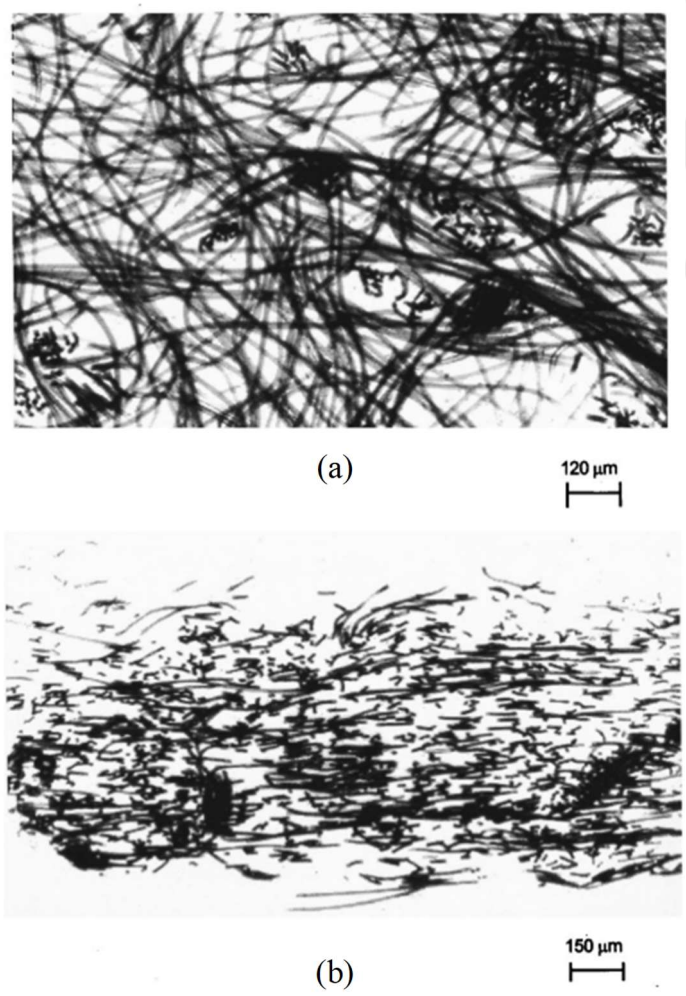
Şekil 2.44 : Geotekstil malzemelerin görüntü analizi için numune hazırlama adımları.

Örgüsüz geotekstillerin doyurulması için düşük viskoziteli reçine ve sertleştirici kullanılmaktadır (Buehler, Lake Bluff, Ill). Atmosferik koşullarda kuruması sağlanmış geotekstil belirli boyutlarda kesilir. Belirli ebatlardaki geotekstil örnekleri düz tabanlı bir yüzeye sahip kalıplara yerleştirilir ve epoksi reçine bir şırınga yardımı ile yavaşça kalıba dökülmektedir. Epoksi reçine uygulama aşamasında mevcut hava kabarcıklarının çıkışını sağlamak için vakum uygulanmakta, epoksi uygulaması yapılmış geotekstil oda sıcaklığında minimum 7~8 saat bekletilmektedir. Kürlenmiş geotekstil örnekleri kalıplardan çıkarılır ve belirli inceliğe kadar elmas testere ile kesilir. İstenilen ebatta kesilmiş numuneler, kesme izlerini ortadan kaldırmak ve olabildiğince pürüzsüz bir yüzey elde etmek için zımparalanır ve parlatma işlemi uygulanır. Parlatılmış yüzey, epoksi reçine ile bir cam mikroskop lamı üzerine yapıştırılır. Geotekstil numune mikroskop lamına yapıştırıldıktan sonra, mümkün olan en ince dilimi elde etmek için kesilir. Son olarak, kesit son kalınlığa ulaştığında dikkatlice temizlenir ve görüntü almak için özenle muhafaza edilir. Şekil 2.45'de enine ve boyuna ince kesit numunesi hazırlanmış bir geotekstilin şematik görüntüsü verilmiştir.



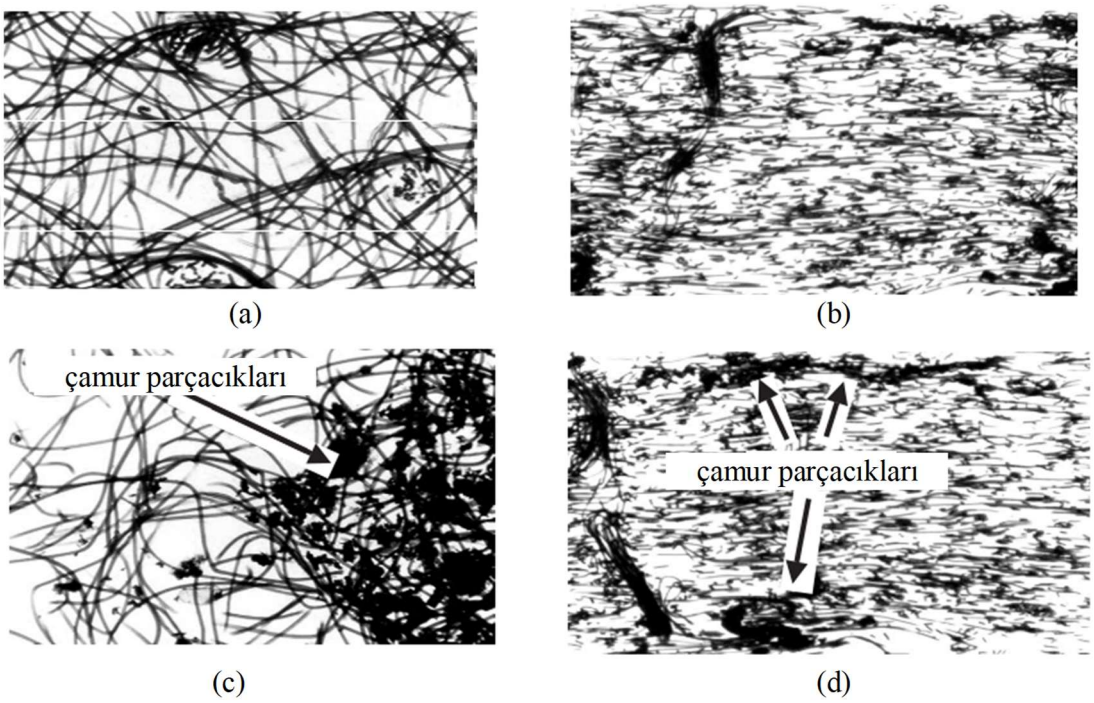
Şekil 2.45 : Enine ve boyuna düzlemlerde ince kesit geotekstil numunesi hazırlanması (Aydilek ve diğ., 2002).

İnce kesit numunesi hazırlanmış örgüsüz geotekstillerin gözenek yapısı, bir optik ışık mikroskobu kullanılarak görüntülenmektedir. Her iki düzlemden hazırlanmış geotekstil numunesine ait optik görüntü Şekil 2.46'da verilmiştir.



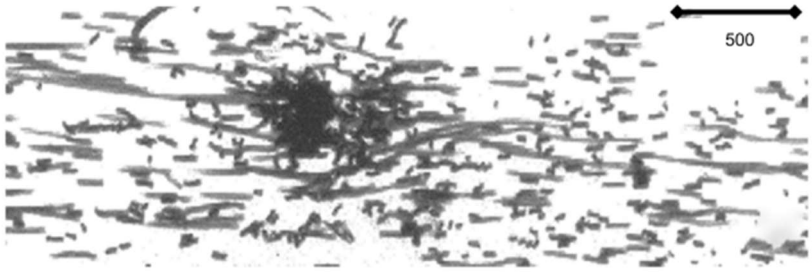
Şekil 2.46 : Geotekstilin optik görüntüleri **(a)** Yatay düzlem **(b)** Dikey düzlem (Aydilek ve diğ., 2002).

Aydilek ve diğerleri (2003) uzun süreli filtrasyon deneyi yapılan çamur-geotekstil sisteminin, deney sonrası geotekstil numunelerde optik görüntüler almışlardır. Şekil 2.47'de uzun süreli filtrasyon deneyi sonrası bir geotekstil numunenin düzlemsel ve enine kesit görüntüleri verilmiştir. Karşılaştırma amacıyla, bu geotekstillerin uzun süreli filtrasyon deneyi öncesi, henüz kullanılmamış görüntüleri de aynı şekilde verilmiştir. Görüntü analizlerinden daha büyük geçirgenliğe sahip geotekstilde daha az tıkanma yaşandığı belirlenmiştir.

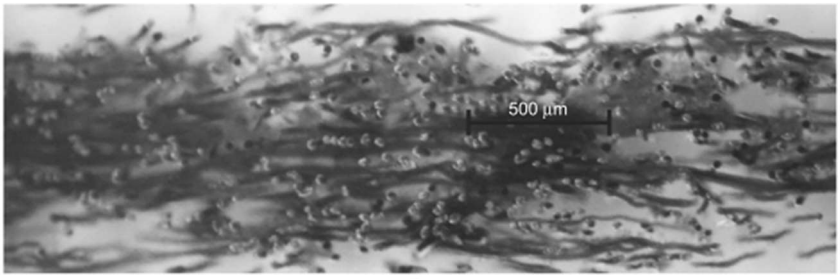


Şekil 2.47 : Kullanılmamış geotekstilin **(a)** Düzlemsel. **(b)** Enine kesit görüntüleri. LFT sonrası geotekstilin **(c)** Düzlemsel. **(d)** Enine kesit görüntüleri (Aydilek, 2003).

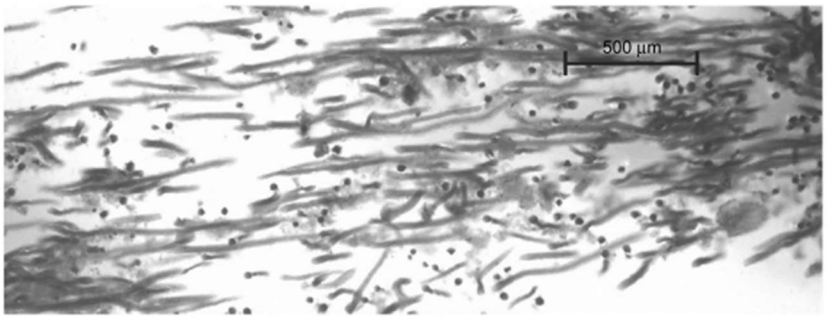
Abbaspour ve diğerleri (2018) yaşlanma işlemi uygulanmış ve uygulanmamış geri kazanılmış beton (RCA) numunesi ve geotesktilden oluşan sistemin uzun süreli filtrasyon deneyi (LFT) sonrası, örgüsüz geotekstilde meydana gelmiş tıkanmayı görüntüleyebilmek için ince kesit numuneleri hazırlamışlar ve dijital görüntüleme yapmışlardır. Karşılaştırma amacıyla, kullanılmamış geotekstil numunelerinin dijital görüntüleri de alınmıştır. Şekil 2.48'de örgüsüz geotekstil içindeki parçacık birikimi açıkça görülebilmektedir. LFT verileri sonucu daha fazla tıkanma yaşanmış olan geotekstilde dijital görüntülemede de daha fazla partikül birikimi gözlemlenmiştir.



(a)



(b)



(c)

Şekil 2.48 : (a) Kullanılmamış geotekstilin. **(b)** Yaşlandırılmamış geri kazanılmış beton (RCA). **(c)** 12 ay yaşlandırılmış RCA, numunelerinde kullanılan geotekstillerin uzun süreli filtrasyon deneyi sonrası kesit görüntüleri (Abbaspour, 2018).

Mevcut geotekstil görüntü analizi yöntemlerinin çoğu, düzlemsel görünümleri kullanan iki boyutlu bir yaklaşıma dayanmaktadır ve farklı gözenek açıklığı boyutlarının sayısını manuel olarak saymak gerekmektedir. Dolayısıyla, bu yaklaşımla elde edilen bir gözenek boyutu dağılımını (PSD) eğrisi, gözenek açıklık boyutlarının geotekstil kalınlığı boyunca varyasyonunu temsil etmeyen analiz edilmiş bir düzlemsel yüzeyin gözenek boyutu dağılımıdır.

Geotekstilin tıkanmasını değerlendirmek için dijital görüntülerin kullanımı, bilimsel literatürde, özellikle filtrasyon amacıyla kullanılan örgüsüz geotekstilin gözenek boyutu dağılımını (PSD) tahmin etmek için ortaya çıkmıştır.

3. MALZEME VE YÖNTEM

Bu çalışma kapsamında, farklı endüstriyel atık malzemelerinin ve performans karşılaştırılması yapabilmek için doğal agregaların uzun süreli filtrasyon davranışlarının belirlenmesi amaçlanmaktadır. Bu amaçla endüstriyel atık malzeme-geotekstil kullanımı ile oluşturulacak olan drenaj sistemlerinin, uzun süreli filtrasyon deneyleri, bu çalışma kapsamında yeniden tasarlanmış ve imal ettirilmiş ASTM D5101 uzun süreli filtrasyon deney sisteminde yapılmıştır. Yapılan deneylerde, endüstriyel atık-geotekstil malzemenin zamana bağlı permeabilite davranışı, oluşabilecek potansiyel tıkanma mekanizmalarının değerlendirmesi, zaman ve akış yönüne bağlı olarak malzeme dane çapındaki değişim, permeabilite değeri belirlenmiş ve sunulmuştur. Bu bölümde, deneysel çalışmada kullanılan malzemelerin özellikleri ve kullanılan deney sistemleri hakkında bilgiler yer almaktadır.

3.1 Malzeme

Deneysel çalışmada Türkiye'de üretilmiş, drenaj sistemi tasarımında ve uygulamasında kullanılabilinecek, farklı fiziksel ve kimyasal özelliklere sahip geri kazanılmış asfalt, geri kazanılmış beton, iki farklı tesisten elde edilmiş çelik cürufu gibi endüstriyel atık malzemeler kullanılmıştır. Bu malzemelerin uzun süreli filtrasyon performansı doğal agrega malzemelerin performansı ile karşılaştırılmıştır. Bu tez çalışması kapsamında kullanılan malzemeler Çizelge 3.1'de verilmiştir.

Çizelge 3.1 : Çalışmada kullanılan malzemeler ve sembolleri.

Malzeme	Sembol
Geri kazanılmış asfalt	RAP
Geri kazanılmış beton	RCA
Çelik cürufu-1	SS-1
Çelik cürufu-2	SS-2
Doğal agrega-1	NA-1
Doğal agrega -2	NA-2

Deneysel çalışmada kullanılacak geri kazanılmış beton (RCA), İSTAÇ, geri kazanılmış asfalt (RAP) İSFALT şirketinden, çelik cürufları elektrik ark ocakları ile üretim yapan Çolakoğlu Metalurji ve Diler Demir Çelik'ten temin edilmiştir. Geri kazanılmış agregaların drenaj sistemlerindeki performansını kıyaslamak için deneysel çalışmada kullanılan doğal agregalar ise Tokat'ta hizmet veren Diler Madencilik ve Taşel Madencilik'ten İTÜ Zemin Mekaniği Laboratuvarına gönderilmiştir.

Agrega-geotekstil drenaj sisteminin filtrasyon performansını değerlendirmek için yapılacak olan uzun süreli filtrasyon deneylerinde 0.08 mm gözenek açıklığına sahip örgüsüz geotekstil kullanılmıştır.

3.1.1 Kullanılan numunelerin geoteknik özellikleri

Araştırma kapsamında doğal agrega yerine drenaj sistemlerinin yapımında kullanılabilirliği geliştirilmiş uzun süreli filtrasyon deney sisteminde araştırılan, geri kazanılmış asfalt, geri kazanılmış beton, çelik cürufu malzemelerinin, doğal agregaların ve örgüsüz geotekstil malzemenin özellikleri aşağıda verilmiştir.

3.1.1.1 Geomalzeme

Bu araştırmanın dayandığı hipotez, söz konusu endüstriyel atık malzemelerin de doğal agregalar kadar iyi bir tıkanma davranışı sergileyebileceğidir. Bunu göstermek için çalışmada, farklı fiziksel ve kimyasal özelliklere sahip geri kazanılmış asfalt (RAP), geri kazanılmış beton (RCA), 2 farklı elektrik ark ocağı tesisinden temin edilmiş çelik cürufu (SS) ve performans karşılaştırması yapabilmek için halihazırda drenaj sistemlerinde kullanılabilme potansiyeline sahip, 2 farklı ocaktan temin edilmiş doğal agregalar (NA) kullanılmıştır. Deney programı göz önünde bulundurularak her bir numuneden minimum 1 ton temin edilmiş ve laboratuvarda depolanmıştır. Tesislerden İTÜ Zemin Mekaniği Laboratuvarına teslim edilen numulerin fotoğrafları Şekil 3.1'de görülmektedir. Şekil 3.1'den görüldüğü gibi farklı tesislerden temin edilen numunelerin dane çapları birbirinden farklı ve çok büyüktür. Temin edilen geomalzemelerin dane çapı dağılım eğrilerini elde etmek için kurutularak elek analizine tabii tutulmaları gerekmektedir.



Şekil 3.1 : Farklı tesislerden temin edilmiş agregalar.

Filtrasyon davranışı araştırılacak olan geri kazanılmış asfalt (RAP), geri kazanılmış beton (RCA), çelik cürufu (SS) ve doğal agregaların (NA) mevcut dane çapı dağılım eğrilerini elde etmek için kurutularak elek analizine tabii tutulmuşlardır. Tesislerden alınan numuneler üzerinde ilk olarak sınıflandırma deneyleri yapılmış deney sonuçları Çizelge 3.2'de verilmiştir.

Çizelge 3.2 : Çalışmada kullanılan numunelerin fiziksel özellikleri.

Malzeme	İDO (%)	Kaba Dane (%)		C_c	C_u	PI	Zemin Sınıflandırması	
		Kum (%)	Çakıl (%)				BZSS	AASHTO
RAP	2	87	11	1.6	5	NP	SP	A-1-b
RCA	12	74	14	1.8	45.5	NP	SW-SM	A-1-b
SS-1	0	2	98	1.1	2.1	NP	GP	A-1-a
SS-2	0	4	96	1.1	3.3	NP	SP	A-1-b
NA-1	13	86	1	1.8	45.5	NP	SM	A-1-b
NA-2	3	97	0	0.7	6.6	NP	SP	A-1-b

Çizelge 3.2'de görüldüğü gibi tesislerden alınan numuneler üzerinde yapılan elek analizleri sonucu malzemelerdeki ince dane miktarının %0 ile %13 arasında değiştiği tespit edilmiştir. Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemine (BZSS) göre numuneler GP (kötü derecelenmiş çakıl), SP kötü derecelenmiş kum ve SW (iyi derecelenmiş kum) sınıfında, AASHTO sınıflandırmasına göre ise A-1-a ve A-1-b sınıflarında (Taş parçacıkları Çakıl ve Kum) yer almaktadır. Tesislerden elde edilen agregalar Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemine göre sınıflandırıldığında, çelik cürufları kötü derecelenmiş çakıl (GP) ve kötü derecelenmiş Kum (SP), geri kazanılmış beton iyi derecelenmiş siltli kum (SW-SM), geri kazanılmış asfalt kötü derecelenmiş kum (SP), doğal agregalarda siltli kum (SM), kötü derecelenmiş kum (SP) olarak sınıflandırılmış.

Uzun süreli filtrasyon deneylerinde agrega-geotekstil drenaj sisteminde deneye tabi tutulan agreganın dane çapı dağılımı Karayolları Teknik Şartnamesinde (KTŞ) drenaj sistemlerinde kullanımına izin verilen ve tıkanmayı maksimum sağlayacak olan dane çapı dağılımını temsil edecek şekilde çizelge 3.3'deki gibi belirlenmiştir.

Çizelge 3.3 : Deneye tabi tutulan numunenin fiziksel özellikleri.

		Kaba Dane (%)					Zemin Sınıflandırması	
Malzeme	İDO (%)	Kum (%)	Çakıl (%)	C_c	C_u	PI	BZSS	AASHTO
DTTA	10	90	0	0.9	4.33	NP	SP-SM	A-1-b

DTTA: Deneye tabii tutulan agrega

Karayolları Teknik Şartnamesine göre filtre malzemesi olarak kullanılacak agreganın No. 40 elekten geçen malzeme örneği üzerinde ASTM D4318-17'de belirtilen esaslara göre deney yapıldığında deney sonucunun non plastik olması gerekmektedir. Yapılan plastisite deneyleri ile malzemelerin non plastik olduğu belirlenmiştir.

Bu çalışmada elde edilen sonuçların ileride uygulanabilir olması açısından, laboratuvarda modellenen drenaj sisteminde Karayolları Teknik Şartnamesi 2013'te drenaj sistemlerinde kullanımı için izin verilen malzeme bilgileri, limitleri esas alınmıştır. Deneysel çalışmada kullanılacak dane çapı dağılım eğrisini elde etmek için laboratuvara teslim edilen malzemeler çeneli kırıcıda kırılıp uygun eleklerden elenerek Şekil 3. 2'de görüldüğü gibi dane çaplarına göre ayrı ayrı kaplarda depolanmışlardır.



Şekil 3. 2: Dane çaplarına göre depolanmış numuneler.

Numune ebatının büyük olması, deney sisteminin yeni tasarlanıp imal edilmesi nedeni ile deneyler esnasında yaşanabilinecek problemler düşünerek her bir malzemeden yaklaşık 600 kg numune elenmiş ve dane çaplarına göre depolanmışlardır.

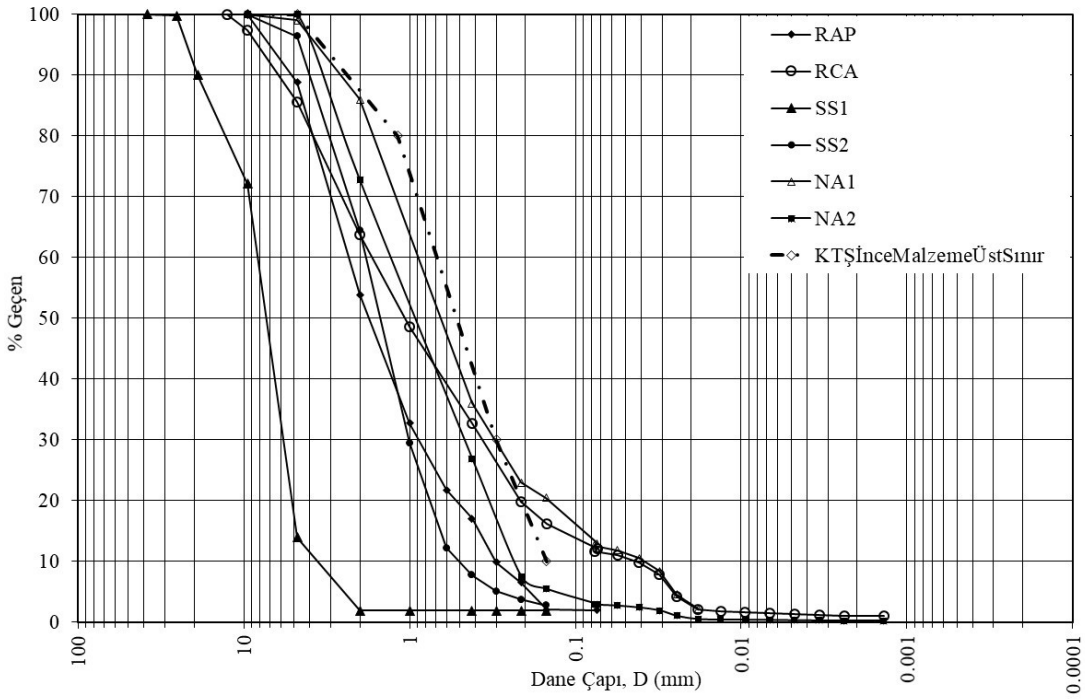
Deneysel çalışmada kullanılan agregaların mekanik özelliklerini belirlemek ve deney numunesi hazırlanmasında kullanılacak olan kuru birim hacim ağırlığı ve su muhtevasının tayini için ASTM D698–12 ve ASTM D1557–12 standartlarında tanımlanan Method B yöntemi kullanılarak standart ve modifiye proktor deneyleri yapılmış, agregaların optimum su muhtevaları ve maksimum kuru birim hacim

ağırlıkları çizelge 3.4'te verilmiştir. ASTM D698–12 standartlarına uygun olarak belirlenen optimum su muhtevasında ve maksimum kuru birim hacim ağırlığında hazırlanan numune üzerinde ASTM D1883–16 standartında belirtilen Kalifornia taşıma oranı (CBR) deneyi yapılmıştır. Agreglara ait CBR deney sonuçlarıda çizelge 3.4'te verilmiştir.

Çizelge 3.4 : Deneysel çalışmada kullanılan numunelerin mekanik özellikleri.

Malzeme	Gs	Standart		Modifiye		CBR (%)
		w_{opt} (%)	γ_{kmaks} (kN/m^3)	w_{opt} (%)	γ_{kmaks} (kN/m^3)	
RAP	2.25	12	17.85	9	19.60	26.0
RCA	2.61	16.5	18.32	12	19.5	47.0
SS-1	3.75	7.5	26.00	6	28.0	130
SS-2	3.63	9.3	24.80	7	26.4	116
NA-1	2.71	9.4	18.93	9	19.65	75
NA-2	2.70	10.2	19.75	9	20.07	60

Uzun süreli filtrasyon deneyinde kullanılan agreganın dane çapı dağılımı tıkanma performansını etkilemektedir. Geotekstilin ve drenaj sisteminin tıkanmasına neden olacak dane çapı dağılımında ince dane miktarı maksimum miktarda bulunmaktadır. Bu araştırmada, Karayolları Teknik Şartnamesinde kullanımına izin verilen ve sistemin tıkanma performansını maksimum etkileyecek drenaj malzemesi dane çapı dağılımı kullanılmıştır. Deneysel çalışmada kullanılacak numunelerin bakir granülometre eğrisi ve deneye tabi tutulan granülometre eğrisi Şekil 3.3'te verilmiştir.



Şekil 3.3 : Numunelerin dane çapı dağılımları.

Fiziksel açıdan bakıldığında bu malzemelerin içindeki ince dane boyutundaki danelerin suyun akış yönüyle beraber hareket edip geotekstil malzemeyi tıkayıp tıkamayacağının belirlenmesi drenaj sisteminin performansı açısından son derece önemlidir. Bu, göç eden parçacıklar geotekstil elyafların üzerinde veya içinde birikerek geotekstilin körleşmesine ve / veya tıkanmasına yol açacaktır.

3.1.1.2 Geotekstil

Agrega ve geotekstilden oluşan drenaj sisteminin performansını etkileyen önemli faktörlerden bir diğeri de geotekstil seçimidir. Sistemin efektif çalışabilmesi, hizmet ömrü boyunca işlevini yerine getirebilmesi için uygun geotekstil seçimi çok önemlidir. Geotekstil malzemenin amaca uygun seçimi, tatmin edici filtrasyon performansının elde edilmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Geotekstil filtre malzemesinin amacı, göçü engelleyerek sistemin stabilitesini korurken, suyun sistem dışına çıkmasına izin vermektir. Drenaj sistemlerinde kullanılacak geotekstil malzemeden çelişkili bu iki işlevi yerine getirmesi beklenmektedir. Filtrasyon uygulmalarında genellikle örgüsüz geotekstil tercih edilmektedir. Örgüsüz geotekstillerde filtrelemeyi tanımlayan en önemli parametre ise görünür açıklık boyutudur (AOS) ve düşey düzlemdeki permeabilite değeridir. Yapılan araştırmalarda agrega–geotekstil sistemlerinde, artan gözenek genişliği ile daha az tıkanma ve daha fazla borulanma gözlemlenmiştir.

Drenaj sistemlerinde kullanılacak olan geotekstilin görünür açıklık boyutunun (AOS) borulanmayı engelleyecek ve tıkanmaya müsaade etmeyecek ebatta olması gerekmektedir. Borulanmanın yaşandığı bir drenaj sisteminde agrega daneleri geotekstilden geçmektedir ve drenaj sistemini oluşturan agregadaki bazı dane çaplarında azalma meydana gelmektedir. Tıkanmış bir geotekstil, sistem geçirgenliğinde azalmaya neden olur ve bu da agrega geçirgenliğinin, agrega-geotekstil sisteminin geçirgenliğinden daha fazla olması anlamına gelmektedir.

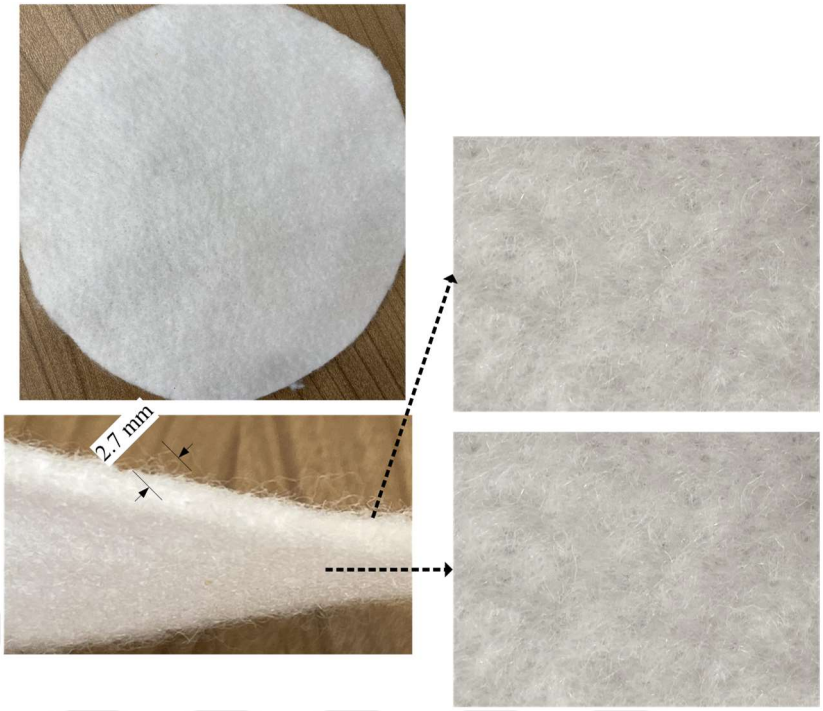
Bu çalışmada, Karayolları Teknik Şartnamesinde (KTŞ) agrega ve geotekstil'den oluşan drenaj sisteminde, kullanımına izin verilen ve tıkanmanın maksimum yaşanacağı 0.08 mm görünür göz açıklığına sahip örgüsüz geotekstil kullanılmıştır. Daha önceki çalışmalarda 0.08 mm görünür göz açıklığına sahip örgüsüz geotekstil kullanılmamıştır. Deneysel çalışmada kullanılan geotekstilin imalatçısı tarafından sağlanan fiziksel ve hidrolik özellikleri Çizelge 3.5' te verilmiştir.

Çizelge 3.5 : Örgüsüz geotekstilin teknik özellikleri.

	Özellikler		Deney Metodu	Birim	B/E
Geotekstil; NW, NP, PP	Fiziksel Özellikleri	Birim ağırlık	ASTM D 5261	g/m^2	350
		Kalınlık	ASTM D 5199	mm	2.7
	Mekanik Özellikleri	Çekme dayanımı	ASTM D 4632	kN/m	17/22
		Kopma uzaması	ASTM D 4632	%	Min. 50
		Statik delinme	ASTM D 6241	N	3100
	Hidrolik Özellikleri	Su geçirgenliği	ASTM D 4491	$l/s*m^2$	65
		Görünür göz açıklığı	ASTM D 4751	mm	0.08

NW: Örgüsüz geotekstil, NP: İğne delikli dokuma, PP: Polipropilen B: Boyuna, E: Enine.

Bu çalışmada kullanılan polipropilen malzemeden üretilmiş iğne delikli dokuma örgüsüz geotekstilin büyütülmüş fotoğrafı Şekil 3.4' te görülmektedir. Uzun süreli filtrasyon deneylerinde KTŞ' de drenaj sistemlerinde kullanımına müsaade edilen en küçük görünür açıklık boyutuna sahip olan örgüsüz geotekstil kullanılmıştır.



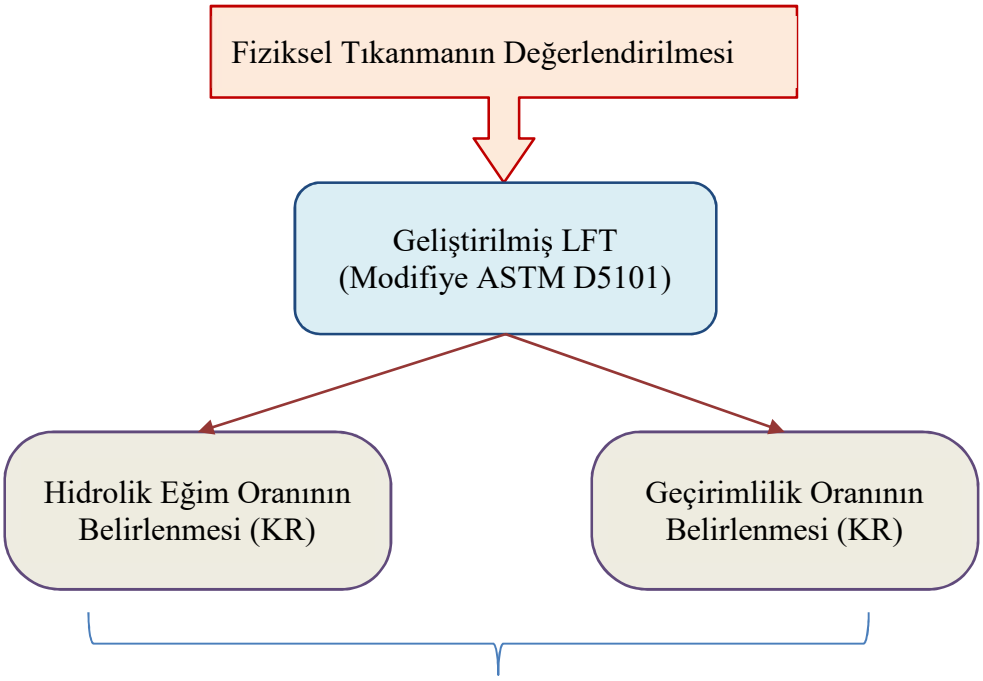
Şekil 3.4 : Deneysel çalışmada kullanılan geotekstilin her iki düzlemdeki fotoğrafı.

Deneysel çalışmada kullanımına müsaade edilen en küçük görünür açıklık boyutuna sahip geotekstilin seçilmesinde, drenaj sistemlerini oluşturacak olan agrega ve geotekstilin dane çapı dağılımı ve görünür açıklık boyutunun uyumunun önemli olduğunun bilinmesi, ince malzeme oranı fazla olan agreganın dane göçünü engellenmesi için drenaj sisteminde kullanılan geotekstilin en küçük görünür açıklık boyutuna sahip olması gerekliliği ve en olumsuz tıkanma koşullarının en küçük görünür açıklık boyutuna sahip geotekstil ile sağlanacağı faktörleri göz önünde bulundurulmuştur. Ayrıca drenaj sistemlerinde filtrasyon performansında geotekstilin permeabilite ve görünür açıklık boyutunun yanında kalınlığının da etkili bir faktör olduğu düşünüldüğü için deneylerde kullanılacak geotekstilin kalınlığına da dikkat edilmiştir.

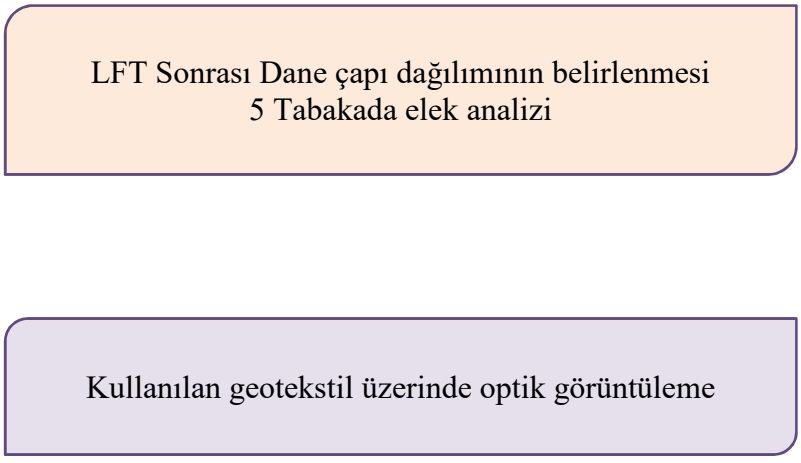
3.2 Yöntem

Bu çalışmada atık malzemelerin drenaj sistemlerinde kullanım uygunluğunun deneysel olarak incelenmesi için Şekil 3.5 (a) ve (b)'de şematik olarak verilmiş olan 2 aşamalı deney programı uygulanmıştır. Deney programının 1. aşamasında hazırlanmış numuneler üzerinde geliştirilerek imalatı yaptırılmış olan uzun süreli filtrasyon deney sisteminde LFT yapılması ve agrega-geotekstil drenaj sisteminin uyumluluğunun belirlenmesi için GR ve KR parametrelerinin belirlenerek fiziksel tıkanmanın

tanımlanması ve değerlendirilmesi amaçlanmaktadır. 2. aşamada ise uzun süreli filtrasyon deney sonrası, deney süresince agrega numunesinde yaşanan dane hareketini belirlemek için elek analizi, agrega-geotekstil drenaj sisteminde kullanılan geotekstilde meydana gelen tıkanıklığın mikrofotoğraflarla tespiti için optik görüntüleme yapılması planlanmıştır.



(a)



(b)

Şekil 3.5 : Çalışmada yapılması planlanan deney programı: **(a)** Fiziksel tıkanmanın belirlenmesi. **(b)** Geotekstil numunelerinin optik görüntülerinin alınması.

Geotekstilde meydana gelen tıkanıklığın mikrofotoğraflarla tespiti için optik görüntüleme yapılmasının nedeni, uzun süreli filtrasyon deneyleri ile elde edilen tıkanma parametrelerinin çekilen görüntüler ile teyit edilmesini sağlamaktır.

3.2.1 Geliştirilmiş uzun süreli filtrasyon deney sistemi

Non-plastik agrega (PI<%5) ve geotekstilden oluşan drenaj tabakasının geçirimlilik davranışını belirlemek için ASTM D5101 standardında verilen deney sistemi geliştirilerek Şekil 3.6' da görüldüğü gibi yeniden tasarlanmıştır. Standart uzun süreli filtrasyon deney (LFT) sisteminin, numunelerin uzun süreli filtrasyon performansını belirlemek konusunda eksik kalan noktalarının geliştirilmesi amacıyla numune haznesinin boyutu, daha gerçekci GR ve KR değerleri elde edebilmek için orta haznedeki (numune haznesi) manometre sayıları artırılmış ve deney sisteminden sahadaki uygulamalara daha yakın veriler alınması amaçlanmıştır.

ASTM D5101'de tanımlanan uzun süreli filtrasyon deney sisteminin nasıl modifiye edilebileceği üzerine taslak tasarımlar oluşturulmuş, uygunluğu ve imal edilebilirliği araştırılmıştır. Tasarımda son karar verildikten sonra, yaptırılması planlanan deney sisteminin imalatı için gerekli olan malzemeler yurt içi ve yurt dışından sipariş edilip deney sisteminin yapım aşamasına geçilmiştir. Deney sistemini oluşturacak olan ekipmanların taşıması gereken özellikler ile ilgili araştırma yapılmıştır. ASTM D5101'de tanımlanan ve bu çalışmada geliştirilerek yeniden tasarlanan uzun süreli filtrasyon deney sisteminin karşılaştırılması çizelge 3.6'da verilmiştir.

Çizelge 3.6 : Standart Uzun Süreli Filtrasyon Deney Sistemi ve bu çalışmada kullanılan Uzun Süreli Filtrasyon Deney Sistemi

	Standart Uzun Süreli Filtrasyon Deney Sistemi	Geliştirilmiş Uzun Süreli Filtrasyon Deney Sistemi
Manometre sayısı	6	8
Numune haznesi çapı (mm)	100	150
Numune haznesi yüksekliği (mm)	100	150
Deney numunesinde bulunabilinecek en büyük dane çapı (mm)	>10	>15

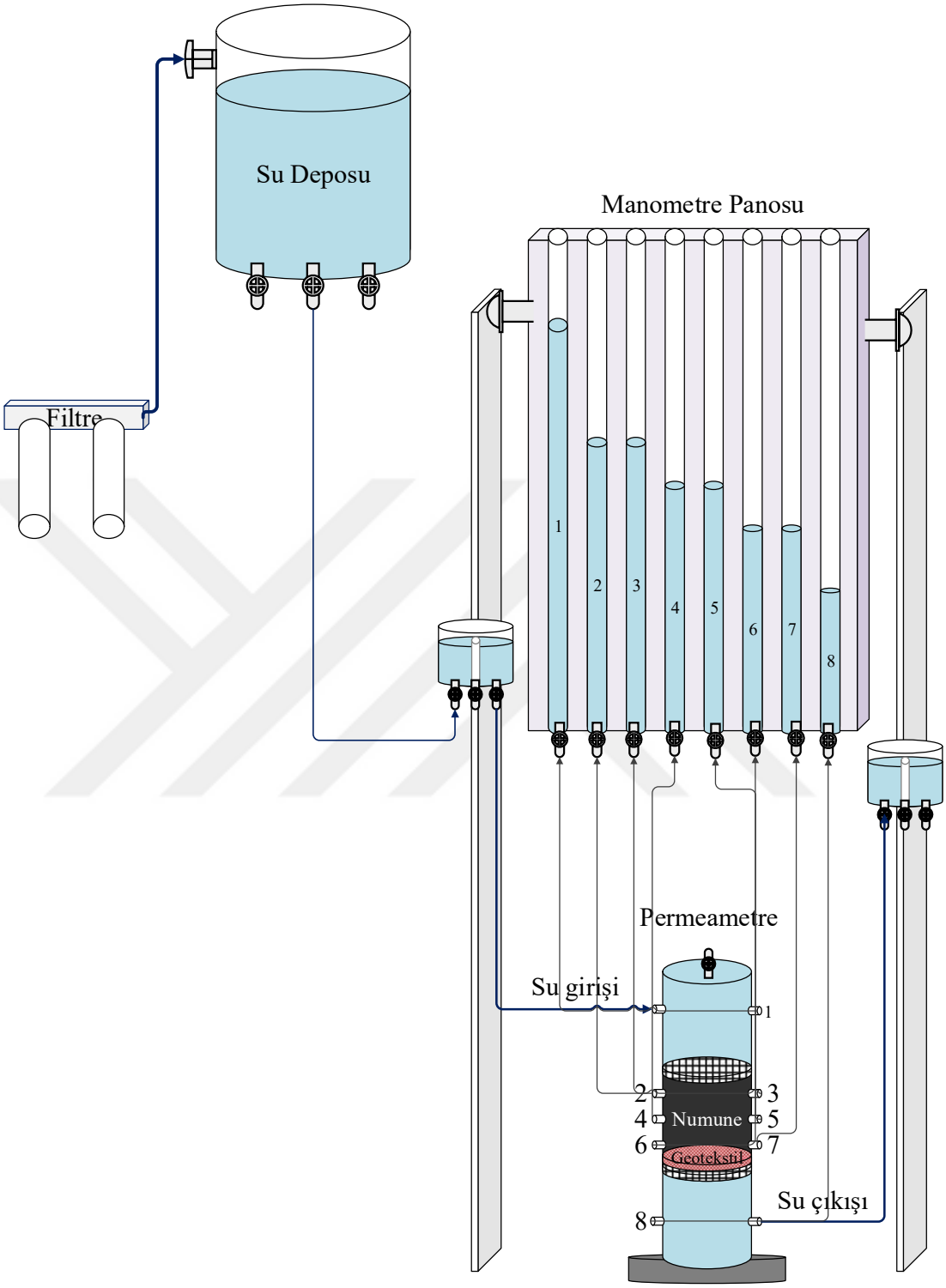
Deneyler için sürekli su temini sağlayacak olan su deposu, şebeke suyundaki tortu vb. maddelerin filtrelenmesi için su arıtma filtreleri de bu süreçte temin edilmiştir. Şekil 3.6'da görüldüğü gibi geliştirilmiş uzun süreli filtrasyon deney sistemi

- Su arıtma filtreleri,
- Su deposu,
- Manometre panosu,
- Permeametre

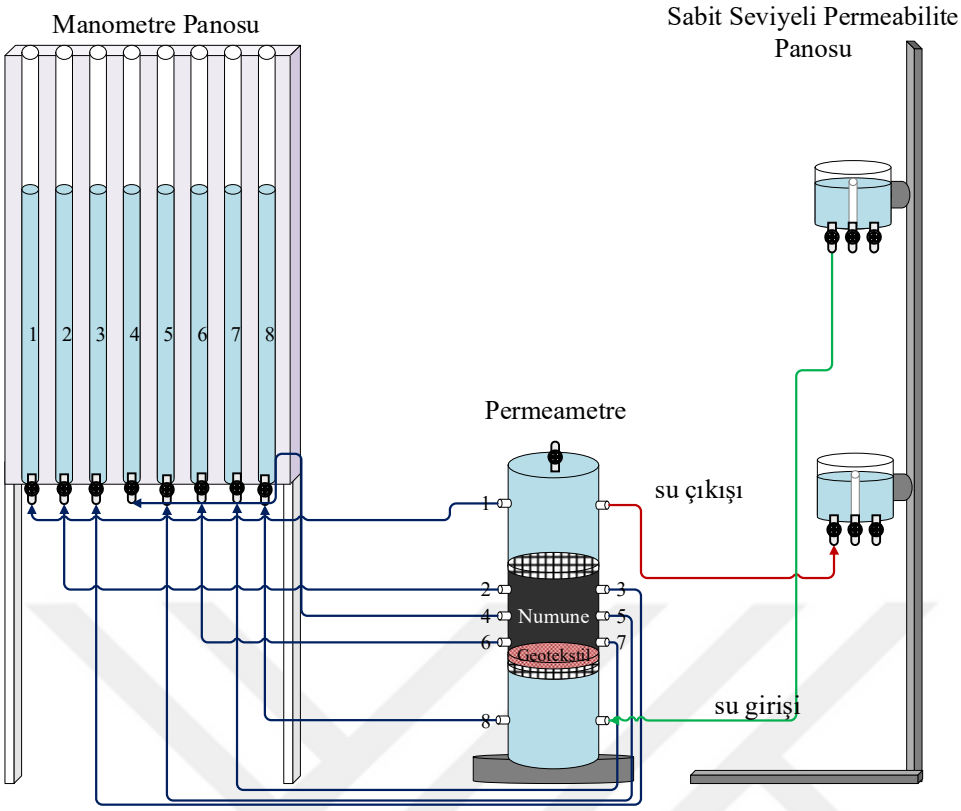
kısımlarından oluşmaktadır.

ASTM D5101 standardında, deneyde kullanılacak en büyük agrega çapına göre 100 veya 150 mm çapında silindirik numuneler kullanılması gerektiği belirtilmektedir. Önceki çalışmalarda 100 mm çapında silindirik numuneler kullanılmış ve deney sisteminde ölçüm alabilmek için numune tabanından itibaren 25 mm ve 75 mm yüksekliklere manometre portları yerleştirilmiştir. Bu çalışmada kullanılacak olan geliştirilmiş uzun süreli filtrasyon deney sisteminde 150 mm çapında 150 mm yüksekliğinde silindirik numuneler kullanılması planlanmış, permeametre haznelerinin üretimi bu ebatlarda yaptırılmıştır. Ayrıca standart uzun süreli permeabilite deney sisteminde var olan manometre sayıları artırılmıştır, geliştirilmiş deney sisteminde manometrelerin geotekstil tabanından itibaren 25-75-125 mm yüksekliklere yerleştirilmesi planlanmış ve üretim buna göre yapılmıştır.

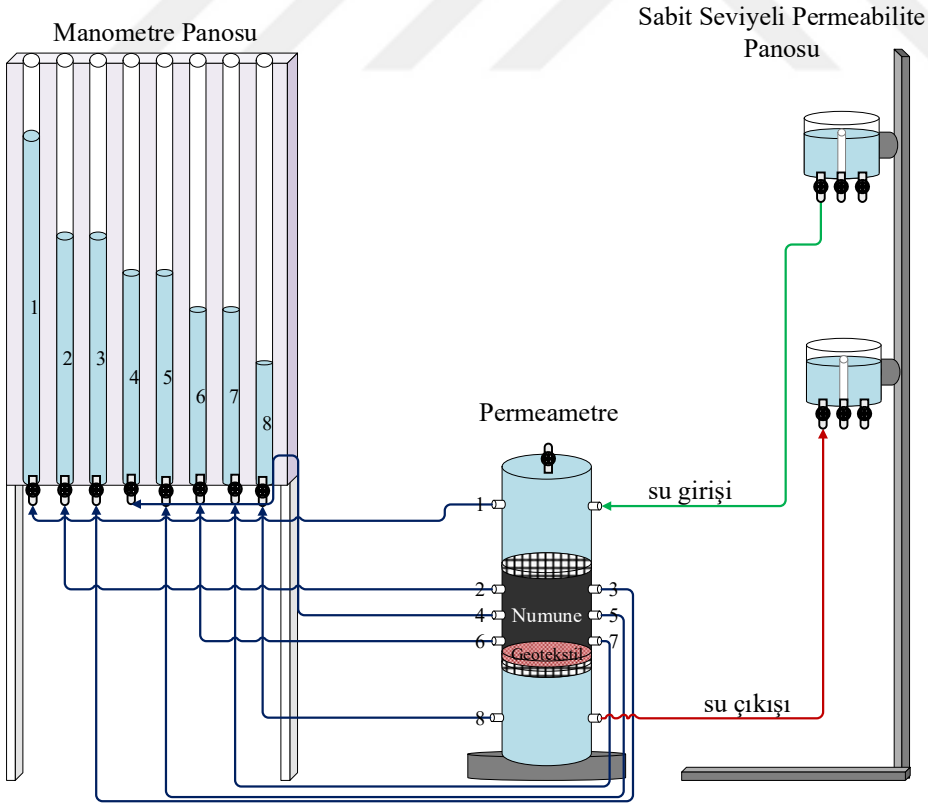
Şekil 3.7'de geliştirilmiş uzun süreli filtrasyon deney sisteminin manometre panosu, permeametre ve sabit seviyeli permeabilite panosu şematik olarak verilmiştir. Ayrıca Şekil 3.7 (a)'da doygunluk ve şekil 3.7 (b)'de uzun süreli filtrasyon deneyi aşamasında deney sisteminin şematik görünümü verilmiştir.



Şekil 3.6 : Deneysel çalışmada kullanılması için geliştirilerek yeniden tasarlanmış olan Uzun Süreli Filtrasyon Deneyi sistemi.



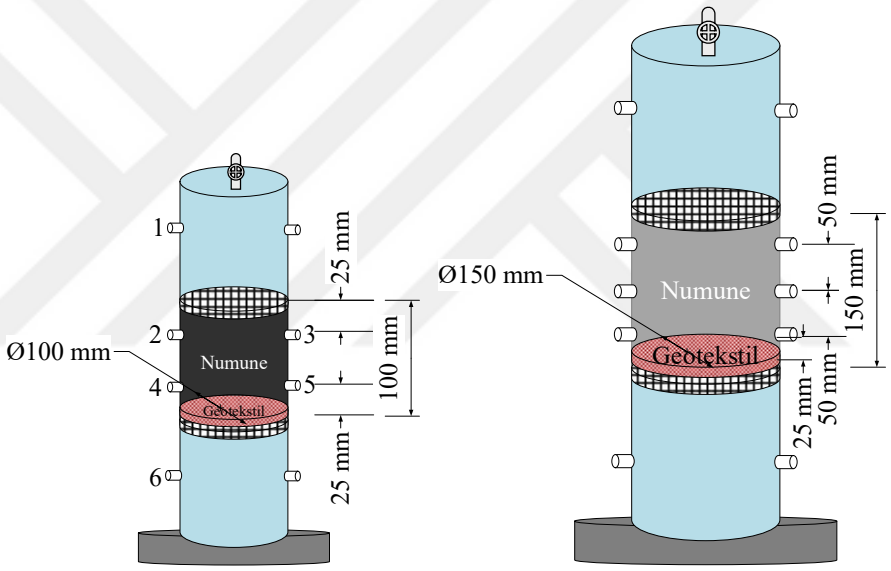
(a)



(b)

Şekil 3.7 : Geliştirilmiş ASTM D5101 Uzun Süreli Filtrasyon Deneyi sistemi şematik görünüm **(a)** Doygunluk aşaması **(b)** LTF aşaması.

Şekil 3.8'te standart uzun süreli filtrasyon deney sistemi permeametresi ve geliştirilmiş uzun süreli filtrasyon deney sistemi permeametresi karşılaştırma kolaylığı açısından gösterilmektedir. Ayrıca, Şekil 3.8' de görüldüğü gibi standart uzun süreli filtrasyon deneyi permeametresi numune hücresinde geotekstil tabanından itibaren 25 mm, 75 mm seviyelere manometre portları yerleştirilmişken, geliştirilmiş uzun süreli filtrasyon deneyi permeametresi numune hücresinde geotekstil tabanından itibaren 25 mm, 75 mm ve 125 mm seviyelere manometre portları yerleştirilmiştir. ASTM D5101 standardında belirtilen filtrasyon deneyi ile doygun agrega-geotekstil sistemlerinin tek yönlü akış koşullarında filtrasyon performansının değerlendirilmesi yapılabilmektedir. Elde edilen sonuçlar, hem parçacık tutma ve akış kapasitesi hem de ilgili agrega-geotekstil sisteminin uyumluluk davranışının bir göstergesi olarak kabul edilmektedir.



Şekil 3.8 : (a) Standart ASTM D5101 Deney Sistemi Permeametresinin şematik görüntüsü **(b)** Geliştirilmiş ASTM D5101 Deney Sistemi Permeametresi şematik görüntüsü.

Numune yerleşimi esnasında homojenliği görebilmek, sistem içerisindeki hava kabarcıklarının tespiti ve kontrolü, kısmi olarak dane hareketinin izlenebilmesi için deney sisteminin permeametre parçalarının şeffaf pleksiglas malzemeden yapılması planlanmıştır. İmalat için gerekli olan malzemeler belirlenmiş, yurtiçi ve yurtdışından temin edilip deney sistemi yaptırılmıştır. Uzun süreli filtrasyon deney sisteminin imalat aşamalarına ait fotoğraflar Şekil 3.9'da verilmiştir. Deney sistemine monte edilecek olan su hava alma cihazı, su arıtma cihazı ve yedek filtre setleri de temin edilmiştir.



Şekil 3.9 : Geliştirilmiş uzun süreli filtrasyon deney sisteminin üretim aşaması.

ASTM D5101'e uygun imal edilmiş olan deney düzeneği teslim alınmış, Laboratuvarda kurulumu yapılmıştır. Permeametre hücrelerinde belirli seviyelerde bulunan ve hücreden su çıkışını sağlayacak olan manometre portlarına, Şekil 3.10'da görülen, üretimi yaptırılmış olan delikli ve çıkıntılı vidalar takılmıştır. Sızdırmazlığın sağlanması için vidanın etrafına teflon bant sarılmıştır.



Şekil 3.10 : Geliştirilmiş uzun süreli filtrasyon deney sisteminin monte aşaması

İmalatı yaptırılıp İTÜ İnşaat Fakültesi Zemin Mekaniği Laboratuvarına kurulumu sağlanan deney sisteminin fotoğrafı Şekil 3.11'de verilmiştir. Kurulumu yapılan deney sisteminin yeri zaruri nedenlerden dolayı ilerleyen süreçte değiştirilmiştir.



Şekil 3.11 : İTÜ İnşaat Fakültesi Zemin Mekaniği Laboratuvarına kurulumu yapılmış olan geliştirilmiş LFT deney sistemi.

Yeniden kurulumu sağlanan deney sisteminde eksikliklerin kontrolü ve sızdırma olup olmadığının temini için ön deneyler yapılmıştır. Hem kalibrasyon hem de ön deneyler esnasında Şekil 3.12'de görüldüğü gibi sızdırma olmuştur.



Şekil 3.12 : İTÜ Zemin Mekaniği Laboratuvarına kurulumu ve ön deneyler ile kontrolü yapılan geliştirilmiş uzun süreli filtrasyon deney sistemi.

Kalibrasyon ve ön deneyler esnasında oluşan problemlerin çözümü için ilave malzemeler (çelik yapıştırıcısı, kalın kelepçe, çoklu vana vb.) temin edilmiş, sızdırmazlık sağalanana kadar ön deneylere devam edilmiştir. Deney sisteminde sızdırmazlığı sağlamak ve tasarım aşamasında öngörülemeyen ekipmanların temini için yurt içi ve yurt dışından gerekli malzemeler sipariş edilerek temin edilmiştir. Şekil 3.13'de verilen haznelerin birleşim noktalarında kullanılan kelepçelerin çapı, O ring görevi gören lastiklerin kalınlığı ve çapı değiştirilmiş, hazne ebatlarına uygun membran temin edilmiştir.



Şekil 3.13 : Sızdırmazlığı sağlamak için kullanılan O ring, kelepçe ve membran.

Geliştirilmiş uzun süreli filtrasyon deney sisteminde hem sızdırmazlık denemeleri hem de agrega-geotekstil sisteminin uzun süreli filtrasyon deneyi için numune hazırlanması esnasında, permeametre hücrelerinin bazılarında Şekil 3.14'de görüldüğü gibi çatlak ve kırıklar olmuştur. Kırık ve çatlak parçaların imalatı yeniden yaptırılmıştır.



Şekil 3. 14 : Numune yerleşimi esnasında hasar gören uzun süreli filtrasyon deneyi permeametre hücreleri.

Deney sisteminde tam otomatik bir su temin sistemi kullanılarak deney için gerekli suyun sürekli temini sağlanmıştır. Daha önce yapılan araştırmalarda, musluk suyundaki mikroorganizmaların varlığına bağlı olarak biyolojik büyümenin meydana geldiği, bununda hidrolik iletkenlikleri azalttığı ve hatalı ölçümlere neden olduğu belirtilmiştir. Bu nedenle deneyler için gerekli olan sudaki tortu ve diğer maddelerin tutulması için Şekil 3.15' te verilen 5 µm ve 1 µm 'lik filtreler kullanılmıştır.



Şekil 3.15 : Geliştirilmiş uzun süreli filtrasyon deney sisteminde çeşme suyunu arıtmak için kullanılan filtreler.

Ayrıca biyolojik büyümenin önüne geçebilmek için deney sistemine su temini sağlayan su deposuna düzenli aralıklar ile klor tabletleri eklenmiştir. Sızdırmazlığı sağlanan, eksik parçaların ve hücrelerin imalatı yaptırılan geliştirilmiş uzun süreli filtrasyon deney sisteminde farklı agrega ve geotekstilden oluşan drenaj sistemleri için deney numuneleri hazırlanmıştır.

3.2.2 Geotekstil optik görüntüleme

Uzun süreli filtrasyon deneyi öncesi ve sonrası geotekstil numunelerin mikroskop alında incelenebilmesi için öncelikle bir numune hazırlama işlemi yapmak gerekmektedir. Geotekstil numunelerden ince kesit hazırlanması için numune kalıbına uygun ebatlarda kesilmiş ve numune kalıbına yerleştirilen geotekstiller aşama aşama epoksi ile doyurulmuştur.

Numuneler vakum altında epoksi polimer emdirilerek doyurulduktan sonra kesit hazırlama cihazında ince dilimler halinde kesilmiş ve epoksi polimer ile lamlara yapıştırılmıştır. Daha sonra ince kesit cihazında gerekli kesme ve inceltme işlemlerinden sonra parlatılmıştır. Her bir geotekstil numunesinden orta ve kenar alanlarından olmak üzere en az iki ince kesit numunesi hazırlanmıştır.

Şekil 3.16'da bu çalışma kapsamında kullanılan geotekstil numunelerin ince kesit hazırlanma işlem adımları verilmiştir.

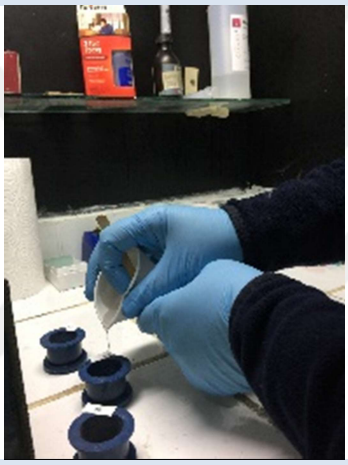
1. Reçine hazırlama



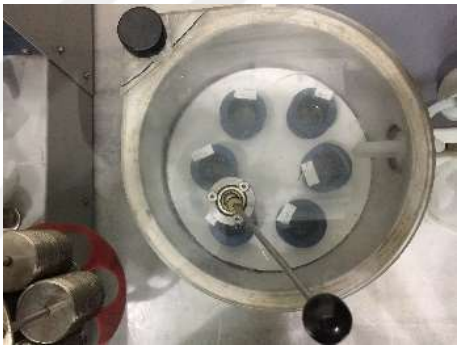
2. Geotekstili kalıba yerleştirme



3. Reçine uygulama



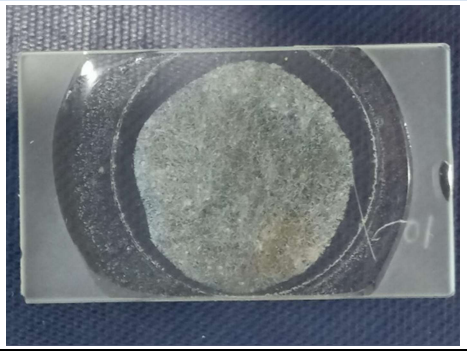
4. Vakum uygulama



5. Kesme, Zımparalama, Parlatma



6. Hazırlanmış ince kesit numunesi

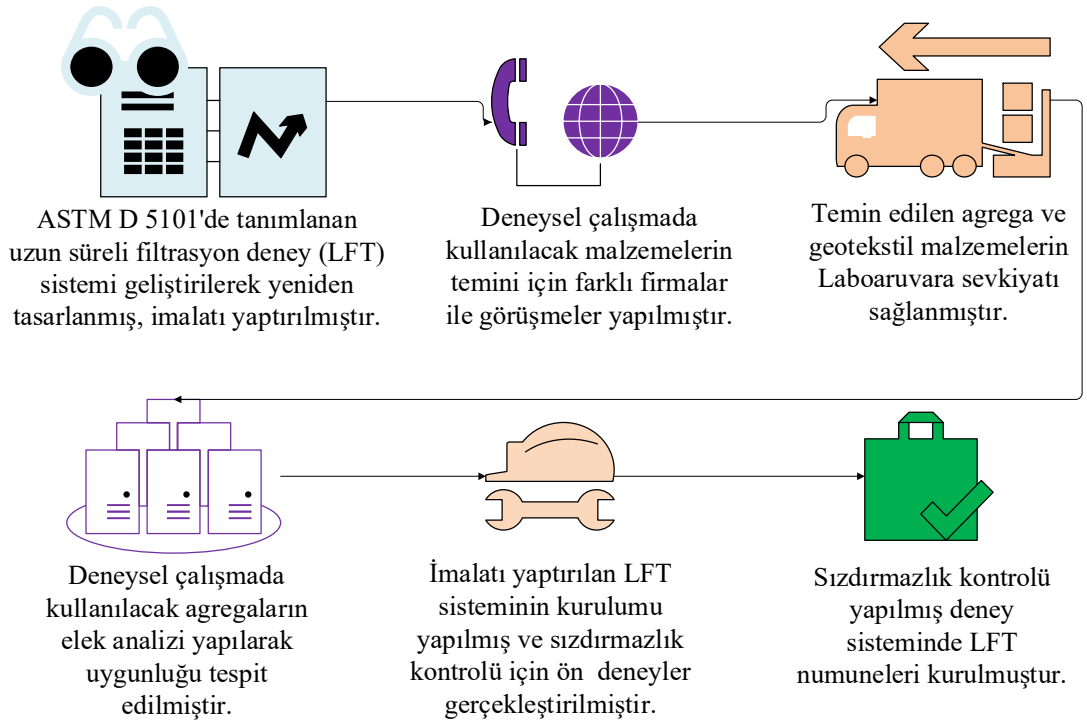


Şekil 3. 16 : Geotekstil numunesi ince kesit hazırlama adımları.

İnce kesit numunleri hazırlanan geotekstillerin mikrofotoğrafının çekilmesi için uygun koşullar altında saklanmıştır. Hazırlanan parlak ince kesitte stereo mikroskop (tek nikol) ile geotekstil malzemenin tıkanması görüntülenebilmektedir.

4. DENEYSEL ÇALIŞMA

Bu tez çalışmasının esas amacı olan farklı endüstriyel atık mazlemelerin drenaj sistemlerinde kullanılabilirliğinin, geliştirilerek yeniden tasarlanmış olan uzun süreli filtrasyon deneyleri (LFT) ile tespitinin yapılabilmesi için Şekil 4.1'de özet olarak gösterildiği gibi öncelikli olarak LFT deney sisteminin imalatı yaptırılmıştır, ayrıca deneysel çalışmalarda kullanılması planlanan agrega mazlemelerin ve geotekstilin temini için görüşmeler yapılmıştır, temin edilen malzemelerin İTÜ İnşaat Fakültesi Zemin Mekaniği Laboratuvarına nakliyesi gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmada kullanılmak üzere temini yapılan agregalar üzerinde sınıflandırma deneyleri yapılarak dane çapı dağlılımları tespit edilip deneysel çalışmada kullanımına uygunluğu belirlenmiştir, imalatı yaptırılan LFT sisteminin Laboratuvara kurulumu yapılarak, sızdırmazlık deneyleri ve ön deneyler gerçekleştirilmiştir. Sızdırmazlığı %100 sağlanmış LFT sisteminin deneysel çalışmalar için hazır olduğuna karar verilip deneysel çalışmalara başlanmıştır.



Şekil 4.1 : Tez çalışmasının programı.

Bu çalışmada endüstriyel atık malzemelerin uzun süreli filtrasyon davranışlarının belirlenmesi ve performanslarının karşılaştırılması amacıyla laboratuvarda 6 farklı numune üzerinde geliştirilmiş uzun süreli filtrasyon deney sisteminde deneyler yapılmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Yapılan deney sonuçlarına göre farklı endüstriyel atık malzemelerinin, hidrolik eğimin, filtrasyon parametrelerine etkisi araştırılmıştır.

Ayrıca uzun süreli filtrasyon deney sonucu geotekstillerin gözenek yapısındaki değişimin tespiti için optik görüntüleri alınmıştır. Uzun süreli filtrasyon deneyi ile belirlenen parametreler görüntü analizi ile elde edilen yapısal sonuçlar ile karşılaştırılmıştır.

Bu bölümde filtrasyon parametrelerine etkiyen faktörleri belirlemek için geliştirilmiş uzun süreli filtrasyon deney numunelerin hazırlanması ile uzun süreli filtrasyon deneyi ve optik görüntüleme için ince kesit numunesinin hazırlanma aşamaları ayrıntıları ile açıklanmıştır.

4.1 Deney Numunelerinin Hazırlanması

Deney programı kapsamında fiziksel tıkanmanın belirlenmesi için yapılacak uzun süreli filtrasyon deneyi numunesi ve uzun süreli filtrasyon deneyi sonrası geotekstilin gözenekli yapısındaki değişimin görüntülenebilmesi için ince kesit numunesi hazırlanmıştır.

4.1.1 Geliştirilmiş uzun süreli filtrasyon deneyi numunesinin hazırlanması

Farklı agrega türlerinin, agrega ve geotekstilden oluşan drenaj sistemlerindeki davranışını laboratuvarda tanımlayacak olan, tıkanma endeksleri veya filtrasyon parametreleri olarak tanımlanan hidrolik eğim oranlarını (GR) ve geçirimlilik oranlarını (KR) belirlemek için yapılan uzun süreli filtrasyon deneylerinde, optimum su muhtevası ve maksimum kuru birim hacim ağırlıkta standart proktor enerjisi ile sıkıştırılmış numuneler kullanılmıştır. Agrega malzemenin numune hücresine yerleştirilmesi ve sıkıştırılması, hazne boyunca agreganın dane çapı dağılımında maksimum homojenliğin sağlanması için 5 tabaka halinde yapılmıştır. Farklı agrega malzemesinin her bir tabaka için, dane çaplarına göre Çizelge 4.1'de verilen ağırlıklarda numuneler hazırlanmıştır.

Çizelge 4.1 : Uzun süreli filtrasyon deneyi numunesinin her bir tabakasındaki elek üstü malzeme miktarları.

Elek No	% Miktar	RAP (g)	RCA (g)	SS1 (g)	SS2 (g)	DA1 (g)	DA2 (g)
10 Nolu elek üstü	10	94.32	101.90	137.77	133.75	102.16	107.03
18 Nolu elek üstü	15	141.48	152.85	206.65	200.63	153.24	160.54
30 Nolu elek üstü	9	84.89	91.71	123.99	120.38	91.95	96.32
40 Nolu elek üstü	14	132.04	142.66	192.87	187.25	143.03	149.84
50 Nolu elek üstü	13	122.61	132.47	179.10	173.88	132.81	139.14
70 Nolu elek üstü	19	179.20	193.60	261.76	254.13	194.11	203.35
100 Nolu elek üstü	10	94.32	101.90	137.77	133.75	102.16	107.03
100 Nolu elek altı	10	94.32	101.90	137.77	133.75	102.16	107.03

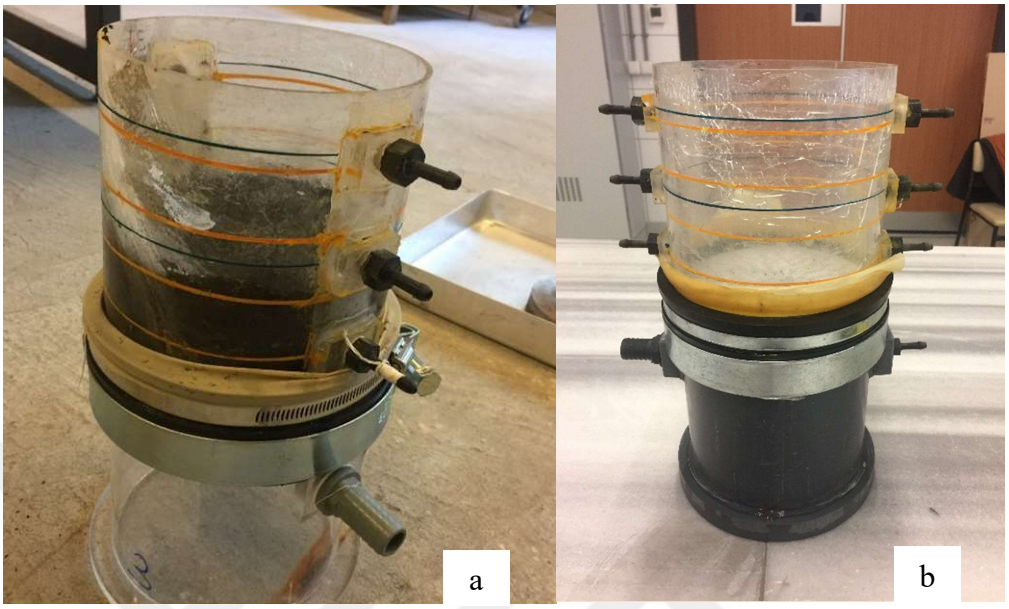
Sıkıştırma, geçirgenlik ve filtrasyon deneyleri arasındaki tutarlılığı sağlamak ve numune hazırlanmasındaki heterojenlikten kaçınmak için numunelerin hazırlanması ve deneyler aynı operatör tarafından yapılmıştır. Şekil 4.1'de uzun süreli filtrasyon deneyi için numune hazırlanması aşamaları görülmektedir. D = 150 mm, L = 150 mm ebatlarına sahip numune hücresine agregalar Şekil 4.1(a)' da görüldüğü gibi 5 tabaka şeklinde yerleştirilmiştir. Orta hazneye (numune haznesine) yerleştirilmek üzere numuneler standart proktor deneyinden elde edilen optimum su muhtevasında hazırlanmış, su muhtevasında değişim yaşanmaması için numune hazırlık aşamasında nemli bez ile örtülmüş ve bir müddet dinlenmeye bırakılmıştır (Şekil 4.1 (b)). Üst kısmı açık olan alt haznenin numune hücresinden ayrılmasını sağlayacak olan ve agregaların numune haznesinde tutulmasını sağlarken, suyun ve akış koşullarına göre ince malzemenin geçişini engellemeyecek şekilde gözenekli yapıya sahip olan delikli plaka yerleştirilmiştir. Delikli plakanın üzerinede 15 cm çapında kesilmiş geotekstil yerleştirilmiştir (Şekil 4.1 (c)). Her bir tabakanın numune haznesine yerleştirilmesinde, tabakalar arasındaki geçiş katmanı oluşmasını önlemek için özen gösterilmiştir (Şekil 4.1 (d)). Numune orta hazneye yerleştirildikten sonra üst hazne ile montajı yapılmadan önce alt ve orta hazne arasına yerleştirilen delikli plakanın aynısı orta ve üst hazne arasınada yerleştirilmiştir (Şekil 4.1 (e) ve (f)).



Şekil 4.2 : Uzun süreli filtrasyon deney numunesinin hazırlanması.

Deney haznelerinin (alt-orta-üst) montajı esnasında, sızdırmazlık olmaması için çok dikkat edilmiştir. Ayrıca deney numunelerinin sıkıştırılması sırasında şeffaf pleksiglass malzemeden üretilmiş olan haznelerin zarar görmemesi için de özen gösterilmiştir. Numunelerin büyük titizlikle yerleştirilmesine rağmen haznelerin montajı esnasında sızdırmazlığı sağlamak için kelepçelerin vidalanmasında haznelerin bazıları kırılmıştır. Kırılan haznelerin yeniden imaltı yaptırılmıştır. Fakat imalat

esnasında deneylerin sürekliliğini sağlayabilmek için kırılan alt hazneler şeffaf pleksiglass malzemeden değil de Şekil 4.2(b)'de görüldüğü gibi daha dayanıklı olan bir malzemeden imal ettirilmiştir.



Şekil 4.3 : Farklı malzemeden imalatı yaptırılan uzun süreli filtrasyon permeametresi; alt haznesi **(a)** Pleksiglas malzeme **(b)** Daha dayanıklı plastik malzeme.

Alt-orta-üst hücrelerin montajı yapıldıktan sonra, permeametre ile manometre panosunun ve sabit seviyeli permeabilite hücrelerinin (su giriş rezervuarı ve su çıkış rezervuarı) bağlantıları yapılmış, deney numunesi deneyin ilk aşaması olan doygunluğu sağlamak için hazır hale getirilmiştir.

4.1.2 İnce kesit numunesinin hazırlanması

Uzun süreli filtrasyon deney sonrasında oda ısısında kurutulmuş geotekstilin optik görüntülemesinin yapılabilmesi için ince kesit numuneleri hazırlanmıştır. Bu çalışmada optik görüntüleme yapılmasının nedeni, deney sonrası geotekstil malzemedeki kalıntıların yapısının ve dağılımını incelenmek, yapısındaki gözeneklerin ne ölçüde tıkandığını fiziki olarak tespit etmek içindir.

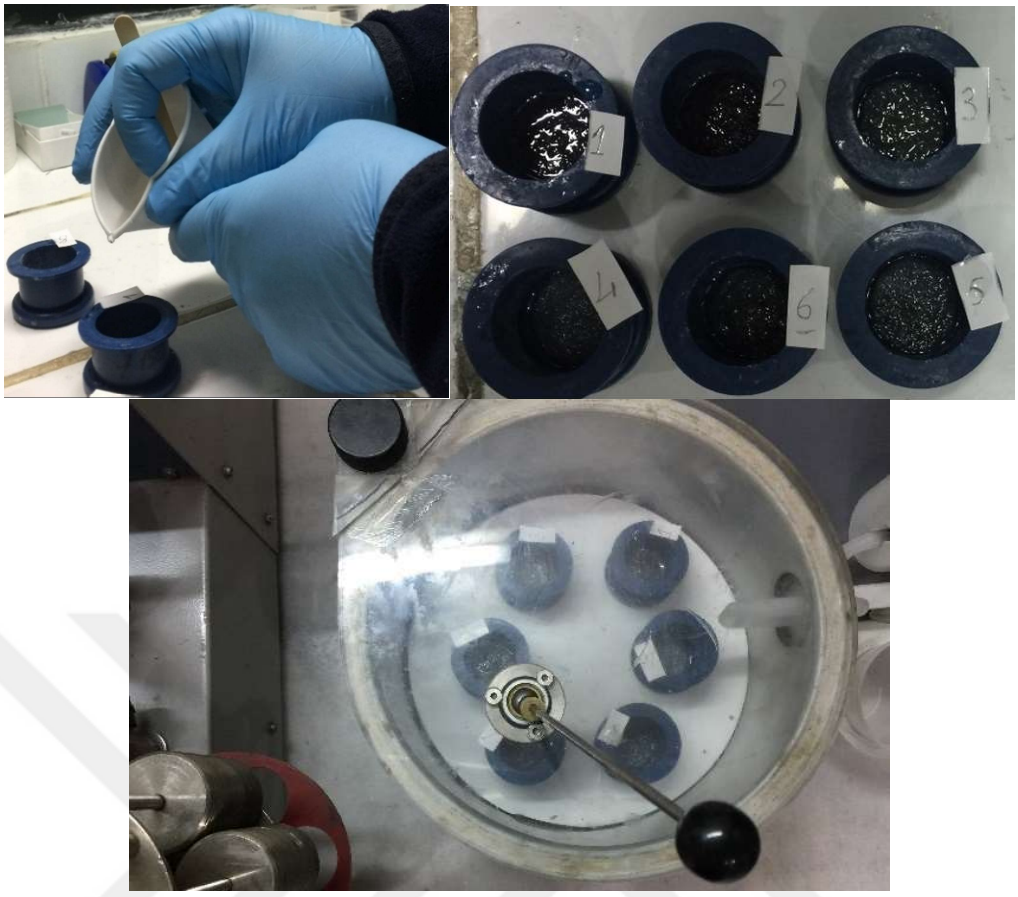
Deneysel çalışmada kullanılan geotekstillerden ince kesit numunesi hazırlanması için parçalar kesilirken, geotekstil numunenin deforme olmaması için kesim işlemi çok hassas yapılmıştır. Geotekstil malzeme ince kesit numunesi, Şekil 4.3'de verilen 3 cm çapındaki dairesel kesitli (7.07 cm^2 alan) kalıplar kullanılarak hazırlanmıştır. Literatürde geotekstil optik görüntülemesi için kare kesitli veya dikdörtgen kesitli

kalıplar kullanılmış, geotekstil numune ebatı maksimum 2.5 x 2.5 cm olan (6.25 cm^2 alan) kare kesitli kalıplar kullanılmıştır. Bu çalışmada, geotekstil numunelerinin ince kesitlerinin hazırlanmasında, laboratuvar ortamında bulunan, epoksi işleminin kolay uygulanacağı dairesel kesitli kalıp kullanılmıştır. Kalıp alt ve üst bölme olmak üzere iki kısımdan oluşmaktadır. Alt bölmeye yerleştirilen geotekstil numunenin üzerine epoksi işleminin kolay uygulanabilmesi için gövde kısmı yerleştirilmiştir. Geotekstil numunenin yerleştirildiği alt bölme ile gövde bölmesi bağlandıktan sonra 3 cm çapa sahip geotekstil numuneler epoksi ile doyurulmuştur. Kalıplama işlemi soğuk yöntem kullanılarak yapılmıştır.



Şekil 4.4 : İnce kesit numunesinin hazırlanması için kullanılan dairesel kesitli kalıplar.

Epoksi reçine karıştırılarak kalıp içine ters konulmuş numunenin üzerine dökülmüştür. Epoksi ile doyurma işleminin nedeni optik görüntüleme ile mikrofotoğrafı çekilecek geotekstil numunelerin içine hapsolmuş hava kabarcıkların çıkmasını sağlamak ve optik görüntülemesi alınacak numune için düzgün bir kesit hazırlamaktır. Epoksi ile doyurulma işlemi esnasında herhangi bir hava kabarcığının kalmaması için epoksi uygulaması kademeli olarak yapılmış ve Şekil 4.4'de görüldüğü gibi epoksi uygulaması esnasında numuneler içerisinde hapsolmuş hava kabarcıklarının çıkması için emprenye işlemi uygulanmıştır. Emprenye işlem tankında vakum basınç metodu uygulanarak epoksi geotekstil numuneye hava kabarcığı kalmayacak şekilde emdirilmiştir. Numunelerin epoksi ile doyurulma işlemi bir günden fazla sürmüştür. Soğuk kalıplanan bütün numuneler için bir kodlama yöntemi kullanılarak etiketleme yapılmıştır.



Şekil 4.5 : Dairesel kesitli geotekstil numunelere epoksi uygulanması.

Vakum altında epoksi polimer emdirilerek gömülen geotekstil numuneler, kesit hazırlama cihazında ince dilimler halinde kesilmiş ve Şekil 4.5'de görüldüğü gibi epoksi polimer ile cam lam üzerine yerleştirilmiştir.



Şekil 4.6 : Geotekstil kesitlerin cam lam üzerine yerleştirilmesi.

Bir Lobgitech-PM4 kesit inceltme makinesi kullanılarak geotekstil kesitleri inceltilmiştir. Kesitlerin inceltilmesi esnasında Şekil 4. 6'da görüldüğü gibi kalınlık kontrolü yapılarak inceltme işlemine devam edilmiştir. İnceltme işlemine yaklaşık 200 µm kalınlığında kesitler elde edilene kadar devam edilmiştir.



Şekil 4.7 : Getoekstil kesitlerin inceltilmesi.

İnce kesit yüzeylerin daha yumuşak ve pürüzsüz olması için Şekil 4.7'de verilen Struers-Rotapol 35 zımparalama makinasında zımpara işi yapılmıştır. Mikroskobik inceleme yapılmak üzere kesilen geotekstil numunelerin yüzeyi pürüzlü ve çiziklidir. Mikroskopta görüntü alınabilmesi için pürüzsüz, düzgün bir yüzeye ihtiyaç vardır. İncelenmek istenen içyapının görülebilmesi için yüzeydeki deforme olmuş tabaka uzaklaştırılması için zımparalama ve parlatma işleminin yapılması önemlidir.



Şekil 4.8 : İnceltilmiş geotekstil numunelerin zımparalanması.

Zımparalanmış numuneler, Şekil 4.8'de verilen parlatma cihazında zımparalamadan kalan pürüzlülüğün giderilmesi için parlatılmıştır. Zımparalama ve parlatma işlemleri kademeli olarak gerçekleştirilmiştir ve her kademede bir öncekinden daha ince aşındırıcılar kullanılmıştır. Böylece her kademede numunede oluşan çizik ve deformasyonların en aza indirilmesi sağlanmıştır. İnce parlatma işlemi 20 ila 45 dakika arasında vakit almıştır. İşlemden sonra, ortalama numune kalınlığı 200 µm olmuştur. İnce parlatma işleminin başarısı son derece kritiktir, çünkü yüzeydeki taşlama ve aşırı ince parçacıkların neden olduğu deforme olmuş tabakayı kaldırır. Bu, görüntüler üzerinde doğru ölçümler elde etmek için oldukça gerekli olan nispeten düzgün bir yüzey sağlamaktadır.



Şekil 4.9 : Zımparalanmış geotekstil numunelerin parlatılması (kaba parlatma ve ince parlatma).

Parlatma işlemi numuneye ayna parlaklığı vermek için yapılmaktadır. İnce parlatma makinesinde ince parlatma işlemi için aşındırıcı olarak silisyum karbür tane tozu kullanılmıştır. Örneklerin cilalanması, görüntü analizindeki kantitatif ölçümler için gereklidir. Cilalanmış örnekler daha sonra görüntü analizi için pürüzsüz ve temiz bir yüzey elde edilmesini sağlamak için bir ışık mikroskobu altında analiz edilmiştir.

Geotekstil numunelerin her birinden birden fazla ince kesit hazırlanmıştır. Numune hazırlama işlemi, geotekstil malzemeyi oluşturan polietilenpropilen malzeme nedeni ile çok hassas bir şekilde yapılmış ve uzun sürmüştür. Mikroskop görüntüsünde hava kabarcıkları tespit edilen ince kesit numuneler başarısız sayılmış ve yeniden ince kesit numunesi hazırlanmıştır.

4.2 Geliştirilmiş Uzun Süreli Filtrasyon Deneyi

Agrega ve geotekstil sisteminin filtrasyon performansı, geliştirilmiş uzun süreli filtrasyon deney sisteminde, ASTM D5101'de listelenen prosedürler izlenerek gerçekleştirilmiştir. Deneyler her bir hidrolik eğimde, tam kararlı durum akış koşulları elde edilene kadar devam ettirilmiştir. Kararlı durum akış koşulu, manometrelerdeki basınç yüksekliklerindeki değişime, çıkış rezervuarından deşarj olan su miktarına, Darcy yasasına ve ASTM D5101'de açıklandığı gibi hidrolik eğim oranındaki değişim (GR) tespit edilerek belirlenmiştir. Ayrıca agrega-geotekstil sisteminin geçirgenliği (k_{sistem}) kararlı akış durumunun oluştuğunu belirlemek için değerlendirilmiştir.

Uzun süreli filtrasyon deneyi değişik hidrolik eğimler altında hem yalnızca kullanılan agreganın geçirimlilik katsayısını (k_{agrega}) hem de agrega ve geotekstilin oluşturduğu drenaj sisteminin geçirimlilik katsayısını (k_{sistem}) ölçmeye, hidrolik eğim oranının (GR) ve geçirimlilik oranının (KR) belirlenmesine olanak vermektedir. ASTM D5101'de belirtilen 24 saatlik zaman periyodu ince dane miktarı fazla olan agregalarda genellikle sabit bir hidrolik eğim ve geçirimlilik oranları elde etmek için yeterince uzun bir zaman dilimi olmadığından 24 saatte elde edilen değerler yanıltıcı olabilmektedir. Bu nedenle, bu çalışmadaki deneyler stabil hidrolik eğim oranı ve geçirimlilik oranı elde edilene kadar yürütülmüştür. Bu çalışmadaki her bir deney, agrega-geotekstil drenaj sisteminin tıkanma performansını anlamak için 6 aydan uzun bir süre devam ettirilmiştir. Kabul edilen stabilizasyon kriteri GR ve KR oranlarının son beş değerlerindeki değişimin %5'den daha az olduğu durum olarak düşünülmüştür.

Şekil 4.9'da görüldüğü gibi numunelerde doygunluk aşamasında, alt hücreden su girişi hızlı bir şekilde yapıldığında suyun hızına bağlı olarak üst hazneye ince agregalarında geçtiği görülmektedir. Hazırlanan numunelerde homojenliği bozmamak ve doygunluk aşamasında dane hareketini önlemek için çok yavaş su verilerek doygunluk sağlanmıştır. Ayrıca, doygunluğun sağlanması aşamasında üst hazneden, mevcut hava kabarcıkların çıkışını kolaylaştırmak için vakum uygulanmıştır. Deney sisteminde herhangi bir hava kabarcığının kalmadığından emin olana kadar gerekli kontroller yapılmıştır. Doygunluk aşamasında agrega hareketine engel olmak için hücreler çok az su ile beslenmiş tüm sistemin doygunluğa ulaşması yaklaşık 7~8 saat sürmüştür.



Şekil 4.10 : Uzun süreli filtrasyon deneyi öncesi numune doygunluk işlemi.

Deney sisteminde, doygunluk sağlandıktan sonra numunedeki ve sistemin diğer parçalarındaki olası herhangi bir sıkışmış hava kabarcığının numuneden ve deney sisteminden çıkışının sağlanması, sistemde su kaçağının olup olmadığının tespiti için numune 7 gün boyunca doygun durumda bekletilmiş ve gerekli kontroller yapılmıştır. Doygunluğun sağlanması aşamasında manometrelerin tıkanıp tıkanmadığının kontrolü aynı seviyede bulunan iki manometre okuması arasındaki fark dikkate alınarak gözlemlenmiştir. Doygunluk esnasında sistemin dengede olması gerektiği için tüm manometrelerdeki su seviyesinin aynı olması gerekliliği göz önünde bulundurularak sistemde herhangi bir kaçak olup olmadığının kontrolü de yapılmıştır.

Uzun süreli filtrasyon deneyleri bu süreçten sonra başlatılmıştır. Şekil 4.10'da doygunluğu sağlanıp en küçük hidrolik eğimde filtrasyon deneyi başlatılmış bir deney sistemi görülmektedir. Deney süresince, manometre okumaları ve deşarj olan su miktarı ile giriş ve çıkış sıcaklığı düzenli aralıklarla (en az 24 saatte bir) kaydedilmiştir. Agrega–geotekstil sisteminin (k_{sistem}) geçirgenliği Darcy yasası kullanılarak, hidrolik eğim oranı ve geçirimlilik oranı değerleri ise ASTM D5101'de açıklandığı şekilde hesaplanmıştır.



Şekil 4.11 : Doygunluğu sağlanmış uzun süreli filtrasyon deneyi numunesi.

Hidrolik eğim oranı ve geçirimlilik oranının stabilizasyonu için gerekli zaman, ASTM D5101 deney prosedüründe belirtilen süreden çok daha uzun olduğundan, bir agrega-geotekstil sisteminde i=0.33, 0.66, 1, 2.5 hidrolik eğimlerinde her bir deneyin tamamlanması 6 aydan daha fazla sürmüştür. Hidrolik eğimler, numuneyi kesintisiz su girişi sağlayan hazne ile numuneden çıkan suyun transferini sağlayan hazne arasındaki kot farkının numune yüksekliğine oranının i=0.33, 0.66, 1, 2.5 değerlerini verecek şekilde, numuneye su girişi sağlayan haznedeki kot farkı ayarlanarak sağlanmıştır. Her bir hidrolik eğimden diğerine geçiş için sağlanması gereken stabilizasyon şartı, birbirini takip eden beş GR ve KR sistemi okumasının mutlak farkının %5' i aşmadığı durum olarak kabul edilmiştir.

Deneysel çalışmalarda kullanılan geliştirilmiş uzun süreli filtrasyon deney sisteminde geotekstilden itibaren 25 mm, 75 mm ve 125 mm yüksekliklere yerleştirilmiş manometrelerdeki değerler periyodik olarak kaydedilmiştir. Her bir agrega-geotekstil sistemi için yapılan uzun süreli filtrasyon deneyinde, numune hücresinin farklı seviyelerine yerleştirilmiş manometre portlarındaki (Şekil 4.11) değerler dikkate alınarak denklem 4.1, 4.2, 4.3 ve 4.4'te verilen hidrolik eğim oranı (GR) değerleri hesaplanmış ve karşılaştırılmıştır. Bu çalışmada GR1 ve GR2 toplamının ortalaması alınarak hesaplanan GR4 değeri karşılaştırma yapmak için kullanılmıştır

$$GR1 = \frac{i_{0-25}}{i_{25-75}} = 2 \times \frac{h_{25} - h_0}{h_{75} - h_{25}} \quad (4.1)$$

$$GR2 = \frac{i_{25-75}}{i_{75-125}} = \frac{h_{75} - h_{25}}{h_{125} - h_{75}} \quad (4.2)$$

$$GR3 = \frac{i_{0-25}}{i_{25-125}} = 4 \times \frac{h_{75} - h_{25}}{h_{125} - h_{75}} \quad (4.3)$$

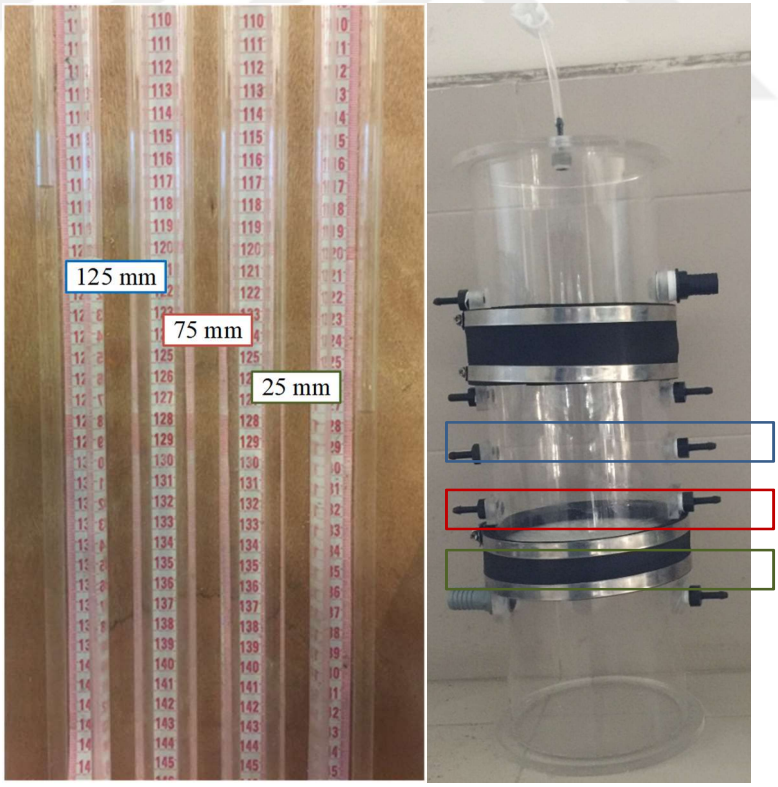
$$GR4 = \frac{GR_1 + GR_2}{2} \quad (4.4)$$

Burada;

GR: geçirimlilik oranı,

h_0, h_{25}, h_{75}, h_{125}: geotekstil tabanından itibaren yerleştirilen farklı seviyelerdeki manometre okumaları,

i: hidrolik eğimdir.



Şekil 4.12 : Farklı seviyelerdeki manometre portlarına ait su basınçları.

Şekil 4.11'de verilen manometre okumalarındaki ve hesaplanan hidrolik eğim oranı (GR) ve geçirimlilik oranı (KR) değerlerindeki değişimler kabul edilebilir seviyeye

indiğinde veya değişim gözlemlenmediğinde sistemin stabilite olduğu kabul edilmiş ve bir sonraki hidrolik eğime geçilmiştir.

ASTM D5101 de geçirimlilik oranı (KR) (denklem 4.5) agreganın permeabilite katsayısının (denklem 4.6) sistemin permeabilite katsayısına (denklem 4.7) oranı olarak tanımlamaktadır. Bu çalışmada da KR agreganın permeabilitesinin sistemin permeabilitesine oranı alınarak hesaplanmıştır.

$$KR = \frac{k_{agrega}}{k_{sistem}} \tag{4.5}$$

$$k_{sistem} = \frac{Q}{A \times t} \times \frac{1}{i_{sistem}} \times \frac{\mu_T}{\mu_{20}} = \frac{Q}{A \times t} \times \frac{l}{h_{150} - h_0} \times \frac{\mu_T}{\mu_{20}} \tag{4.6}$$

$$k_{agrega} = \frac{Q}{A \times t} \times \frac{1}{(U_{ort} - A_{ort})} \times \frac{\mu_T}{\mu_{20}} \tag{4.7}$$

Burada;

k_{sistem}: Sistemin 20 °C sıcaklıktaki permeabilite değeri, cm/s,

Q: t zamanında numunu hücresinden geçip çıkış rezervuarında biriken su miktarı, cm^3,

i: Hidrolik eğim,

A: Numune kesit alanı, cm^2,

t: Q miktarında suyun toplanması için gerekli olan zaman, s,

μ_T: T sıcaklıkta suyun viskozitesi,

μ_{20}: 20 °C sıcaklıkta suyun viskozitesi,

l: Numune uzunluğu,

U_{ort}: Üst manometre okumalarının ortalaması

A_{ort}: Alt manometre okumalarının ortalaması

k_{agrega} değerinin belirlenmesi için numune hücresinde 25 mm ve 125 mm mesafelerde bulunan manometre okumaları dikkate alınarak hesaplanmıştır. k_{agrega} ve k_{sistem} değerleri için stabil olmuş akış oranları kullanılmıştır.

Her bir hidrolik eğimde stabil hidrolik eğim oranı ve geçirimlilik oranı elde edildikten sonra bir sonraki hidrolik eğime geçilerek uzun süreli filtrasyon deneyi devam

ettirilmiştir. En yüksek hidrolik eğimde de (i=2.5) stabil GR ve KR değerleri elde edildikten sonra deney sonlandırılmıştır. Bu çalışmada, uzun süreli filtrasyon deneylerinde giriş ve çıkış rezervuarlarının yüksekliği ayarlanarak i= 0.33, 0.66, 1, 2.5 ve 5 hidrolik eğimlerin uygulanması planlanmıştır. Fakat i=5 hidrolik eğim değerinde Şekil 4.12'de görüldüğü gibi tüm deneylerde sızıntı yaşanmış ve deneye devam edilememiştir.



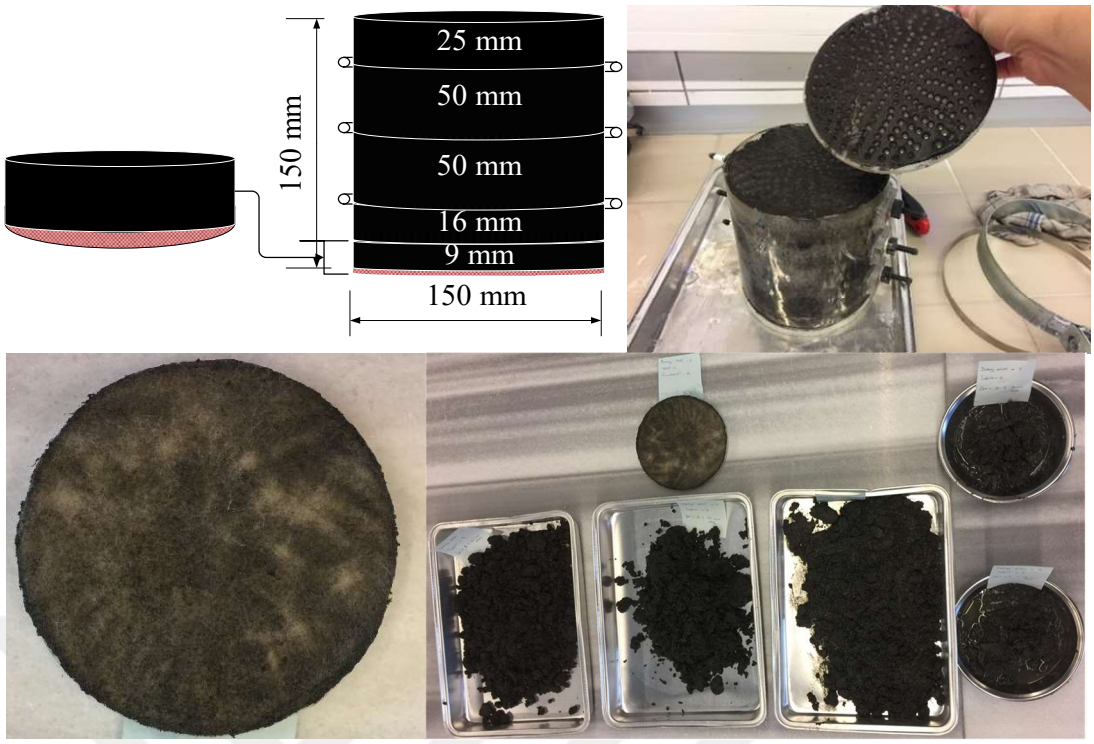
i=0.33 i=2.5

i=5

Şekil 4.13 : Farklı hidrolik eğimlerin uzun süreli filtrasyon deney sisteminde uygulanması.

Numunenin hücreden çıkartılmasından önce; permeametrenin haznelerindeki (üst, numune ve alt hücrelerdeki) sular alt porttan mümkün olduğunca yavaş bir şekilde boşaltılmıştır. Deney sonrası, uzun süreli filtrasyon deneyi (LFT) esnasında göç eden ince dane miktarını belirlemek için deney numunesi dikkatlice beş tabaka halinde hücreden çıkarılmış ve kurutulmuştur. Ayrıca deney sonrası geotekstil numuneler oda sıcaklığında kurutulmuş ve ince kesit numunesi hazırlanması için muhafaza edilmiştir.

Zamana ve akışa bağlı olarak ince agrega daneleri suyun akış yönünde geotekstile doğru hareket ederek zamanla geotekstilin hemen üstünde ince agrega danelerinin yoğunluğunun artmasına neden olmaktadır. Bu normal davranış biçiminden sonra ince agrega daneleri geotekstili de geçerek sistemin geçirgenliğinin artmasına hatta borulanmanın gerçekleşmesine neden olabilirler. Drenaj sistemlerinde malzeme olarak doğal agrega yerine endüstriyel atık malzemenin kullanılması durumunda sistemde oluşabilecek fiziksel tıkanma, bu atıkların içindeki ince dane boyutundaki agregaların suyun akış yönüyle beraber hareket edip geotekstil malzemeyi tıkadığında veya geotekstilin üzerinde bir filtre tabakası oluşturduğunda gerçekleşmektedir. Bu nedenle uzun süreli filtrasyon deneyi sonrası agrega içerisindeki fiziksel göçün tayini için, deneye tabii tutulan numune geotekstilden itibaren 9 mm, 16 mm, 50 mm, 50 mm ve 25 mm yüksekliğinde 5 tabaka halinde çıkarılıp kurutulmuş numunelerin dane çapı dağılımı tayini için kuru elek deneyi yapılmıştır (Şekil 4.13). Özellikle geotekstilin hemen üzerindeki ilk 9 mm lik tabakada ince danelerin birikmesinin tıkanmaya neden olacağı ve burada biriken ince danelerin filtre keki oluşturabileceği düşünüldüğünde, uzun süreli filtrasyon deneyi boyunca, numunenin ihtiva ettiği ince danelerin suyun akışına paralel olarak geotekstile yakın bölgede yoğunlaşacağı tahmin edilmiştir. Ayrıca deney sonunda agrega-geotekstil sisteminden geçen ince dane miktarını belirlemek ve borulanma performansını değerlendirmek için alt haznede biriken agregalar toplanmıştır. Bu çalışmada kullanılan agrega-geotekstil drenaj sistemi modelinde alt haznede numune birikiminin geri kazanılmış asfalt (RAP) malzemesi dışındaki malzemeler için ihmal edilebilir miktarda olduğu tespit edilmiştir.



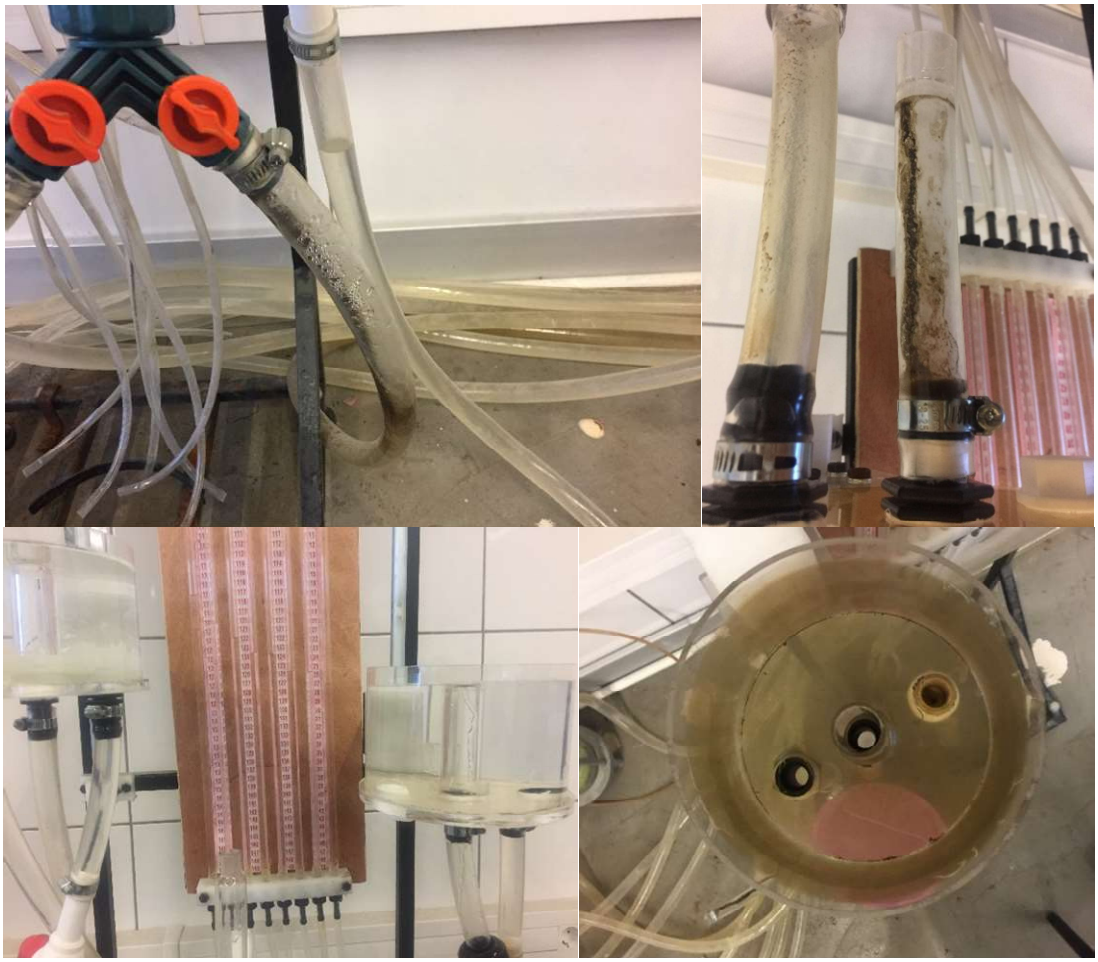
Şekil 4.14 : Uzun süreli filtrasyon deneyi sonrası 5 tabakaya ayrılmış geomalzeme ve geotekstil**.**

Geliştirilmiş uzun süreli filtrasyon deney sisteminde tam otomatik bir su temini sistemi kullanılarak deney için gerekli suyun sürekliliği sağlanmıştır. Daha önce yapılan araştırmalarda, şebeke suyundaki mikroorganizmaların varlığına bağlı olarak LFT esnasında biyolojik büyümenin meydana geldiği, bununda hidrolik iletkenlikleri azalttığı ve hatalı ölçümlere neden olduğu belirtilmiştir. Literatürde bu tıkanma biyolojik tıkanma olarak tanımlanmaktadır. Bu çalışmada, biyolojik tıkanmanın oluşmasını önlemek için şebeke suyu filtrelerden geçirilerek su deposuna gönderilmiştir. Ayrıca deney sistemine sürekli olarak su temin eden su deposuna yosun vb. biyolojik büyümenin önüne geçebilmek için düzenli aralıklar ile klor tabletleri eklenmiştir. Deneyler esnasında ve her deney sonrasında renk değişimi ile tıkandığı gözlemlenen filtreler değiştirilmiştir.

4.2.1 Geri kazanılmış asfalt-geotekstil sisteminin uzun süreli filtrasyon deneyleri

İnşaat/yıkım atığı türlerinden biri olan geri kazanılmış asfalt (RAP) agregasının drenaj sistemlerinde kullanılabilirliğinin değerlendirilmesi için geri kazanılmış asfalt agregası ve örgüsüz geotekstilin oluşturacağı drenaj sistemi modellenip laboratuvarda uzun süreli filtrasyon deneyleri (LFT) yapılmıştır. Laboratuvarda geliştirilmiş uzun süreli filtrasyon deney sistemi numune haznesine geotekstil ve RAP yerleştirilmiş,

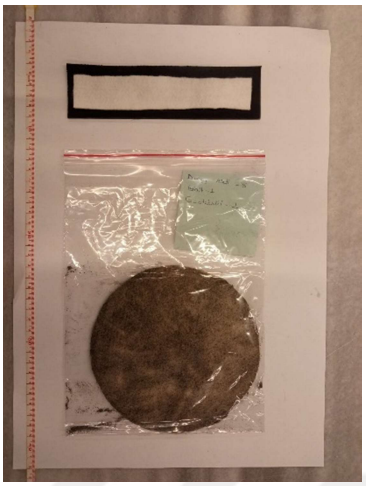
permeametre hücrelerinin ve manometrelerin bağlantısı yapıldıktan sonra, deney sisteminde doygunluk sağlanmış ve uzun süreli filtrasyon deneyleri gerçekleştirilmiştir. Zamana bağlı gözlem sonucu geri kazanılmış asfalt agregaları ihtiva ettikleri bitüm malzeme nedeni ile uzun vadede deney sistemindeki tüm borularda Şekil 4.14' de görüldüğü gibi renk değişimine neden olmuşlardır. Bu gözlem ile deney esnasında bitüm malzemenin çözülerek drenaj sistemindeki geotekstilden geçtiği düşünülmektedir. Ayrıca bu gözlem sonucu, zamanla sertleşen bitüm malzemenin geotekstili tıkayabileceğini de düşünmemize neden olmuştur.



Şekil 4.15 : Geri kazanılmış asfalt **(**RAP) numunesinin uzun süreli filtrasyon deneyi esnasında tesisatta ve su çıkış haznesinde gözlemlenen değişimler.

Deneysel çalışmada kullanılan RAP-geotekstil sisteminin, i= 0.33, 0.66, 1 ve 2.5 hidrolik eğimlerde, geliştirilmiş uzun süreli filtrasyon deneyi esnasında elde edilen veriler ile tıkanma parametreleri belirlenmiş ve değerlendirilmiştir. Deney sonrasında hücrelerdeki su drene edilmiş, agrega numunesi üzerinde elek analizi yapılmıştır. Ayrıca RAP-geotekstil drenaj sisteminde kullanılan örgüsüz geotekstil numunesi de mikrofotoğraflarının çekiminin yapılabilmesi için oda ısısında kurutulup Şekil

4.15’deki gibi ince kesit numunesi hazırlanması için dikkatli bir şekilde muhafaza edilmiştir.



Şekil 4.16 : Uzun süreli filtrasyon deneyine tabi tutulan Geri kazanılmış asfalt - geotekstil drenaj sistemindeki geotekstil numunenin deney sonrasındaki görünümü.

Geliştirilmiş uzun süreli filtrasyon deney sisteminde tekrardan deney yapılabilmesi için, deney sisteminin tüm parçaları (manometre boruları, su giriş ve çıkışını sağlayan tesisat parçaları, vb.) sökülmüş ve temizlenmiştir. Deney sisteminin temizlenmesi aşamasında da herhangi bir tortunun ve temizlik için kullanılan kimyasalın kalmaması için dikkat edilmiştir. Şekil 4.16’da görüldüğü gibi deney sisteminin temizlenen tüm parçalarının tekrardan montajı yapılmış ve su kaçağı olup olmadığı kontrol edilmiştir.



Şekil 4.17 : Uzun süreli filtrasyon deneyi sonrası sistemin temizlenmesi ve tekrardan montajı.

Geliştirilmiş uzun süreli filtrasyon sisteminde herhangi bir su kaçağı var ise problem olan kısımda sızdırmazlığı sağlamaya yönelik gerekli işlemler yapıldıktan sonra, sistemden su geçirilerek tekrardan kontrol edilmiş, sızdırma yok ise yeni deney kurulmuştur.

4.2.2 Geri kazanılmış beton-geotekstil sisteminin uzun süreli filtrasyon deneyleri

İnşaat/yıkım atığı türlerinden bir diğeri olan geri kazanılmış beton (RCA) agregasının drenaj sistemlerinde kullanılabilirliğinin değerlendirilmesi için geri kazanılmış beton agregası-geotekstil sisteminin uzun süreli filtrasyon deneyleri gerçekleştirilerek deney verileri değerlendirilip tıkanma parametrelerinin (GR ve KR) zamana bağlı değişimlerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu nedenle RCA ve geoetekstil numuneleri, permeametre numune hücresine yerleştirilmiş, doygunluk aşaması sağlandıktan sonra LFT yapılmıştır. Deney sürecinde LFT sisteminde çıkış borularında tıkanmaya neden olacak herhangi bir malzeme gözlemlenmemiştir. Şekil 4.17'de RCA-geotekstil drenaj sisteminin LFT deney görüntüsü verilmiştir.



Şekil 4.18 : Geri kazanılmış beton-geotekstil sistemi uzun süreli filtrasyon deneyi.

Temizlenip yeniden numune kurulumu yapılan uzun süreli filtrasyon deneyinde doygunluk aşamasında, permeametre haznelerinin (alt-orta-üst) bağlantı noktalarında su sızıntısı olmuştur. Su sızıntısını engellemek için numune hazırlanması ve kurulumu birkaç defa yapılmış, uzun süreli filtrasyon deneyi sistemde su sızıntısı tamamen kesilince yapılmıştır. RCA-geotekstil sisteminde gerçekleştirilen uzun süreli filtrasyon deneyleri i=0.33, 0.66 ve 1 hidrolik eğimlerinde gerçekleştirilmiştir. LFT sırasında i=1 hidrolik eğiminden i=2.5 hidrolik eğimine geçildiğinde deney sisteminde önlenemeyen ve kontrol edilemeyen sızıntılar olmuştur, bu sızıntıların deney

verilerinin güvenilirliğini olumsuz etkileyeceği nedeni ile deneye devam edilememiştir.

4.2.3 Çelik cürufu-geotekstil sisteminin uzun süreli filtrasyon deneyleri

Demir/çelik sektörünün katı atıklarından biri olan ve sürdürülebilirlik bakımından birçok kullanım alanına sahip olan çelik cürufu (SS) agregası ve örgüsüz geotekstilden teşkil edilecek olan drenaj sistemlerinin performansının laboratuvarda değerlendirilebilmesi için geliştirilmiş uzun süreli filtrasyon deneyleri gerçekleştirilerek deney verileri değerlendirilip tıkanma endekslerinin zamana ve hidrolik eğime bağlı değişimi incelenmiştir. Uzun süreli filtrasyon deneylerinde iki farklı tesisten elde edilen çelik cürufu (SS) kullanılmıştır.

SS ve geotekstil mazlemenin oluşturacağı drenaj sistemlerinin filtrasyon performansını incelemek için,numune hazırlanıp deney sistemine kurulumu yapıldıktan sonra, doygunluk sağlanmış ve uzun süreli filtrasyon deneyleri yapılmıştır. SS ve örgüsüz geotekstilden oluşan ve deneye tabi tutulan drenaj sisteminin su çıkış tesisatında ve çıkış rezervuarından zamana bağlı olarak artan bir kireçlenme gözlemlenmiştir. Deney sistemindeki çıkış boruları, deney esnasında periyodik olarak temizlenmiştir. Çelik cürufu (SS)-geotekstil sisteminde uzun süreli filtrasyon deneyi esnasında oluşan değişim Şekil 4.18'de görülmektedir.

Çelik cürufun ana bileşenlerinin CaO, Fe, SiO_2, MgO ve MnO olduğu, kalsiyum oksitin (CaO) %38-48 oranında bulunduğu göz önünde bulundurulduğunda, bu kireçlenmenin nedeninin SS malzemesinin kimyasal yapısındaki kalsiyum oksit (CaO, sönmemiş kireç) vb. elementlerin olduğu düşünülmektedir. Literatürde de yapılan önceki çalışmalarda bu durum bildirilmiştir.



Şekil 4.19 :Çelik cürufu – geotekstil sistemi uzun süreli filtrasyon deneyi.

Uzun süreli filtrasyon deneyi esnasında drene olan suyun sistemden çıkışına engel olmamak için deney sisteminin su çıkışı haznesine bağlı olan ve Şekil 4.19' da verilen hortumlar zaman zaman sökülerek kireç temizlenmiştir.



Şekil 4.20 : Çelik cürufu geomalzemesinin uzun süreli filtrasyon deneyi esnasında, deney sisteminin tesisatında biriken kireç.

Deneysel çalışmada kullanılan SS-geotekstil sistemlerinin, i= 0.33, 0.66, 1 ve 2.5 hidrolik eğimlerde geliştirilmiş uzun süreli filtrasyon deneyi esnasında elde edilen veriler ile tıkanma endeksleri belirlenmiş ve değerlendirilmiştir. Uzun süreli filtrasyon deneyi sonrasında permeabilite hücrelerindeki su drene edilmiş, deney sonrası SS agregası üzerinde uzun süreli filtrasyon deneyi esnasında gerçekleşen, dane hareketinin tespitini belirlemek için elek analizi yapılmıştır. Ayrıca SS-geotekstil drenaj sisteminde kullanılan örgüsüz geotekstil numunesi de mikrofotoğraflarının çekiminin yapılabilmesi için oda ısısında kurutulup muhafaza edilmiştir. Şekil 4.20'de SS1 ve SS2 agrelarında kullanılan geotekstil malzemenin deney sonrası görüntüsü verilmiştir.



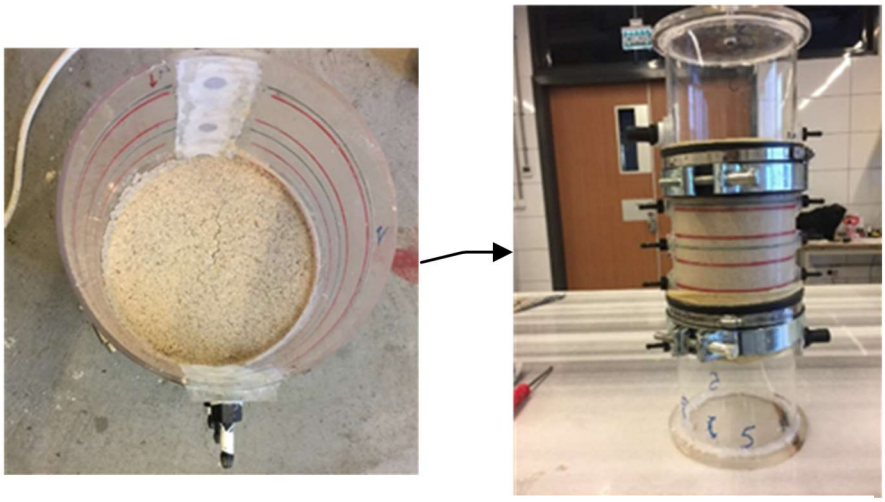
Şekil 4.21 : Çelik cürufu-geotekstil drenaj sistemin de uzun süreli filtrasyon deneylerinde kullanılan geotekstil malzemenin deney sonrasındaki görünümü.

Ayrıca, uzun süreli filtrasyon deney sistemi permeametresinin alt haznesinde biriken çelik cüruflarının miktarının belirlenmesi için alt haznede biriken çelik cürufu kurutularak ağırlığı belirlenmiştir.

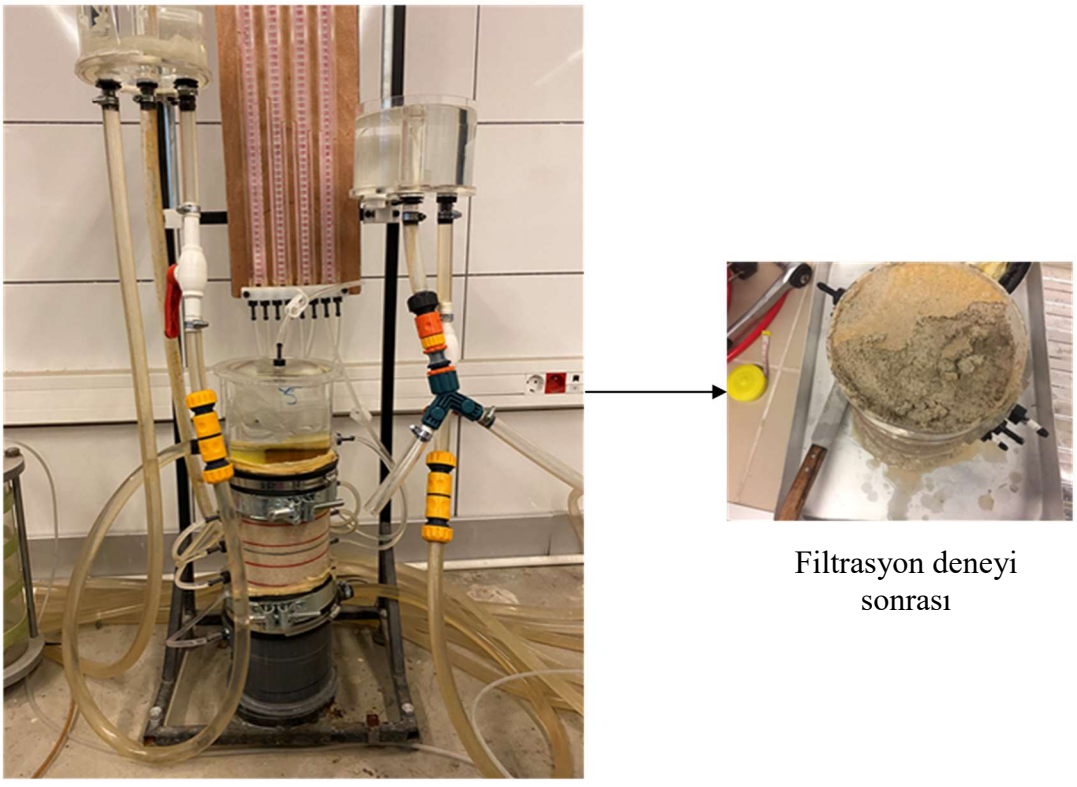
4.2.4 Doğal agrega- geotekstil sisteminin uzun süreli filtrasyon deneyleri

Bu çalışmada kullanılan farklı endüstriyel atık malzemelerin filtrasyon performanslarını karşılaştırabilmek için halihazırda drenaj sistemlerinde kullanılan iki farklı doğal agrega üzerinde de geliştirilmiş uzun süreli filtrasyon deneyleri (LFT) yapılmıştır. Doğal agregaların (NA), uzun süreli filtrasyon deneyleri esnasında herhangi bir sızıntı yaşanmamış, zamana bağlı olarak sistem tesisatında herhangi bir tıkanma veya değişim gözlemlenmemiştir.

NA numunelerinin filtrasyon deney numunesini hazırlanması ve deney esnasına ait fotoğraflar Şekil 4.21'de verilmiştir.



Doğal agrega numunesinin filtrasyon deneyi için hazırlanması



Filtrasyon deneyi aşaması

Filtrasyon deneyi sonrası

Şekil 4.22 : Doğal agrega-geotekstil drenaj sisteminin uzun süreli filtrasyon deneyi aşamaları.

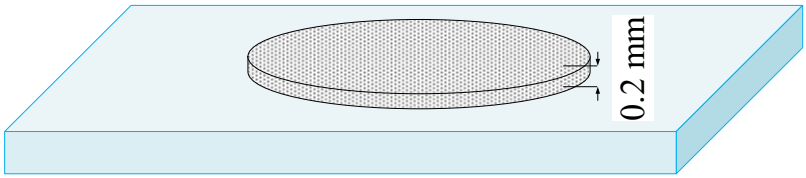
4.3 Optik Görüntüleme

Uzun süreli filtrasyon deneyleri sonrasında, kullanılan polipropilen malzemeden üretilmiş örgüsüz geotekstiller oda ısısında kurutulmuştur (Şekil 4.22). 3 cm çapında, dairesel ince kesit numuneleri hazırlanan geotekstillerin mikrofotoğrafları çekilerek yaşanan tıkanmanın görsel olarak belirlenmesi amaçlanmıştır.



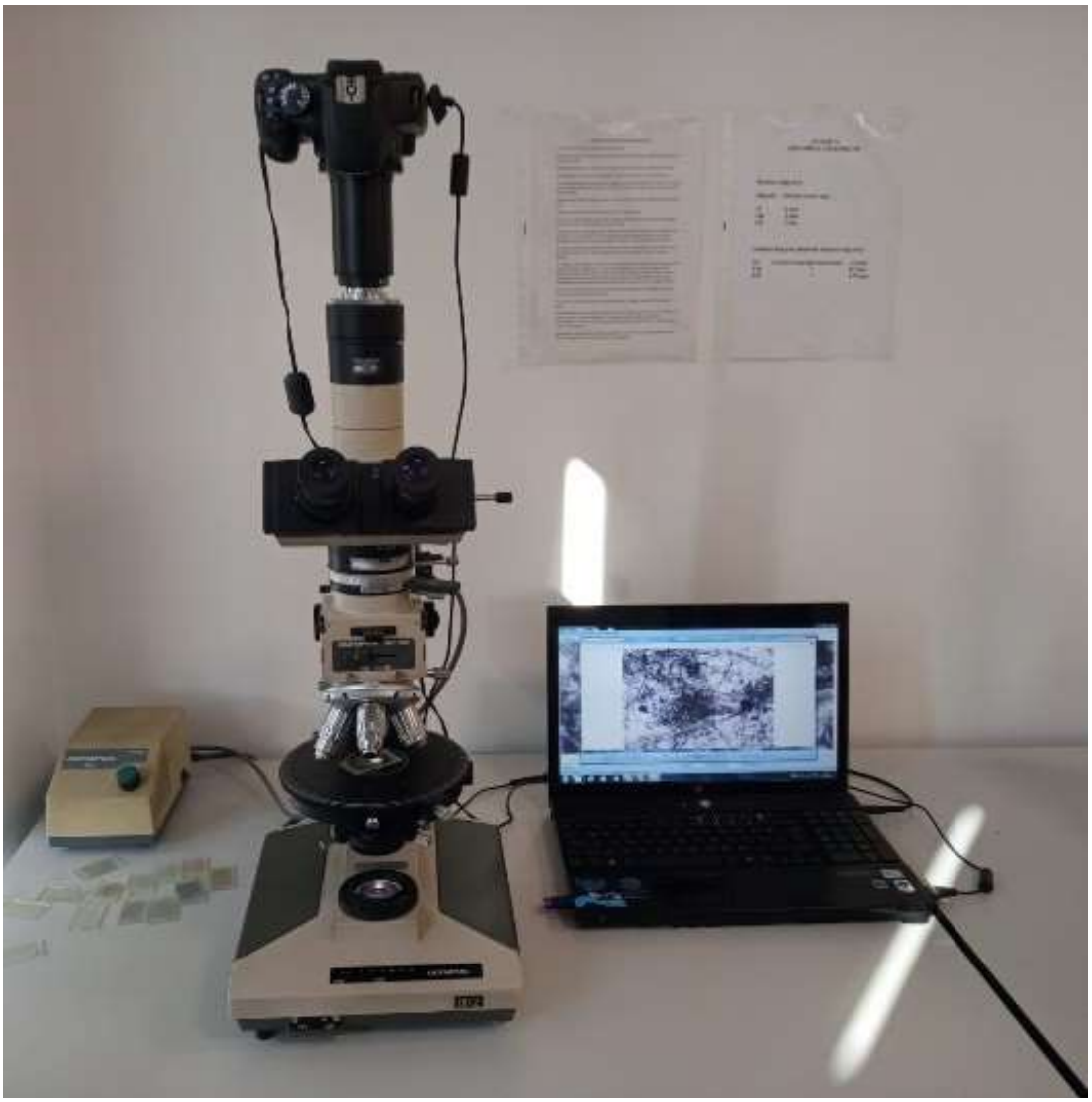
Şekil 4.23 : Uzun süreli filtrasyon deneyi sonrası oda ısısında kurutulmuş geotekstil numuneler.

İnce kesit numunesi hazırlanan ve cam lama yapıştırılan 200 µm (0.2 mm) kalınlığındaki geotekstillerin şematik şekli Şekil 4.23'te verilmiştir. (Şekil 4.23) üzerinde optik görüntüleme yapılmıştır. İnce kesit numuneleri geotekstilin farklı bölgelerinden alınan numuneler üzerinde hazırlanmıştır.



Şekil 4.23 : Geotekstil malzemelerden ince kesit numunesi hazırlanmasının şematik görünümü.

Polipropilen malzemeden üretilmiş geotekstillerin, ince kesit numune hazırlanması esnasında, üretimde kullanılan malzemenin sünekliği nedeni ile çok zorlanılmıştır. İnce kesit numunesi hazırlanan örgüsüz geotekstillerin gözenek yapısı görüntüleri optik bir ışık mikroskobu olan ve Şekil 4.24'te verilen Olympus araştırma mikroskopu kullanılarak alınmıştır.



Şekil 4.24: Optik görüntülemede kullanılan Olympus araştırma mikroskopu.

Deneylerde kullanılan geotekstil numunelerden ince kesit numunesi hazırlanırken, incelenecek parçaların tüm özelliklerini yansıtması göz önünde bulundurularak, geotekstil numunelerin orta ve kenar kısımlarından kesit hazırlanmıştır. Geotekstil malzemenin üretiminin yapıldığı polipropilen malzeme nedeni ile ince kesit numune hazırlama çok hassas bir şekilde yapılmış ve optik görüntüleme için gerekli özelliklere sahip numune elde edilene kadar ince kesit numunesi hazırlama işlemi tekrarlanmıştır.

5. DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Farklı endüstriyel atık malzemelerin uzun süreli filtrayon davranışının incelendiği bu çalışmada filtrasyon veya tıkanma parametreleri olarak tanımlanan hidrolik eğim oranı (GR) ve geçirimlilik oranı (KR) değerlerinin, kullanılan geri kazanılmış malzemelerin tipine ve hidrolik eğime bağlı olduğu belirlenmiştir. Daha önceki çalışmalarda kullanılan hidrolik eğim değerleri genellikle 1 ile 7.5 arasında değişen değerlerdir. Bu çalışmada ise yol altı drenaj yapılarında uygulamada karşılaşması muhtemel, daha gerçeğe yakın hidrolik eğimler tercih edilmiştir. Karayolları Teknik Şartnamesi (KTŞ) yapım şartları bölümünde karayollarında dolgu taban zemini, bitkisel zemin sıyırması yapıldıktan sonra enine su deşarjına izin verecek şekilde minimum %3 çatı eğiminde hazırlanması gerektiği belirtilmektedir. Bu kapsamda hidrolik eğim değerleri i=0.33, 0.66, 1 ve 2.5 olarak seçilmiş ve pratik açıdan eski çalışmalara kıyasla uygulamada kullanılabilir, daha gerçekci sonuçlar elde edilmiştir.

Laboratuvarda farklı agrega türleri üzerinde (demir/çelik endüstrisi atığı, inşaat/yıkım atıkları ve doğal agrega), farklı hidrolik eğimlerde, ASTM D5101 standartında tanımlanan deney sistemi geliştirilerek yeniden tasarlanmış ve imalatı yaptırılmıştır. İmalatı yaptırılan deney sisteminin kurulumu yapıldıktan sonra uzun süreli filtrasyon deneyleri gerçekleştirilmiştir. Geliştirilmiş deney sisteminde yapılan uzun süreli filtrasyon deneyi sonuçlarının analizi için standartta belirtilen hidrolik eğim oranı (GR) ve geçirimlilik oranı (KR) kullanılmıştır. Modifiye deney sisteminde daha hassas ölçümler yapılabilmesi için numune boyutu ve manometre sayıları artırılmış farklı seviyelerdeki manometre okumaları göz önünde bulundurularak hesaplanan GR oranları karşılaştırılmıştır.

ASTM D5101'de tanımlanan uzun süreli filtrasyon deneyi sonuçu elde edilen veriler değerlendirildiğinde, agrega/geotekstil sisteminde herhangi bir akış kısıtlanması yaşanmıyor ve geotekstilde herhangi bir tıkanma oluşmadı ise GR= 1 olmalıdır. Tıkanmaya başlamış bir geotekstil veya herhangi bir akış kısıtlaması yaşıyan agrega – geotekstil sistemi için, hidrolik eğim oranının, GR> 1 olması beklenmektedir. GR> 1 olması durumu, fiziksel olarak partiküllerin hareket ettiğini ve GR değeri arttıkça

tıkanma derecesinin ve akış kısıtlamasının arttığını göstermektedir. GR<1 ise agrega - geotekstil sisteminde borulanma meydana geldiği, yani ince danelerin geotekstilden geçtiği düşünülmektedir. Filtrasyon parametreleri değerleri, uygulanan hidrolik eğim ile değişmektedir. Agrega – geotekstil sisteminin tıkanma performansının doğru değerlendirilebilmesi için GR ve KR değerlerinin birlikte kullanılması gerekmektedir. Bu yoruma dayanarak, mevcut çalışmada deneye tabii tutulan hemen hemen tüm örneklerde parçacık hareketi yaşanmış ve akışta azalma gerçekleşmiştir. Bu durum geotekstilde fiziksel tıkanmanın yaşandığını göstermektedir. Bazı numunelerde, hidrolik eğimin artması ile borulanmanın gerçekleştiği de tespit edilmiştir. Ayrıca parçacık hareketinin gerçekleştiğinin tespiti için, deney öncesi ve sonrası numunelerin elek analizi sonucu elde edilen dane çapı dağılı eğrileri karşılaştırılmıştır. Deneye tabii tutulan agrega – geotekstil sistemlerinde, deney sonrası geotekstilden geçip alt haznede biriken ince malzeme miktarının, geri kazanılmış asfalt hariç diğer numunelerde ihmal edilebilecek seviyede olduğu tespit edilmiştir.

ASTM D5101 standartında tanımlanan ve literatürdeki çalışmalarda kullanılan uzun süreli filtrasyon deney sistemine kıyasla, bu çalışmada kullanılan deney sisteminde 150 mm × 150 mm ebatlarında silindirik numuneler kullanılmış, daha hassas ölçüm alabilmek için 0-25 mm, 25-75 mm ve 75-125 mm yüksekliklere yerleştirilmiş manometrelerdeki okumalar dikkate alınarak hidrolik eğim oranı (GR) değerleri hesaplanmıştır. Farklı yüksekliklerdeki manometre değerleri ile hesaplanan hidrolik eğim oranları karşılaştırıldığında, geotekstilden uzaklaştıkça tıkanmanın azaldığı tespit edilmiştir ($GR_1 > GR_3 > GR_2$). Agrega – geotekstilden oluşan drenaj sisteminin performansını olumsuz etkileyecek, tıkanmanın üst sınır değeri olarak hidrolik eğim oranının 3 olduğu değer kabul edilmiştir.

Önceki çalışmalarda düşük hidrolik eğim altında deneyler gerçekleştirilmediği için bu çalışmada deney sistemiminin geliştirilmesi, yol tasarımında daha gerçekci yaklaşımı yansıtması açısından i=0.33, i=0.66 hidrolik eğimleri altında uzun süreli filtrasyon deneyinin yapılması çalışmayı diğer benzer çalışmalardan ayırarak özgünlük kazandırmıştır.

Bu bölümde, laboratuvar deneyleri kapsamında numuneler üzerinde gerçekleştirilen uzun süreli filtrasyon deneyi verileri ve ince kesitleri hazırlanan geotekstil numunelerin optik görüntüleri değerlendirilmiş ve sunulmuştur.

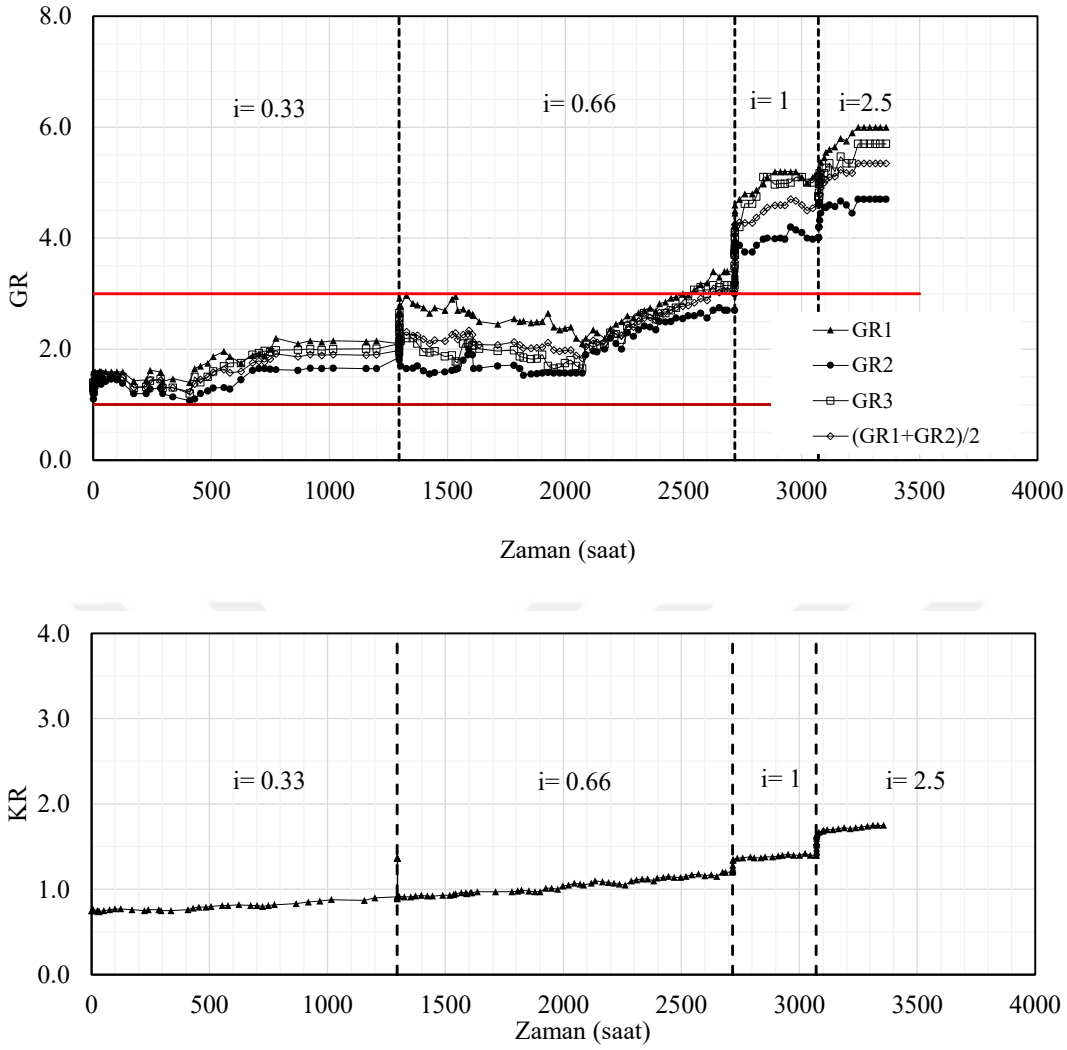
5.1 Uzun Süreli Filtrasyon Deney Sonuçları

Dört farklı atık agrega ve örgüsüz geotekstilden oluşan drenaj sistemlerinin filtrasyon performansı laboratuvarda uzun süreli filtrasyon deneyleri (LFT) ile değerlendirilmiştir. Ayrıca deney sonuçlarının doğru yorumlanabilmesi ve karşılaştırma yapabilmek için atık agregalar ile aynı dane çapı dağılımına sahip olan iki farklı doğal agrega ve geotekstil sistemi üzerinde de LFT gerçekleştirilmiştir.
Aşağıda, deneysel çalışmada kullanılan tüm agrega türlerine ait geliştirilmiş uzun süreli filtrasyon deneyi verileri değerlendirilerek elde edilen filtrasyon parametreleri verilmiştir.

5.1.1 Geri kazanılmış asfalt - geotekstil sisteminin uzun süreli filtrasyon deney sonuçları

İnşaat mühendisliği uygulamalarından biri olan yol yapımının farklı katmanlarında, kullanım potansiyeline sahip olan, geri kazanılmış asfalt (RAP) agregasının drenaj sistemlerinde kullanılabilirliğinin değerlendirilmesi için RAP-geotekstil model drenaj sisteminin uzun süreli filtrasyon deneyi ile elde edilen veriler değerlendirilip filtrasyon (tıkanma) parametrelerinin zamana bağlı değişimleri belirlenmiştir. RAP-geotekstil drenaj sisteminin hidrolik eğim oranındaki ve geçirimlilik oranındaki zamana bağlı değişim Şekil 5.1'de verilmiştir.

Şekil 5.1'den, geliştirilmiş uzun süreli filtrasyon deney sistemi ile yapılan deneyler ile elde edilen veriler değerlendirildiğinde RAP numunelerinde hidrolik eğim arttıkça hidrolik eğim oranı ve geçirimlilik oranının arttığı görülmektedir. Zamana bağlı GR ve KR değişimi grafiklerinden RAP-agrega drenaj sisteminde ince daneli malzemelerin hareketinden dolayı tıkanmanın (GR>3) yaşandığı anlaşılabilir. Bu, agreganın üst kısmında (geotekstilin 25 mm ila 150 mm yukarısındaki) önemli miktarda agrega danesinin göçünün veya bitümlü mazemenin hareketini göstermektedir. Hidrolik eğim oranının (GR) zamana ve hidrolik eğime bağlı değişim grafiği incelendiğinde geotekstilden uzaklaştıkca değerin azaldığı yorumu yapılabilir. Ayrıca hidrolik eğim oranı (GR)-zaman grafiğine benzer şekilde geçirimlilik oranı (KR)-zaman grafiğinde de, zamana bağlı artış olduğu görülmektedir.



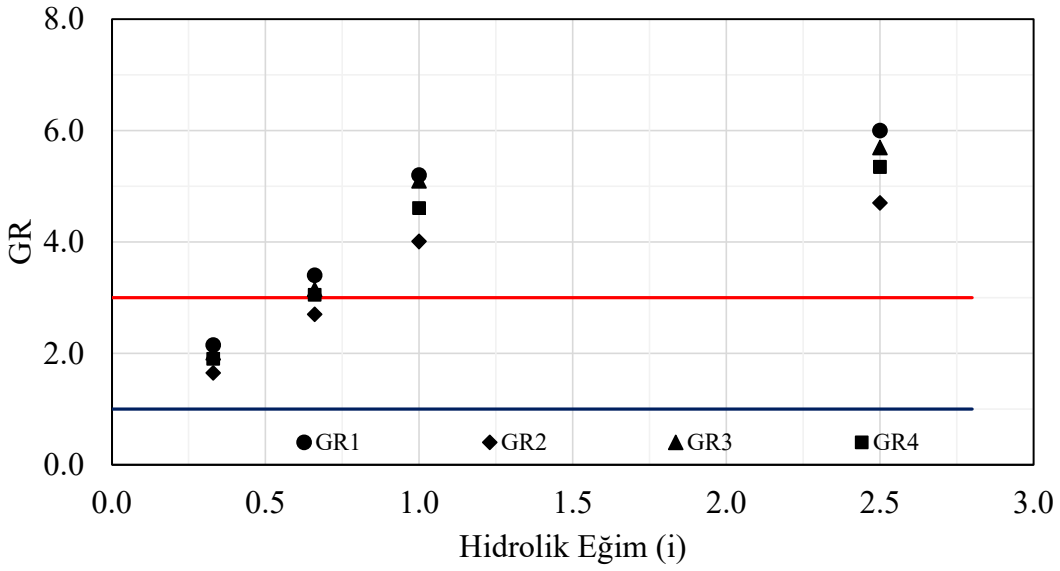
Şekil 5.1 : RAP malzemesi için GR ve KR parametrelerinin zamana bağlı değişim grafikleri.

Geri kazanılmış asfalt (RAP)-geotekstil sistemi üzerinde yapılan zuun süreli filtrasyon deneylerinde farklı hidrolik eğimlerde elde edilen stabile hidrolik eğim oranı (GR) ve geçirimlilik oranı (KR) değerleri Çizelge 5.1'de verilmiştir. Çizelge 5.1'deki veriler gözden geçirildiğinde geri kazanılmış asfalt–geotekstil sisteminin tüm hidrolik eğimlerde farklı manometre seviyelerindeki değerler dikkate alınarak hesaplanan hidrolik eğim değerleri birden büyük olduğu için (GR> 1) tıkandığı, GR>3 olduğunda ise performansında ciddi azalma yaşadığı düşünülebilir.

Çizelge 5.1: RAP malzemesinin uzun düreli filtrasyon deneylerinden elde edilen hidrolik eğim oranı (GR) değerleri.

Malzeme	Hidrolik eğim, i	GR1	GR2	GR3	GR4=(GR1+GR2)/2
RAP	0.33	2.15	1.65	2.01	1.90
	0.66	3.40	2.70	3.15	3.05
	1.00	5.20	4.01	5.10	4.61
	2.50	6.00	4.70	5.70	5.35

Farklı manometre seviyelerindeki su basıncı değerleri dikkate alınarak hesaplanan GR değerlerinin uygulanan hidrolik eğim ile değişimine ait Şekil 5.2'deki grafik incelendiğinde geotekstilden uzaklaştıkça hidrolik eğim oranının azaldığı görülmektedir. Bunun nedeninin suyun hareketi ile göç eden ince danelerin geotekstile yakın bölgede birikmesi olarak düşünülmektedir.



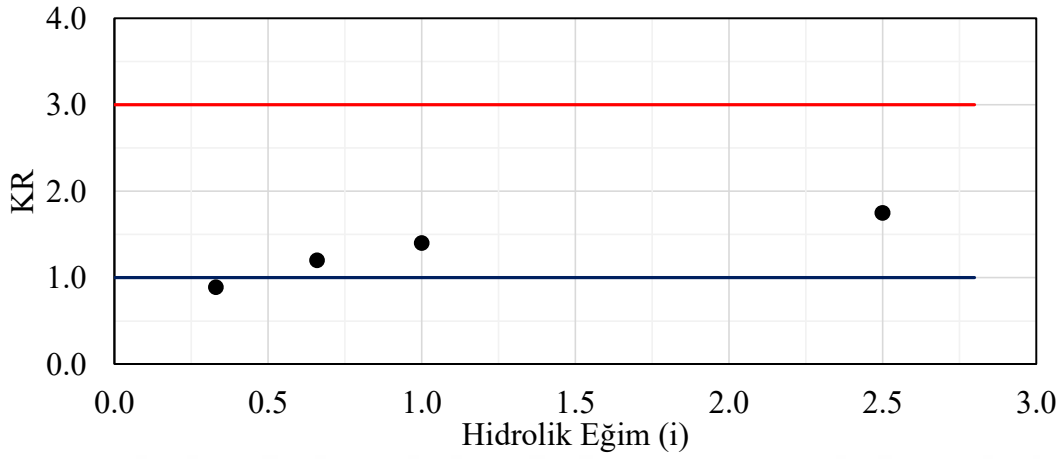
Şekil 5.2 : RAP malzemesi LFT deney verileri ile elde edilen GR1, GR2, GR3 ve GR4 değerlerinin hidrolik eğim ile değişimi.

Çizelge 5.2'deki farklı hidrolik eğimlerdeki stabil geçirimlilik oranı (KR) değerleri incelendiğinde GR ile uyumlu olarak hidrolik eğimin artması ile geçirimlilik oranının da arttığı görülmektedir.

Çizelge 5. 2: RAP malzemesinin uzun süreli filtrasyon deneylerinden elde edilen geçirimlilik oranı (KR) değerleri.

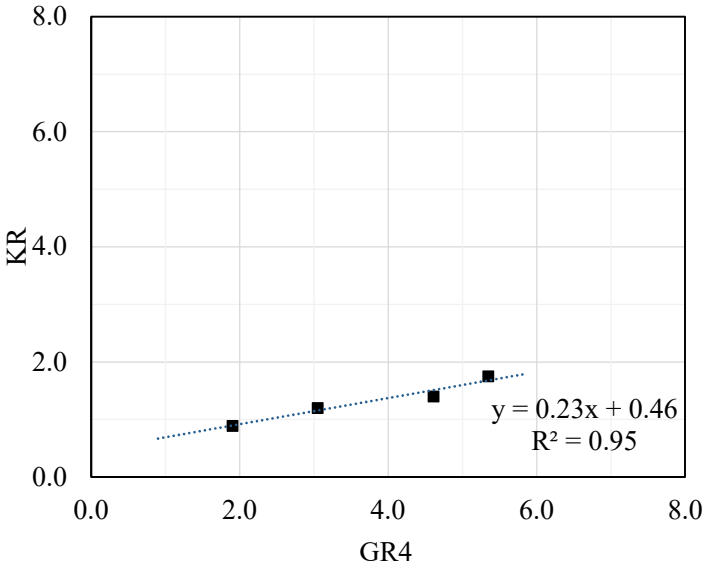
Malzeme	Hidrolik eğim, i	k_{agrega} (cm/s)@20°C	k_{sistem} (cm/s)@20°C	KR	GR4
RAP	0.33	0.0018	0.0020	0.89	1.90
	0.66	0.0011	0.0009	1.20	3.05
	1	0.0036	0.0025	1.40	4.61
	2.5	0.0042	0.0024	1.75	5.35

Ek olarak, agrega – geotekstil temas bölgesinde ince danelerin birikmesi ve RAP bünyesindeki bitüm malzemenin hareketi nedeni ile (geotekstilin 0 ila 25 mm üzerinde) çok düşük geçirgenliğe sahip olması ve geçirimlilik oranında önemli artış yaşanması beklenmektedir. Bu nedenle, RAP-geotekstil sisteminde körlük veya tıkanma oluşacaktır. Geçirimlilik oranının LFT esnasında uygulanan hidrolik eğim ile değişiminin verildiği Şekil 5.3 incelendiğinde zaman ilerledikce ve uygulanan hidrolik eğim arttıkça tıkanma parametrelerinden biri olan KR değerininde arttığı görülmektedir. RAP malzemesinin fiziksel ve kimyasal yapısı nedeni ile böyle bir davranış göstermesinin normal olduğu düşünülmektedir.



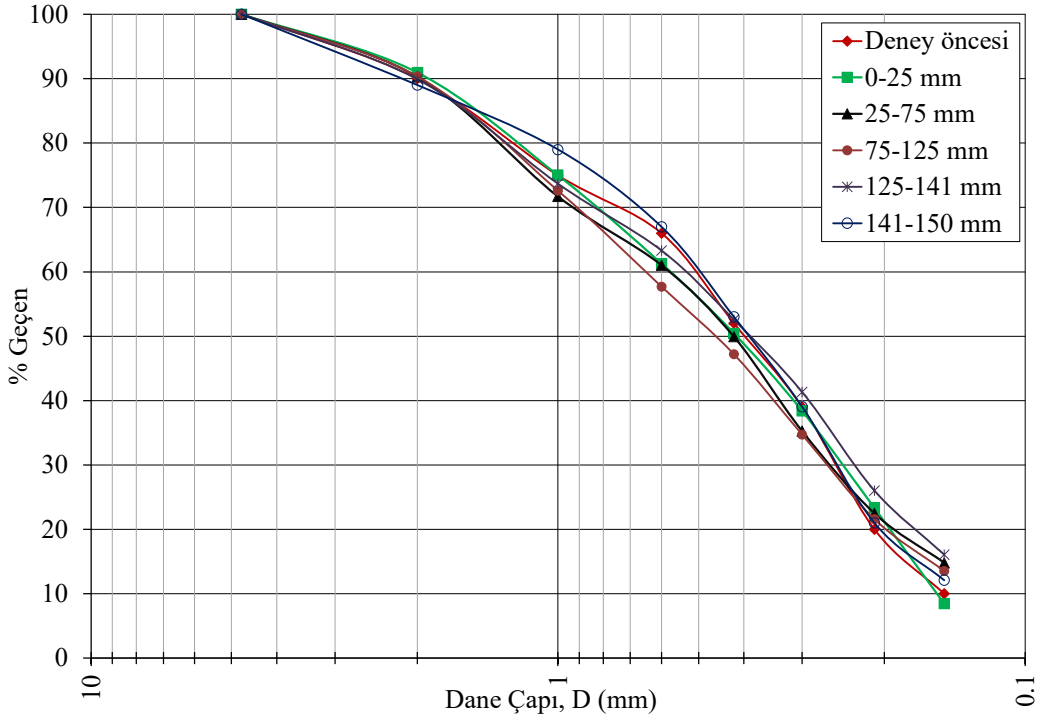
Şekil 5.3 : RAP malzemesinin LFT deney verileri ile elde edilen KR değerlerinin hidrolik eğim ile değişimi.

Bu çalışmada kullanılan geri kazanılmış asfalt malzemesi için hesaplanan KR değerlerinin GR değerlerine göre değişimi grafikte gösterildiğinde (Şekil 5.4), verilere uyan doğrusal regresyon çizgisinin 0.23'lük bir eğime sahip olduğu görülebilir (yani KR / GR ≈ ¼). Bu, GR'nin KR'ye eşit olmadığı ve (h25 – h0) / (h100 – h0) yaklaşık 1 olduğu anlamına gelir. Bunun nedeni, geotekstile yakın bölgede ince malzemelerin birikmesi ve geotekstilin tıkanması olabilir.



Şekil 5. 4 : RAP malzemesi LFT deney verileri ile elde edilen KR ve GR değerlerinin değişimi.

Uzun süreli filtrasyon deneyi süresince tıkanma potansiyelini değerlendirmek için, filtrasyon sonrası deney numunelerinin dane boyutu dağılımındaki değişiklikler analiz edilmiştir. Geri kazanılmış asfalt agregasının farklı yüksekliklerdeki deney sonu granülometre eğrileri Şekil 5.5'te verilmiştir. 141-150 mm mesafedeki agregalar geotekstilin hemen üstündeki kısımdır.

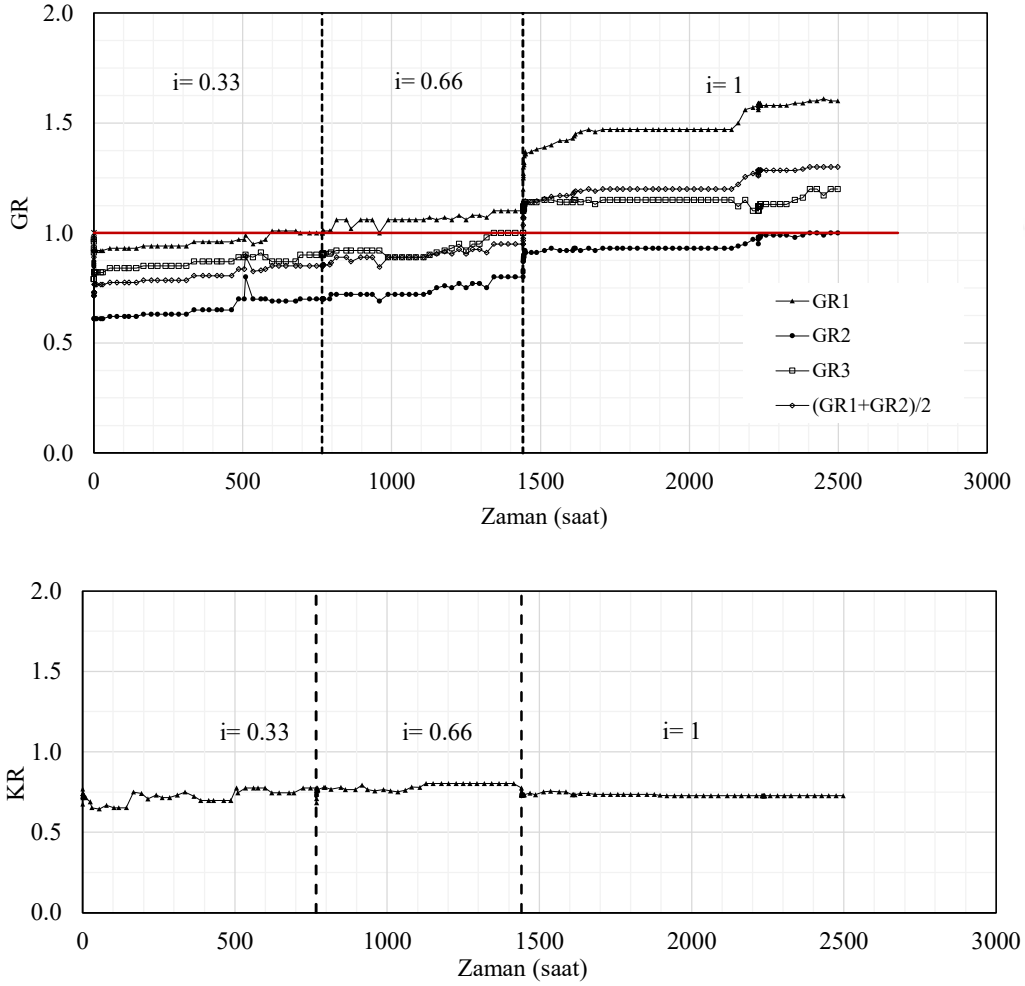


Şekil 5.5 : RAP malzemesinin uzun süreli filtrasyon deneyi sonrası dane çapı dağılımı.

Şekil 5.5'teki grafikten anlaşılacağı üzere su akış yönüne doğru parçacık hareketi olmuş geotekstile yakın bölgede ince dane oranında artış meydana gelmiştir. Bu da GR değerinin geotekstile yakın bölgelerde yüksek çıkmasının bir kanıtıdır.

5.1.2 Geri kazanılmış beton- geotekstil sisteminin uzun süreli filtrasyon deney sonuçları

Geri kazanılmış beton–geotekstil drenaj sisteminin uzun süreli filtrasyon deney verileri değerlendirilerek elde edilen GR ve KR değerlerinin zamana bağlı değişim grafiği Şekil 5.6'da görülmektedir. Geliştirilmiş uzun süreli filtrasyon deneyi verilerine göre, GR>1 partiküllerin hareketini temsil ettiğini ve GR değeri arttıkça tıkanma derecesinin ve akış kısıtlamasının arttığı, fakat agrega-geotekstil sisteminin GR<3 olduğu için çalışmaya devam ettiği göz önünde bulundurulursa, RCA–geotekstil sisteminde önemli bir tıkanma derecesi oluşmadığı düşünülebilir.



Şekil 5.6 : RCA malzemesi için GR ve KR'nin zamana bağlı değişim grafikleri.

Şekil 5.6'da i= 0.33 ve i= 0.66 hidrolik eğimlerinde GR< 1 olduğu için sistemde borulanma meydana geldiği söylenebilir. i= 1 hidrolik eğiminde, hidrolik eğim oranının 1 <GR< 3 değerleri arasında olması nedeni ile geotekstilde kısmi tıkanma yaşandığını, fakat performansında ciddi bir düşüş olmadığı söylenebilir.

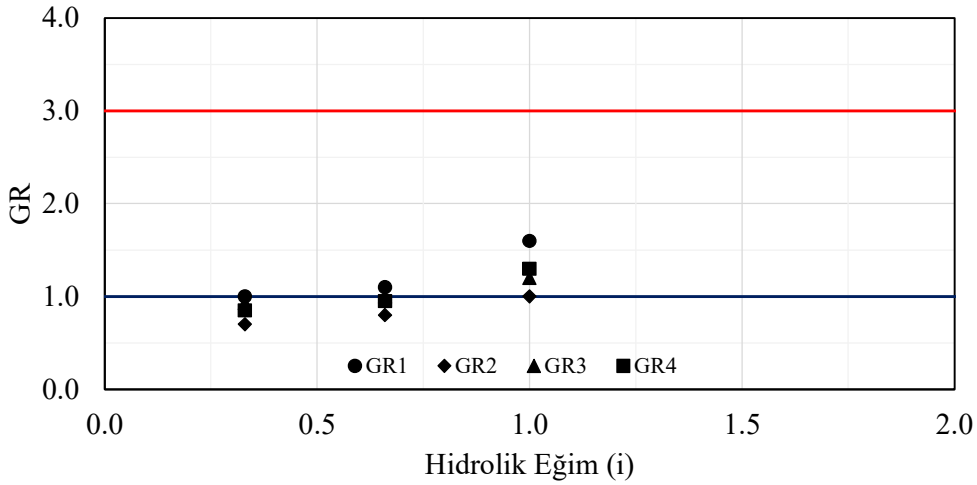
Geri kazanılmış beton-geotekstil sistemine ait farklı hidrolik eğimlerdeki stabil GR ve KR değerleri çizelge 5.3'te verilmiştir. Çizelge 5.3'deki veriler gözden geçirildiğinde geri kazanılmış beton – geotekstil sisteminde geotekstilden uzaklaştıkça i=0.33 ve i=0.66 hidrolik eğimlerde GR< 1 olduğu için sistemde kısmi borulanma olduğu düşünülebilir. Uzun süreli filtrasyon deney verilerinde i=1 hidrolik eğiminde 1 <GR< 3 değerleri arasındadır.

Geri kazanılmış beton – geotekstil sisteminde GR değerlerinin yaklaşık olarak 1 değerinde olduğu için sistemde tıkanma yaşanmadığı ve fitrasyon bakımından iyi bir performans gösterdiği söylenebilir.

Çizelge 5.3: RCA malzemesi uzun süreli filtrasyon deneylerinden elde edilen hidrolik eğim oranı (GR) değerleri.

Malzeme	Hidrolik eğim, i	GR1	GR2	GR3	GR4=(GR1+GR2)/2
RCA	0.33	1.00	0.70	0.93	0.85
	0.66	1.10	0.80	1.00	0.95
	1	1.60	1.00	1.20	1.3

Şekil 5.7'de farklı seviyelerdeki manometrelerdeki değerler dikkate alınarak hesaplanan GR değerlerinin uygulanan hidrolik eğim ile değişimi grafiği incelendiğinde RCA-geotekstil numunesi için GR değerlerinin 0.7 ile 1.60 arasında değiştiği, 1 bantına çok yakın olduğu görülmektedir. Bu da, araştırmada kullanılan RCA-geotekstil drenaj sisteminin akış kapasitesinin pratikte değişmeden kaldığını göstermektedir.



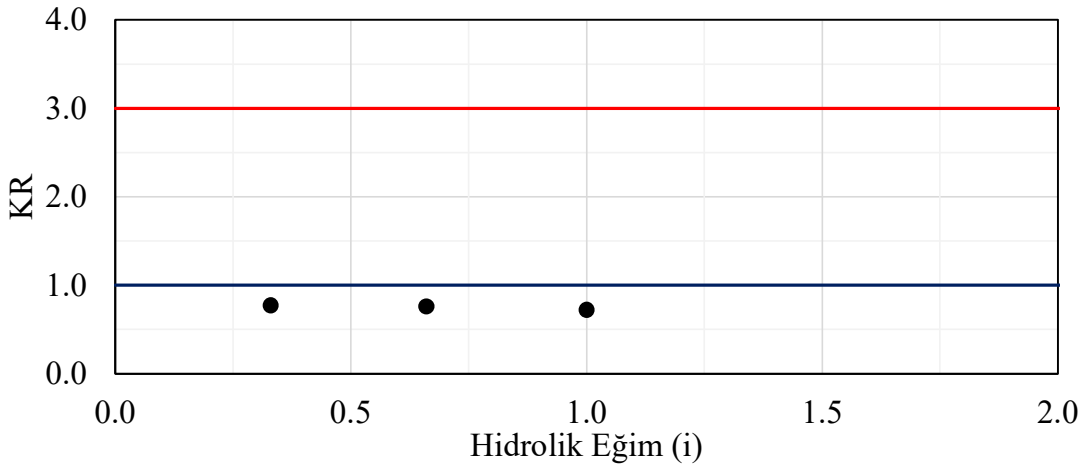
Şekil 5.7 : RCA malzemesi LFT deney verileri ile elde edilen GR1, GR2, GR3 ve GR4 değerlerinin hidrolik eğim ile değişimi.

RCA-geotekstil drenaj sisteminin filtrasyon davranışını belirlemek için dikkate alınması gereken bir diğer parametre olan KR nin çizelge 5.4'te verilen farklı hidrolik eğimlerdeki değerleri incelendiğinde KR parametresinin tüm hidrolik eğimlerde birden küçük olduğu görülmektedir.

Çizelge 5.4: RCA malzemesi uzun süreli filtrasyon deneylerinden elde edilen geçirimlilik oranı (KR) değerleri.

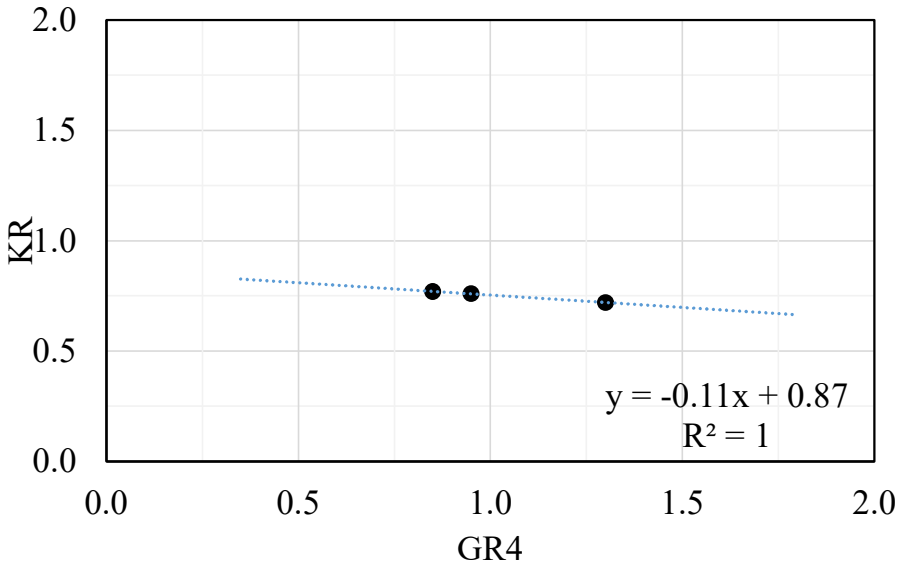
Malzeme	Hidrolik eğim, i	k_{agrega} (cm/s)@20°C	k_{sistem} (cm/s)@20°C	KR	GR4
RCA	0.33	0.0015	0.0019	0.77	0.85
	0.66	0.0014	0.0018	0.76	0.95
	1	0.0012	0.0017	0.72	1.3

Şekil 5.8'de verilen grafikten de KR parametresinin deneye tabi tutulan RCA-geotekstil drenaj sisteminde 1 bantının altında olduğu bu da sistemde tıkanma olmadığını borulanma yaşandığını göstermektedir.



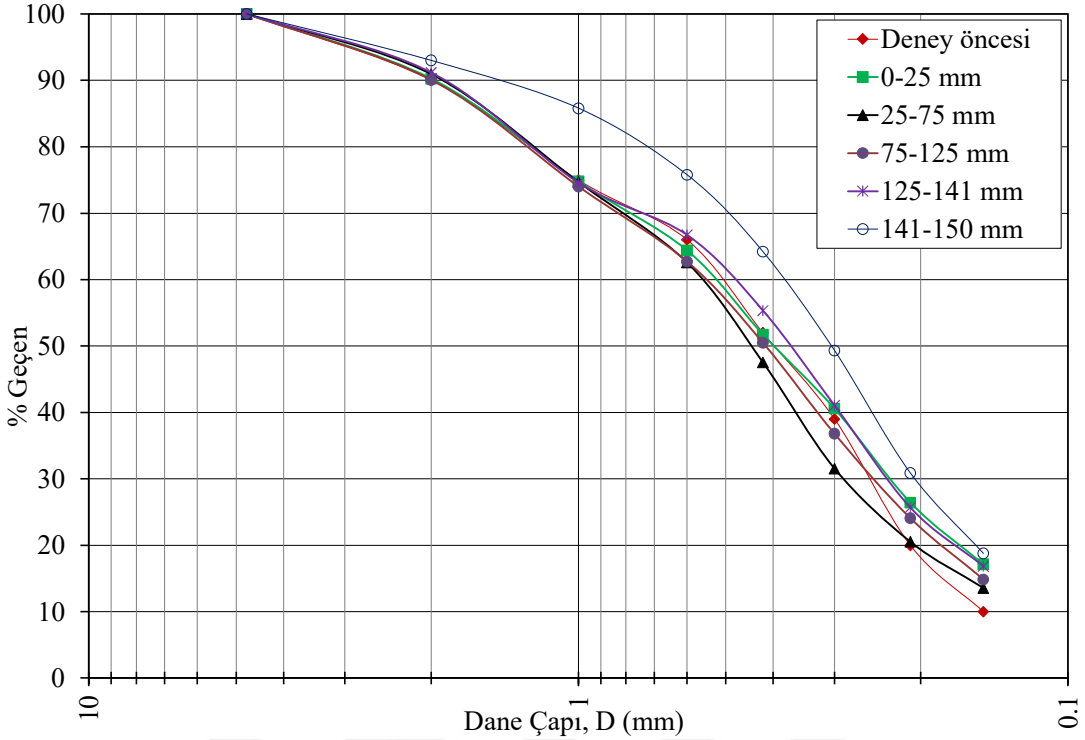
Şekil 5.8 : RCA malzemesi LFT deney verileri ile elde edilen KR değerlerinin hidrolik eğim ile değişimi.

Bu çalışmada kullanılan geri kazanılmış beton malzemesi için hesaplanan KR değerlerinin GR değerlerine göre değişimi grafikte gösterildiğinde (Şekil 5.9), verilere uyan doğrusal regresyon çizgisinin -0.11'lik bir eğime sahip olduğu görülebilir.



Şekil 5.9 : RCA malzemesi LFT deney verileri ile elde edilen KR ve GR değerlerinin değişimi.

Uzun süreli filtrasyon deneyi süresince tıkanma potansiyelini değerlendirmek için, filtrasyon sonrası deneye tabi tutulan RCA numunesinin farklı seviyelerdeki dane çapı dağılım eğirisini elde edebilmek için elek analizi yapılmış, granülometre eğrileri Şekil 5.10'da verilmiştir.

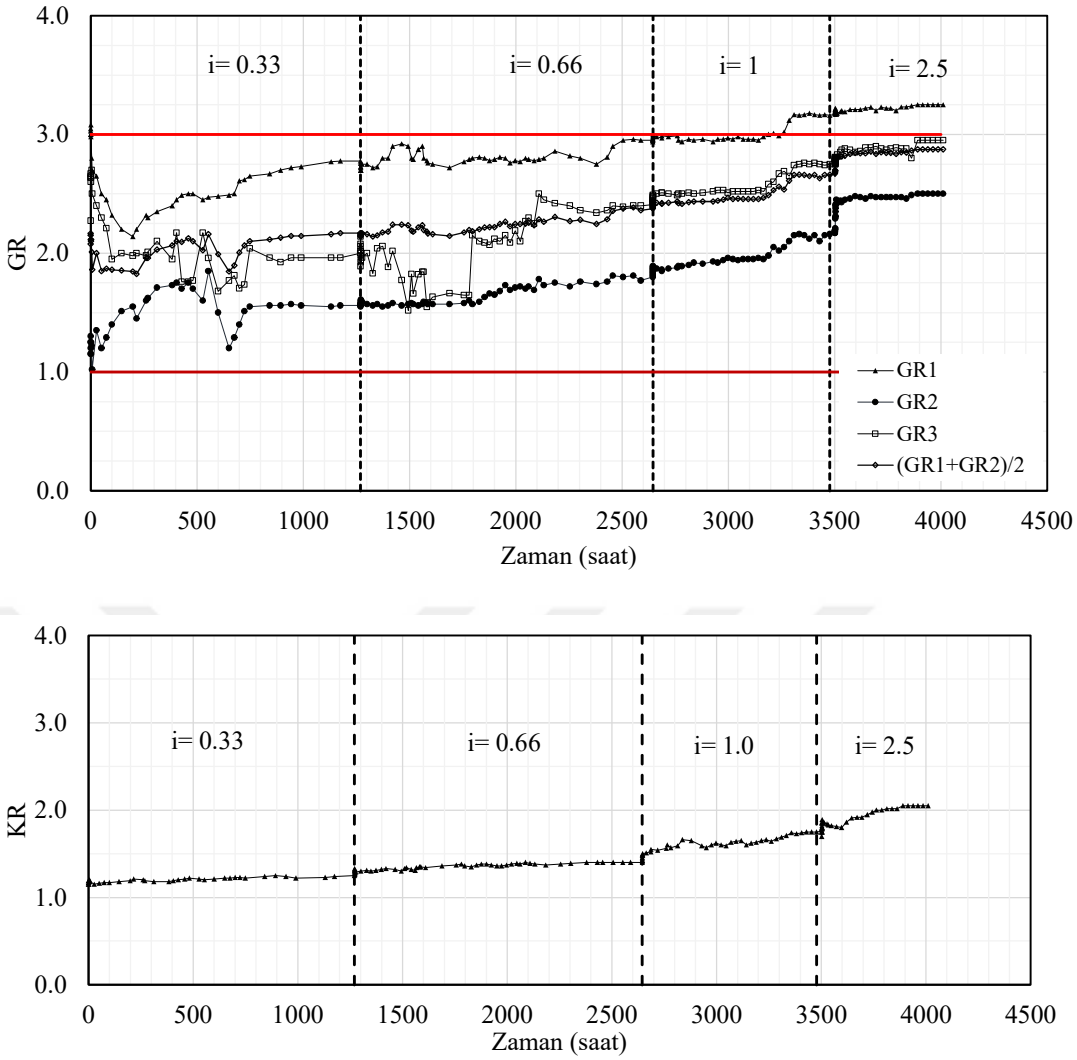


Şekil 5.10 : RCA malzemesinin uzun süreli filtrasyon deneyi sonrası dane çapı dağılımı.

Şekil 5.10'da görüldüğü gibi geotekstilin hemen üstündeki bölge olan 141-150 mm yüksekliğindeki numune kısmında, ince dane miktarında artış yaşanmıştır.

5.1.3 Çelik Cürufu - Geotekstil Sisteminin Uzun Süreli Filtrasyon Deney Sonuçları

Endüstriyel atık türlerinden biri olan çelik cürufunun (SS) yol altı drenaj sistemlerinde kullanılabilirliğinin değerlendirilmesi için iki farklı tesisten çelik cürufu temin edilmiş, çelik cürufu – geotekstil sisteminin uzun süreli filtrasyon deneyleri gerçekleştirilerek deney verileri değerlendirilip GR ve KR değerlerinin zamana ve hidrolik eğime bağlı değişim grafikleri Şekil 5.11 ve Şekil 5.12'de verilmiştir.

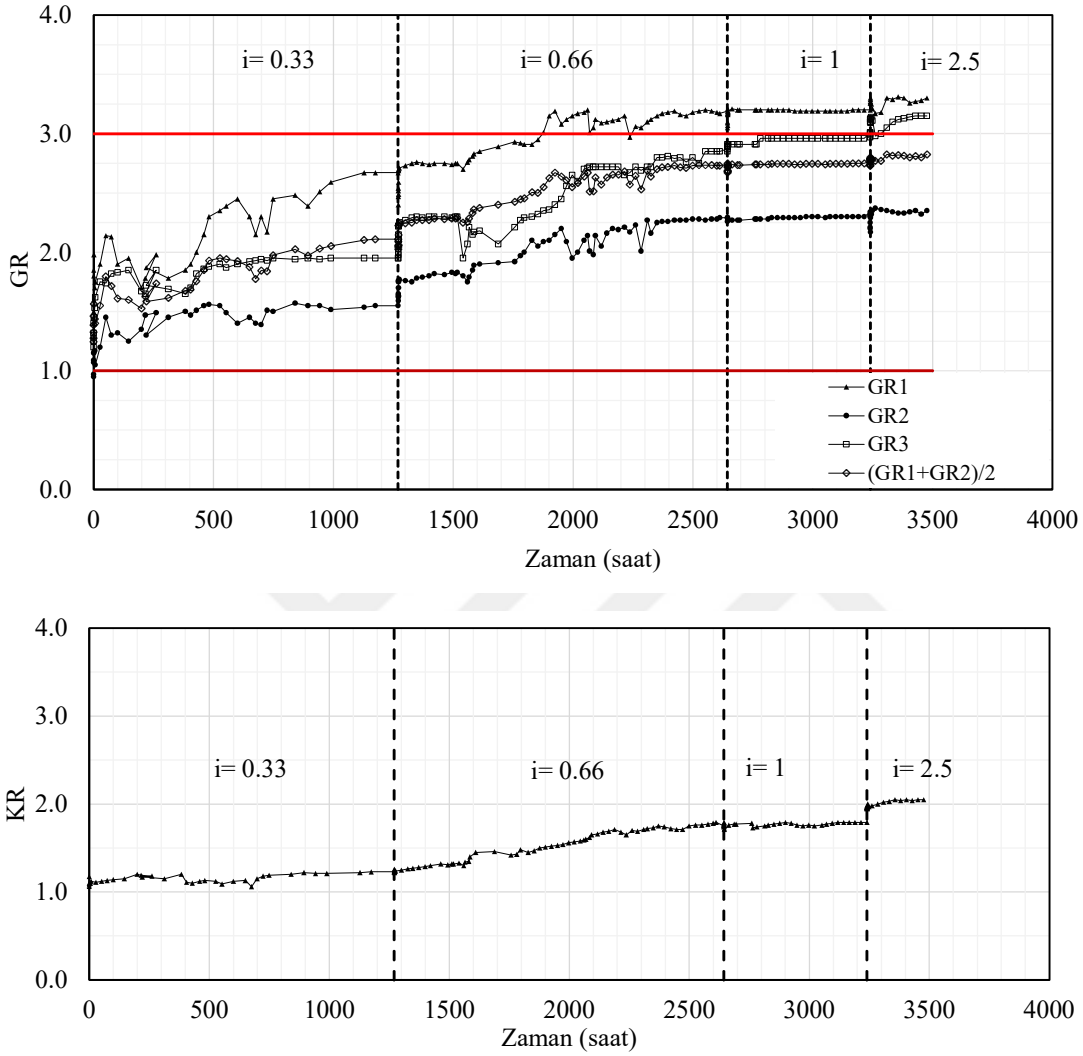


Şekil 5.11 : SS1 malzemesi için GR ve KR' nin zamana bağlı değişim grafikleri.

SS1 numunesine ait GR ve KR değişim grafikleri incelendiğinde küçük hidrolik eğimlerde GR değerlerinin stabilizasyonu için daha fazla zaman gerektiği, eğim arttıkça GR değerinin arttığı sonucu çıkartılabilir. GR değerleri arasındaki ilişki incelendiğinde geotekstilden uzaklaştıkça GR değerinin azaldığı ifade edilebilir. SS1 numunesine ait KR parametresinin de GR gibi artan hidrolik eğim ile artma eğilimi gösterdiği görülmektedir. Fakat tüm hidrolik eğimlerde SS1 numunesinin geçirimlilik oranı değerinin 1<KR<3 değiştiği görülmektedir, uzun süreli filtrasyon deneyi sonucu elde edilen verilerden GR değerinin ise i= 1 ve 2.5 hidrolik eğim değerleri için GR>3 olduğu belirlenmiştir.

SS2 numunesine ait Şekil 5.12'de verilen GR ve KR filtrasyon parametreleri incelendiğinde GR parametresinin değeri i=0.66, 1 ve 2.5 hidrolik eğim değerlerinde GR>3 olduğu görülmektedir. Şekil 5.12'deki KR verileri değerlendirildiğinde ise GR

değerlerinde olduğu gibi KR değerlerinde de artan hidrolik eğim ile artış olduğu sonucu çıkarılabilir. Fakat KR değerleri deney esnasında uygulanan tüm hidrolik eğimlerde 1<KR<3 arasında olduğu Şekil 5.12'de verilen grafikten görülmektedir.



Şekil 5.12 : SS2 malzemesi için GR ve KR'nin zamana bağlı değişim grafikleri.

Stabilizasyon şartı göz önünde bulundurularak hesaplanan GR ve KR değerleri çizelge 5.5 ve 5.6' da verilmiştir. Çizelge 5.5 incelendiğinde her iki çelik cürufunda da hidrolik eğimin artışı ile agrega yerdeğiştirmesi ve yeniden yerleşmesine bağlı olarak hidrolik eğim oranının (GR) arttığı tespit edilmiştir. Çelik cürufu – geotekstil sisteminin farklı noktalarında ölçülen GR değerleri karşılaştıldığında geotekstilden uzaklaştıkça hesaplanan GR değerinin azaldığı tespit edilmiştir (GR1>GR3>GR2). Çelik cürüfü ve örgüsüz geotekstilden oluşan drenaj sistemi için GR1 ve GR2'nin ortalaması olan GR4 değerleri dikkate alındığında hesaplanan GR4 değerinin tüm hidrolik eğimlerde 3'ten

küçük olduğu görülmektedir. Tıkanma limiti olarak 3 alınıp sistemin hidrolik eğim oranı temsilini GR4 olarak aldığımızda sistemin tıkanmadığını söyleyebiliriz.

Çizelge 5.5: SS malzemelerinin uzun düreli filtrasyon deneylerinden elde edilen hidrolik eğim oranı (GR) değerleri.

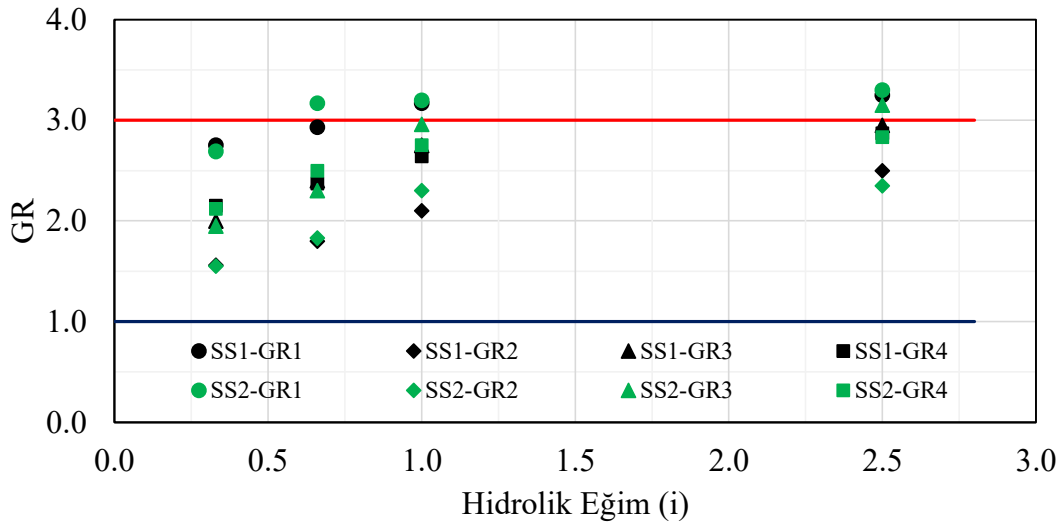
Malzeme	Hidrolik eğim, i	GR1	GR2	GR3	GR4=(GR1+GR2)/2
SS-1	0.33	2.75	1.56	2.00	2.15
	0.66	2.93	1.80	2.40	2.37
	1	3.17	2.10	2.75	2.64
	2.5	3.25	2.50	2.95	2.87
SS-2	0.33	2.69	1.55	1.95	2.12
	0.66	3.17	1.83	2.30	2.5
	1	3.20	2.30	2.96	2.75
	2.5	3.30	2.35	3.15	2.83

Çizelge 5.6 incelendiğinde ise iki farklı çelik cürufu – geotekstil sisteminin uzun süreli filtrasyon deneyleri sonucu elde edilen veriler ile hesaplanan KR değerinin de GR gibi genellikle, artan hidrolik eğim ile artma eğiliminde olduğu ve GR parametresi değerlerinin KR parametresi değerleri ile kıyaslanabilir düzeyde olduğu görülmektedir.

Çizelge 5.6: SS malzemelerinin uzun süreli filtrasyon deneylerinden elde edilen geçirimlilik oranı (KR) değerleri.

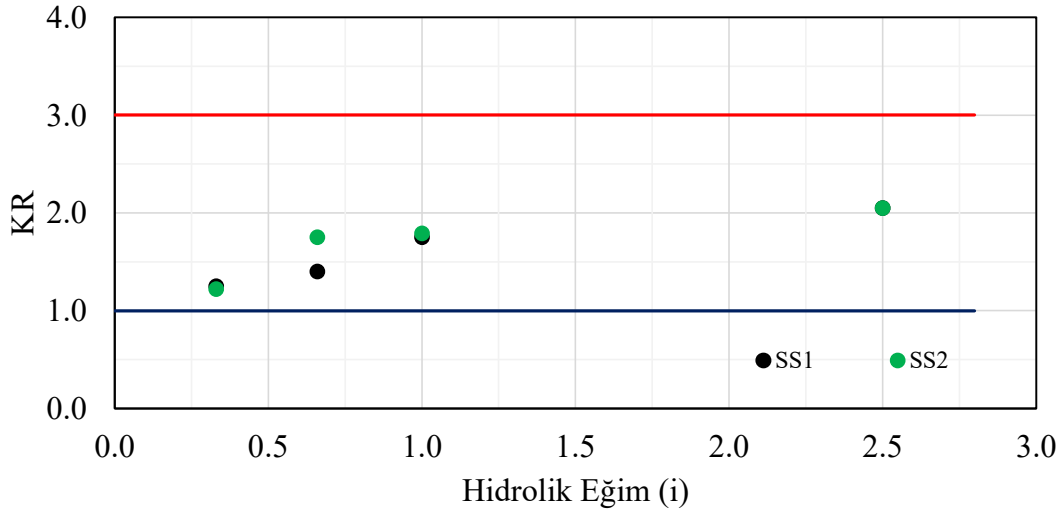
Malzeme	Hidrolik eğim, i	k_{agrega} (cm/s)@20°C	k_{sistem} (cm/s)@20°C	KR	GR4
SS-1	0.33	0.0025	0.0020	1.25	2.15
	0.66	0.0022	0.0016	1.40	2.37
	1	0.0023	0.0013	1.75	2.64
	2.5	0.0043	0.0021	2.05	2.87
SS-2	0.33	0.0021	0.0018	1.22	2.12
	0.66	0.0020	0.0011	1.75	2.5
	1	0.0019	0.0011	1.79	2.75
	2.5	0.0022	0.0011	2.05	2.83

Şekil 5.13'de uzun süreli filtrasyon deneyi sonrası çelik cürufu (SS1 ve SS2) numuneleri için elde edilen GR parametrelerinin hidrolik eğim ile değişim grafiği incelendiğinde çelik cürufu–geotekstil sisteminin tüm hidrolik eğimlerde GR>1 olduğu için kısmi tıkanmanın yaşandığı, GR<3 olduğu durumlarda geotekstil ve çelik cürufundan oluşan drenaj sisteminde kısmi tıkanma oluştuğu fakat işlevselliğini de devam ettirdiği düşünülebilir.



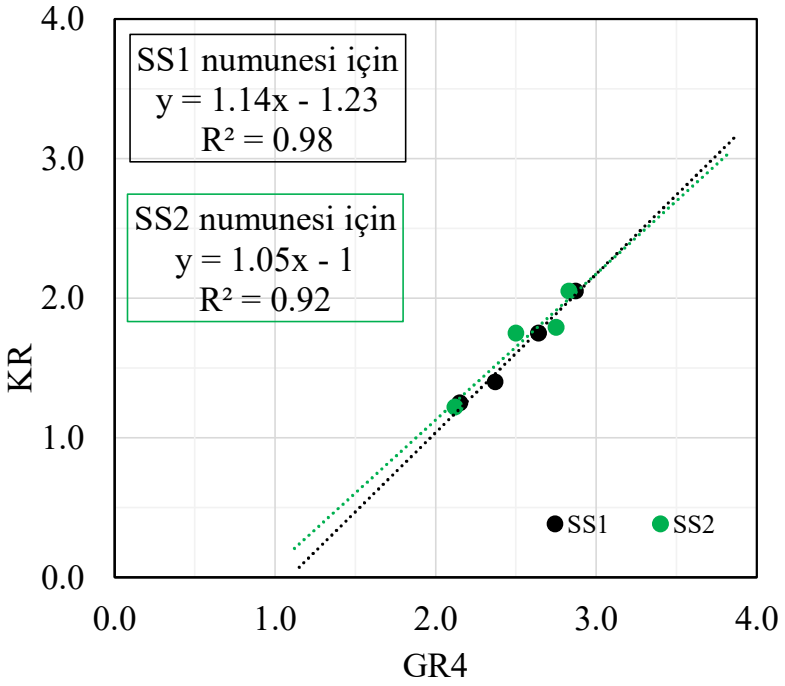
Şekil 5.13 : SS malzemeleri LFT deney verileri ile elde edilen GR1, GR2, GR3 ve GR4 değerlerinin hidrolik eğim ile değişimi.

Şekil 5.14'de verilen grafikten de KR parametresinin deneye tabi tutulan SS-geotekstil drenaj sistemlerinde 1 bantının üstünde fakat 3 bantının altında olduğu görülmektedir. Bu da SS ve geotekstilden oluşan drenaj sisteminde kısmi tıkanma yaşandığının bir diğer kanıtıdır.



Şekil 5.14 : SS malzemeleri LFT deney verileri ile elde edilen KR değerlerinin hidrolik eğim ile değişimi.

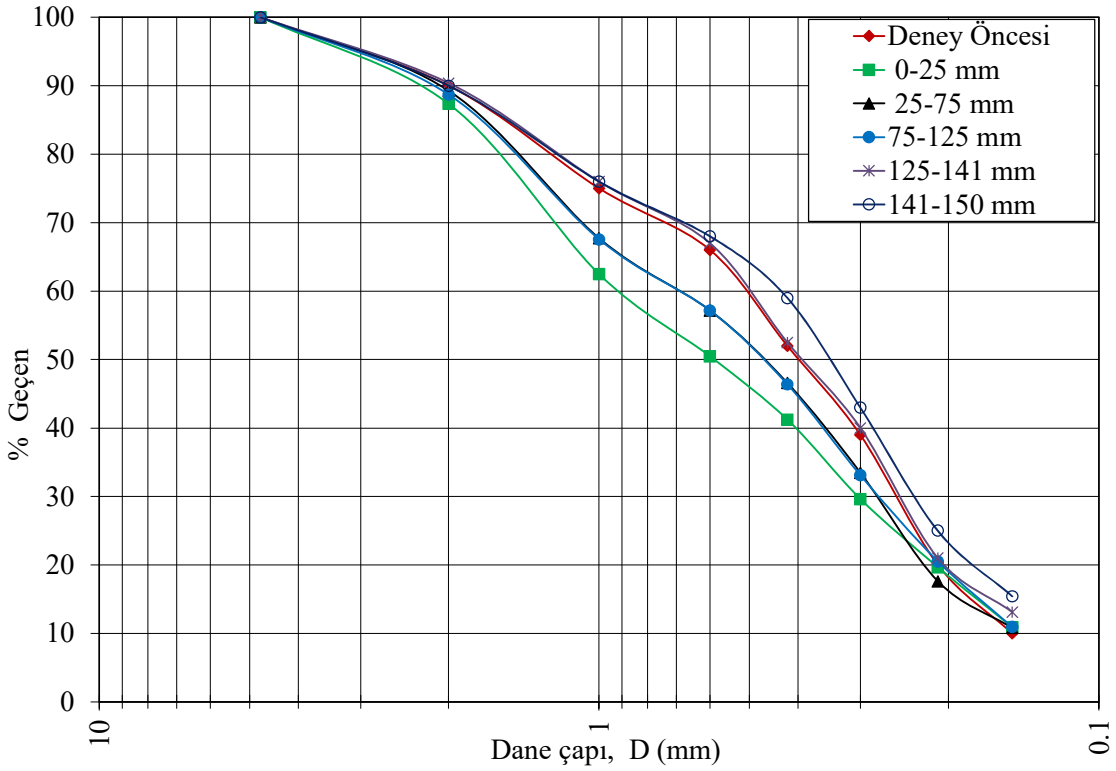
Bu çalışmada kullanılan çelik cürufu malzemeleri için hesaplanan KR değerlerinin GR değerlerine göre değişimi grafikte gösterildiğinde (Şekil 5.15), verilere uyan doğrusal regresyon çizgisinin SS1 numunesi için 1.14, SS2 numunesi için 1.05 eğime sahip olduğu görülmektedir.



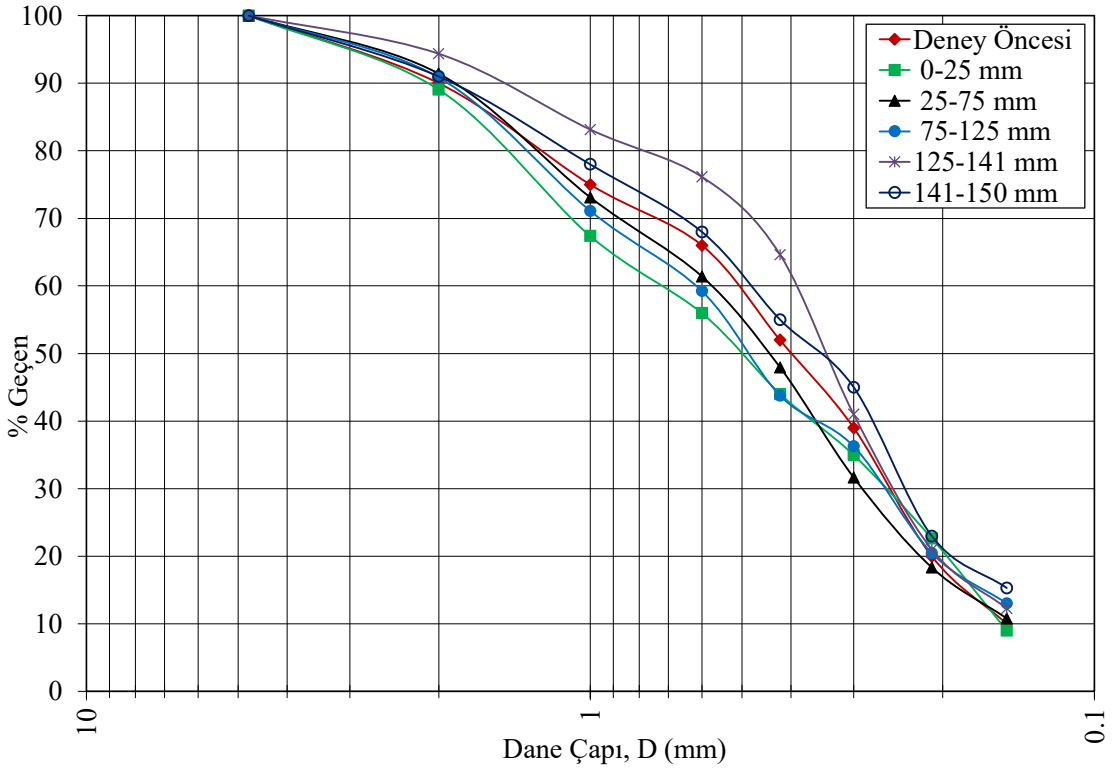
Şekil 5.15 : SS malzemelerinin LFT deney verileri ile elde edilen KR ve GR değerlerinin değişimi.

Uzun süreli filtrasyon deneyi süresince agrega danelerinin hareketinin belirlenmesi için deney sonu 5 tabakaya ayrılan çelik cürufu numuneleri üzerinde elek analizi yapılmış, çelik cüruflarına ait dane çapı dağılım eğrileri Şekil 5.16'da verilmiştir.

Şekil 5.16'daki grafiklerden anlaşılacağı üzere hem SS1 hem de SS2 malzemesinde uzun süreli filtrasyon deneyi sürecinde su akış yönüne doğru agregada bulunan ince danelerin hareketi olmuş, geotekstile yakın bölgede ince dane oranında artış meydana gelmiştir. Bu da hesaplanan hidrolik eğim oranı (GR) değerlerinin geotekstile yakın bölgelerde yüksek çıkmasının bir kanıtıdır.



(a)

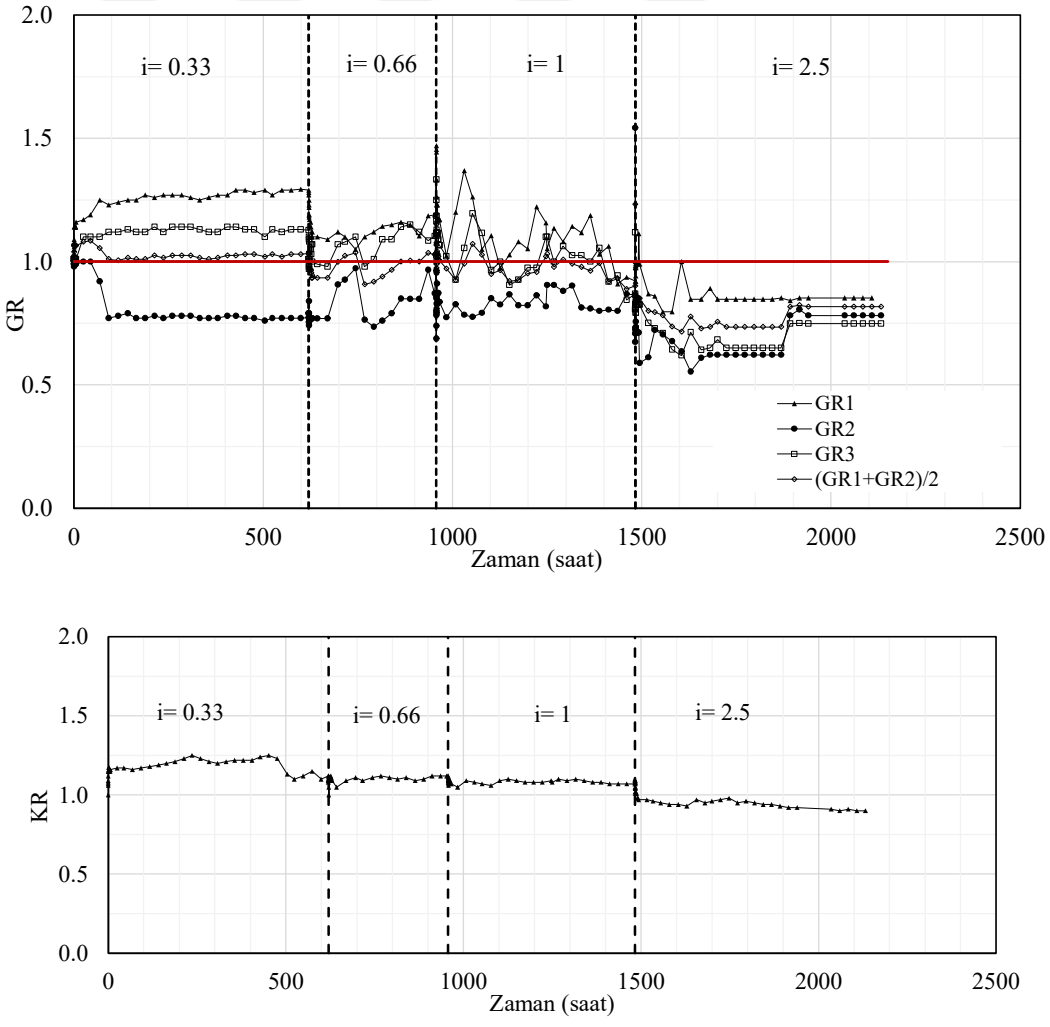


(b)

Şekil 5.16 : (a) SS1 malzemesinin uzun süreli filtrasyon deneyi sonrası dane çapı dağılımı.**(b)** SS2 malzemesinin uzun süreli filtrasyon deneyi sonrası dane çapı dağılımı.

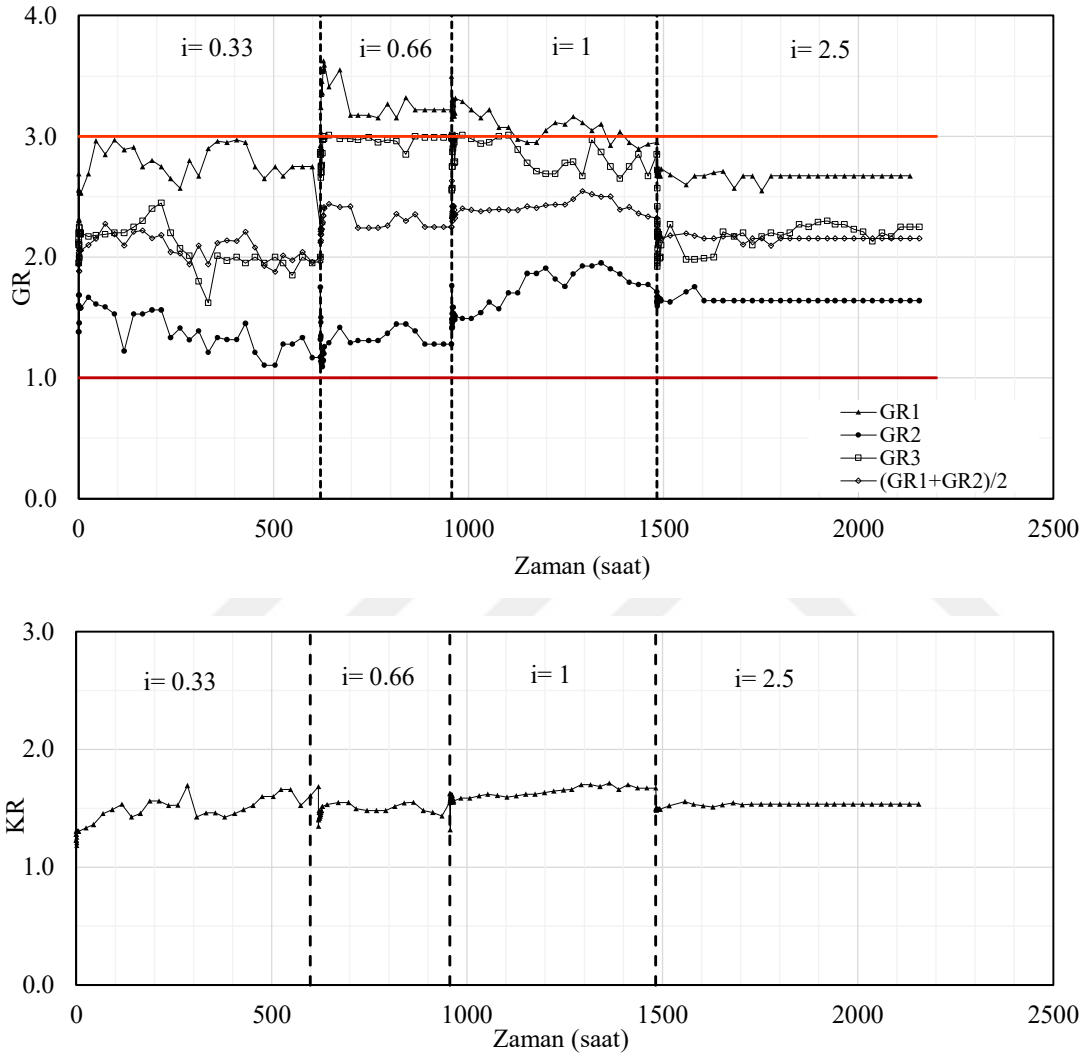
5.1.4 Doğal agrega - geotekstil sisteminin uzun süreli filtrasyon deney sonuçları

Geliştirilerek imalatı yaptırılmış uzun süreli filtrasyon deney sisteminde, filtrasyon performansını belirlemek için agrega-geotekstil drenaj sisteminde agrega olarak kullanılan çelik cürufu, geri kazanılmış asfalt ve geri kazanılmış beton numunesinin performans karşılaştırmasını yapabilmek için Karayolları Teknik Şartnamesi'nde (KTŞ) tanımlanan yol altı drenaj sistemlerinde kullanımı uygun olan iki farklı doğal agrega üzerinde de uzun süreli filtrasyon deneyleri yapılmıştır. Doğal agrega-1 (NA1) ve doğal agrega-2 (NA2) malzemeleri için uzun süreli filtrasyon deneyi (LFT) verileri ile elde edilen hidrolik eğim oranı (GR) ve geçirimlilik oranı (KR) parametrelerinin zamana bağlı değişim grafikleri Şekil 5.17 ve Şekil 5.18'de sverilmiştir. Şekil 5.17'de NA1 numunesinde i= 2. 5 hidrolik eğimde GR ve KR parametrelerinin değeri birden küçük olduğu için NA1 ve geotekstilden oluşan drenaj sisteminde borulanmanın gerçekleştiği düşünülmektedir.



Şekil 5.17 : NA1 numunesi için GR ve KR'nin zamana bağlı değişim grafikleri.

NA2 numunesinde ise, LFT esnasında uygulanan tüm hidrolik eğimlerde hidrolik eğim oranı 1<GR<3 olduğu için NA2-geotekstil sisteminde, filtrasyon performansını ciddi bir şekilde etkileyecek önemli bir tıkanmanın yaşanmadığı düşünülebilir. Ayrıca, NA2-getoekstil drenaj sistemi için tüm hidrolik eğimlerde stabil KR değerinin de GR ile kıyaslanabilir şekilde değiştiği grafiklerden görülmektedir.



Şekil 5.18 : NA2 numunesi için GR ve KR'nin zamana bağlı değişim grafikleri.

Doğal agrega numuneleri (NA1 ve NA2) için stabilize değerleri dikkate alınarak belirlenen GR ve KR değerleri Çizelge 5.7 ve 5.8'de verilmiştir. Çizelge 5.7 incelendiğinde doğal agrega numunelerinde hidrolik eğimin artışı ile agrega yerdeğiştirmesi ve yeniden yerleşmesine bağlı olarak hidrolik eğim oranının (GR) farklı hidrolik eğimlerde arttığı veya azaldığı belirlenmiştir. NA1 numunesi için, i=0.33 hidrolik eğiminde GR4=1.03, i=0.66 hidrolik eğiminde GR4= 1.08 iken i= 1 iken GR4= 0.90, i=2.5 değerinde GR4=0.82 değerlerini aldığı hesaplanmıştır. NA1 -

geotekstil drenaj sisteminin farklı noktalarında ölçülen GR değerleri karşılaştırıldığında, diğer agrega türlerinde olduğu gibi burada da geotekstilden uzaklaştıkça hesaplanan GR değerinin genellikle azaldığı tespit edilmiştir (GR1>GR3>GR2). Sistem için GR1 ve GR2'nin ortalaması olan GR4 değerleri dikkate alındığında hesaplanan GR4 değerinin tüm hidrolik eğimlerde 3'ten küçük olduğu, i=1 ve i=2.5 hidrolik eğimlerinde ise 1'den küçük olduğu görülmektedir. Tıkanma limiti olarak 3 alınıp sistemin hidrolik eğim oranı temsilini GR4 olarak aldığımızda sistemin tıkanmadığını söyleyebiliriz. NA2-geotekstil drenaj sisteminin filtrasyon parametreleri değerlendirildiğinde GR parametresinin genellikle 1<GR<3 değerlerini aldığı görülmektedir. Bu drenaj sisteminde de geotekstilden uzaklaştıkca GR değeri azalma eğilimindedir.

Çizelge 5.7: NA numunelerinin uzun düreli filtrasyon deneylerinden elde edilen hidrolik eğim oranı (GR) değerleri.

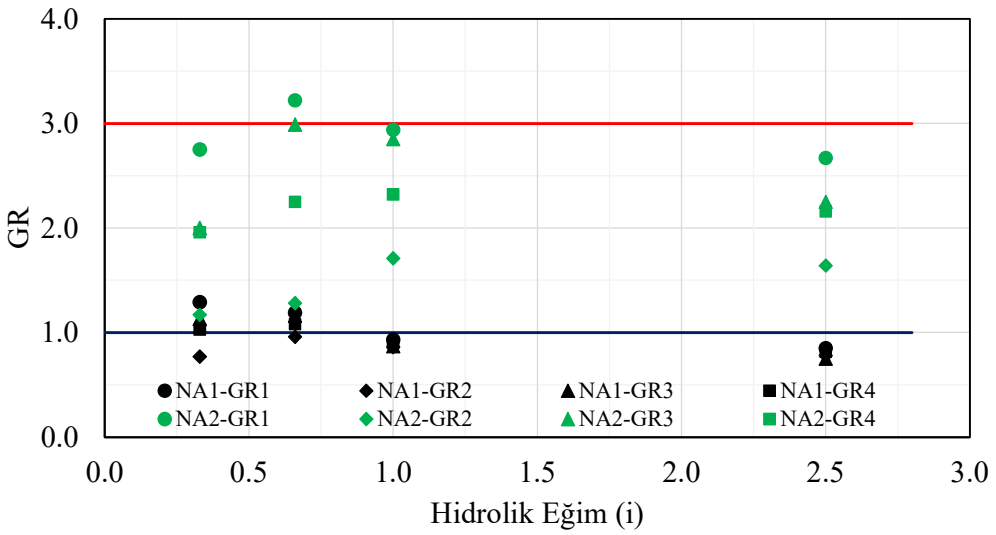
Malzeme	Hidrolik eğim, i	GR1	GR2	GR3	GR4=(GR1+GR2)/2
NA1	0.33	1.29	0.77	1.13	1.03
	0.66	1.19	0.96	1.16	1.08
	1.00	0.93	0.86	0.87	0.90
	2.50	0.85	0.78	0.75	0.82
NA2	0.33	2.75	1.17	2.00	1.96
	0.66	3.22	1.28	2.99	2.25
	1.00	2.94	1.71	2.85	2.32
	2.50	2.67	1.64	2.25	2.16

Çizelge 5.8 incelendiğinde ise NA1 numunesinin uzun süreli filtrasyon deneyleri sonucu elde edilen veriler ile hesaplanan KR değerinin, i=0.33, i=0.66 ve i=1 hidrolik eğimleri için yaklaşık 1 olduğu, i=2.5 hidrolik eğim için KR<1 değerini aldığı görülmektedir. NA2 numunesi için uzun süreli filtrasyon deneyi esnasında uygulanan tüm hidrolik eğimler için (i=0.33, 0.66, 1 ve 2.5) KR parametresinin 1'den büyük (KR>1) değerler aldığı görülmektedir.

Çizelge 5.8: NA numunelerinin uzun süreli filtrasyon deneylerinden elde edilen geçirimlilik oranı (KR) değerleri.

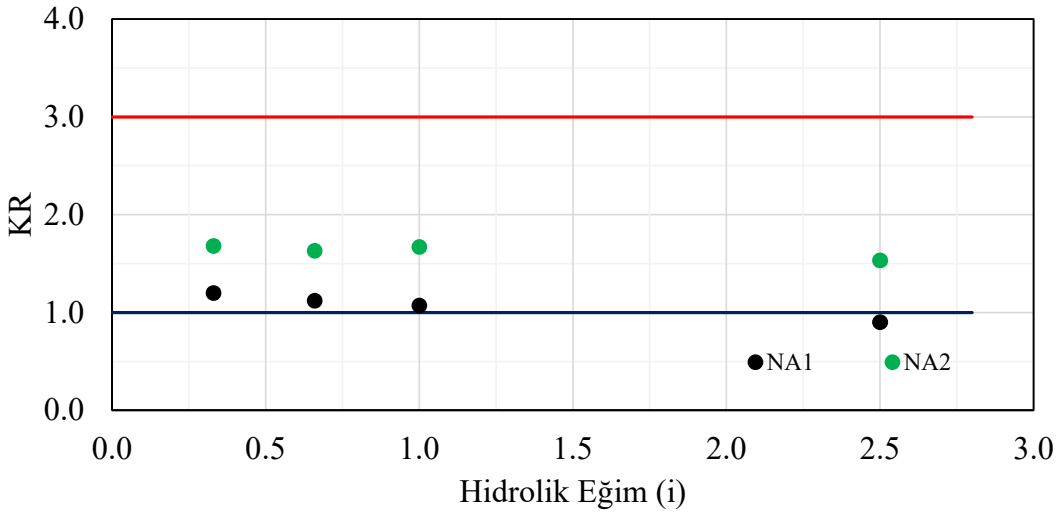
Malzeme	Hidrolik eğim, i	k_{agrega} (cm/s)@20°C	k_{sistem} (cm/s)@20°C	KR	GR4
NA1	0.33	0.308	0.026	1.2	1.03
	0.66	0.0124	0.0050	1.12	1.08
	1	0.0111	0.0037	1.07	0.90
	2.5	0.0071	0.0046	0.90	0.82
NA2	0.33	0.0014	0.0008	1.68	1.96
	0.66	0.0016	0.0010	1.63	2.25
	1	0.0015	0.0009	1.67	2.32
	2.5	0.0009	0.0007	1.53	2.16

Şekil 5.19'da verilen hidrolik eğim oranı değerinin hidrolik eğim ile değişimi grafiğinden de GR parametresinin deneye tabi tutulan NA1 numunesi için i=0.33 ve i=0.66 hidrolik eğimlerinde bir bantının hemen üstünde ve i=1 ve i=2.5 hidrolik eğim değerleri için bir bantının hemen altında olduğu görülmektedir. Stabil GR değerlerinin NA2 numunesi için ise deney esnasında uygulanan tüm hidrolik eğimlerde, 1 ile 3 bantı arasında olduğu görülmektedir. Bu da NA2 ve geotekstilden oluşan drenaj sisteminde kısmi tıkanma yaşandığını, fakat yaşanan bu tıkanmanın drenaj sisteminin performansını önemli ölçüde etkilemediğini göstermektedir.



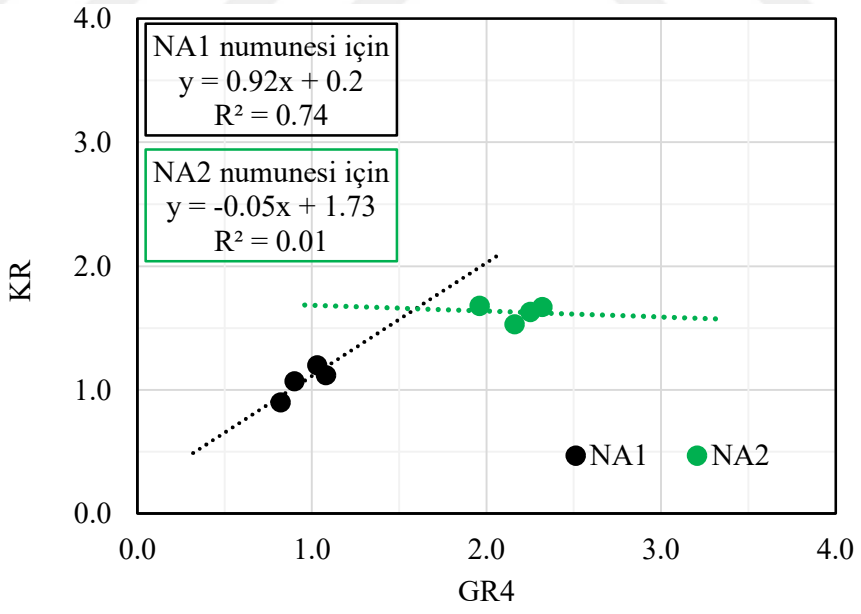
Şekil 5.19 : NA numunelerinin LFT deney verileri ile elde edilen GR1, GR2, GR3 ve GR4 değerlerinin hidrolik eğim ile değişimi.

Şekil 5.20'de verilen KR parametrelerinin hidrolik eğim ile değişim grafiği incelendiğinde ise i=2.5 hidrolik eğimi dışındaki hidrolik eğimlerde 1<KR<3 olduğu, i=2.5 hidrolik eğiminde NA1 numunesi içi KR<1 ve NA2 numunesi için ise 1<KR<3 değerleri arasında olduğu görülmektedir.



Şekil 5.20 : NA numunelerinin LFT deney verileri ile elde edilen KR değerlerinin hidrolik eğim ile değişimi.

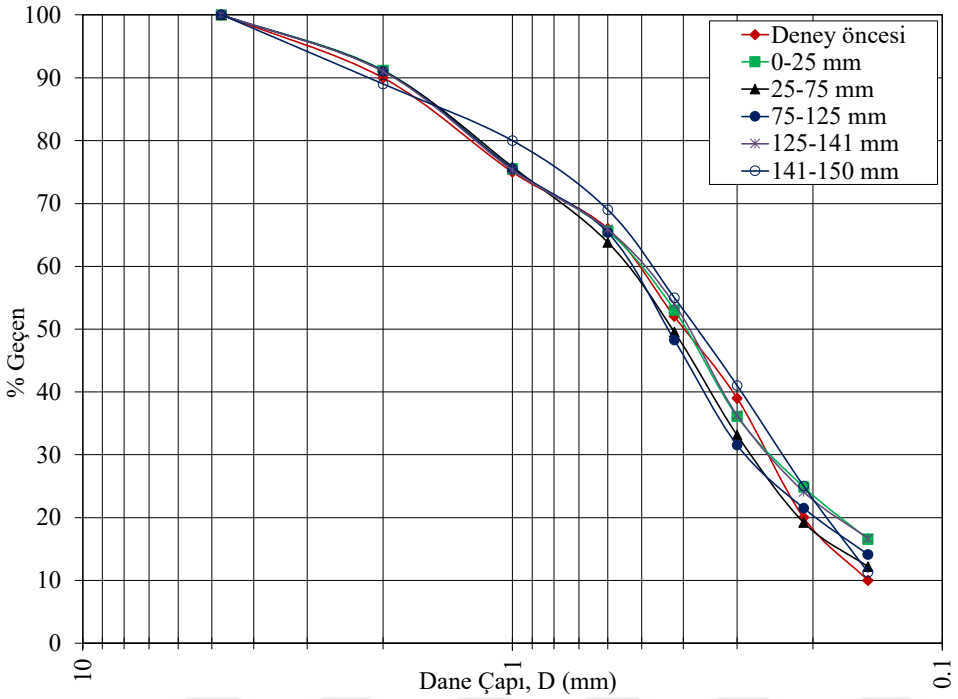
Bu çalışmada, endüstriyel atık malzemelerinin performansını değerlendirmek için kullanılan doğal agrega malzemeleri için hesaplanan KR değerlerinin GR değerlerine göre değişimi grafikte gösterildiğinde (Şekil 5.21), verilere uyan doğrusal regresyon çizgisinin NA1 numunesi için 0.92, NA2 numunesi için yaklaşık sıfır eğime sahip olduğu görülmektedir.



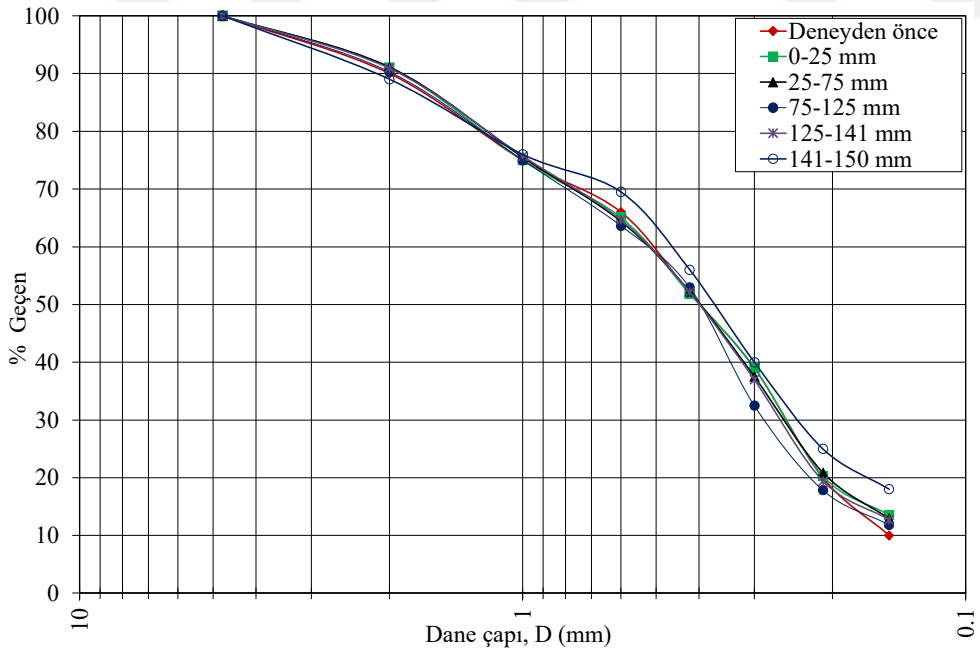
Şekil 5.21 : NA numunelerinin LFT deney verileri ile elde edilen KR ve GR değerlerinin değişimi.

Uzun süreli filtrasyon deneyi süresince doğal agrega danelerinin hareketinin belirlenmesi için deney sonu yapılan elek analizi sonucu elde edilen dane çapı dağılım

eğrileri Şekil 5.22'de verilmiştir. Şekil 5.22'deki grafiklerden anlaşılacağı üzere NA ve geotekstil drenaj sistemi modelinde uzun süreli filtrasyon deneyi sürecinde su akış yönüne doğru parçacık hareketi olmuştur.



(a)

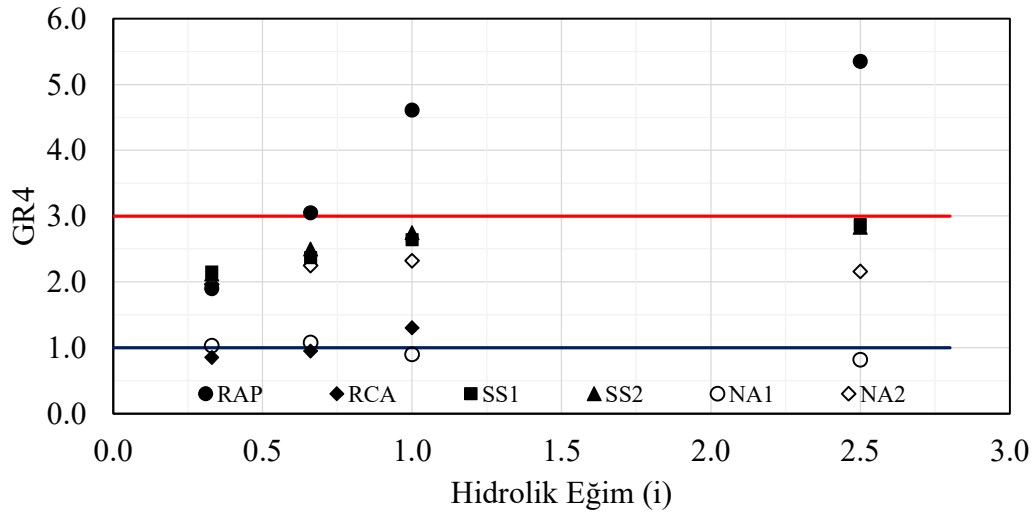


(b)

Şekil 5.22 : (a) NA1 numunesinin uzun süreli filtrasyon deneyi sonrası dane çapı dağılımı. **(b)** NA2 numunesinin uzun süreli filtrasyon deneyi sonrası dane çapı dağılımı.

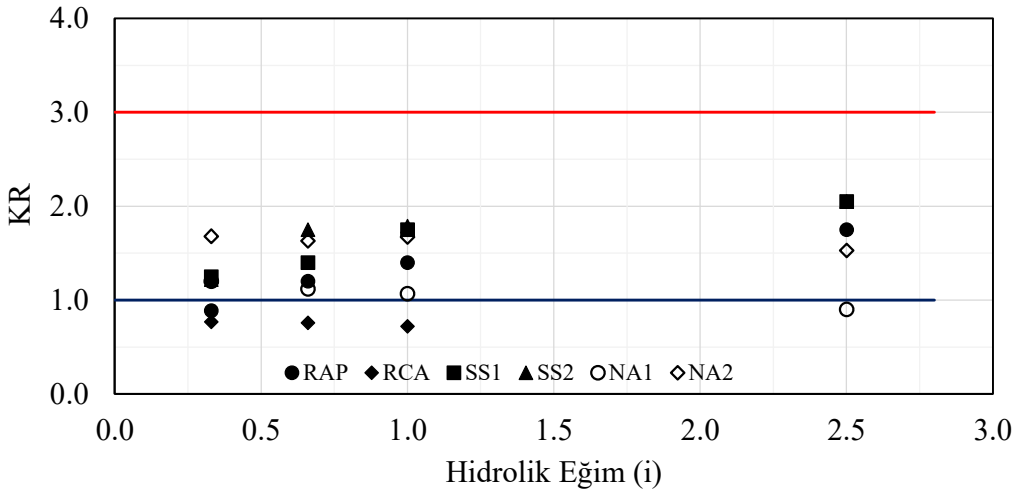
5.1.5 Farklı agrega türleri için filtrasyon parametrelerinin değerlendirilmesi ve tartışma

Bu deneysel çalışmada kullanılan agrega türlerine ait hidrolik eğim oranı değerlerinin hidrolik eğim ile değişim grafiği Şekil 5.23'te verilmiştir. GR4-i grafiğinden görüldüğü gibi geotekstilin performansını etkileyecek tıkanmanın yaşandığı numune sadece geri kazanılmış asfalt (RAP) malzemesidir. Doğal agrega numunelerinin performansına en yakın performans sergileyen atık malzeme ise geri kazanılmış beton (RCA) agregasıdır. Çelik cürufu (SS) agregasından teşkil edilen model drenaj sisteminde de hidrolik eğim oranı değerleri 1 ile 3 değerleri arasındadır. Bu da SS agregaları ile teşkil edilen model drenaj sisteminde de performansı etkileyecek tıkanmanın yaşanmadığını göstermektedir.



Şekil 5.23 : Farklı agregalar için hidrolik eğim oranının (GR4) hidrolik eğim ile değişim grafiği.

Şekil 5.24 de farklı agrega türlerine ait uzun süreli filtrasyon deneyi verileri ile elde edilen geçirimlilik oranı (KR) değerlerinin hidrolik eğim (i) ile değişim grafiği verilmiştir. GR4-i değişiminden farklı olarak KR-i değişiminde tüm agrega türleri için KR değerinin 3 bantının altında kaldığı görülmektedir. Farklı endüstriyel atık malzemelerinin hidrolik eğime bağlı olarak elde edilen KR değerlenin doğal agrelar için elde edilen KR değerleri ile karşılaştırıldığında, doğal agregaya en yakın performansı RCA malzemesinin gösterdiği görülmektedir.



Şekil 5.24 : Farklı agregalar için geçirimlilik oranının (KR) hidrolik eğim ile değişim grafiği.

Literatürde yapılan çalışmalarda belirtildiği gibi agrega ve geotekstilden oluşan drenaj sistemlerinin filtrasyon performansını değerlendirmek için hidrolik eğim oranı (GR) ve geçirimlilik oranı (KR) parametreleri birlikte değerlendirilmelidir. Özellikle ince dane oranı fazla olan agregalarda sadece GR değerine bakarak sistemin performansını değerlendirmek doğru bir yaklaşım değildir.

5.2 Optik Görüntülemenin Değerlendirilmesi

Farklı agrega türleri ve geotekstilden oluşan drenaj sisteminde geliştirilmiş uzun süreli filtrasyon deneyi sonrasında geotekstil numunelerin gözenek yapısındaki değişimi görüntüleyebilmek için, geotekstillerin orta ve kenar bölgelerinden ince kesit numuneleri hazırlanmış ve bir optik ışık mikroskobu kullanılarak mikrofotoğrafları çekilmiştir. Optik görüntüleme için kullanılan mikroskopta yakalanan görüntülerin bilgisayara aktarımı mikroskopa monte edilmiş olan Olympus dijital kamera ile yapılmıştır. Görüntü yakalamak için kullanılan optik ışık mikroskobu X5, X10 ve X20 olmak üzere üç okülere sahiptir. Her bir okülerin standart fotoğraf çekiminde büyütme değerleri;

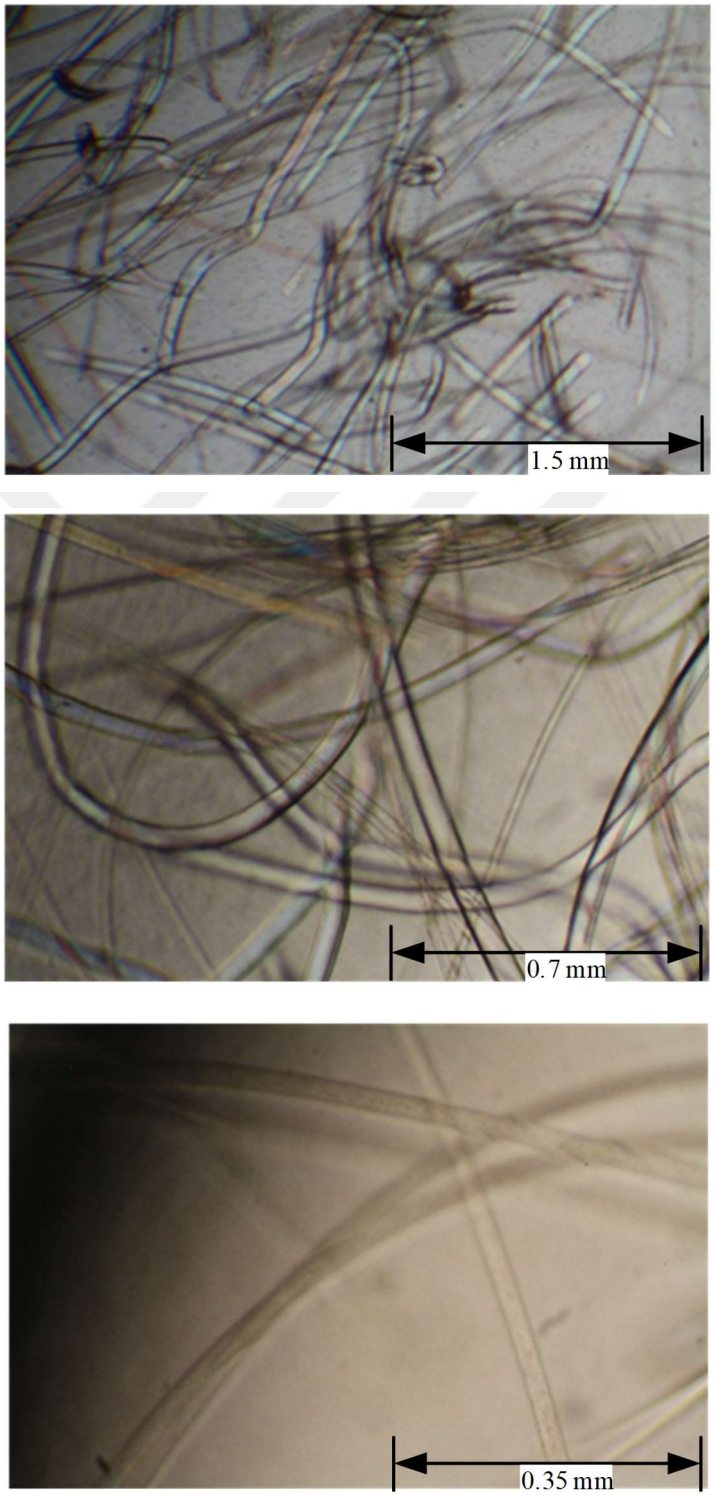
X5 : Çekilen fotoğrafın uzun kenarı 1.5 mm (1500µm)

X10 : Çekilen fotoğrafın uzun kenarı 0.7 mm (700µm)

X20 : Çekilen fotoğrafın uzun kenarı 0.35 mm (350µm)

şeklindedir. Uzun süreli filtrasyon deneyi sonrasında geotekstil numunelerde meydana

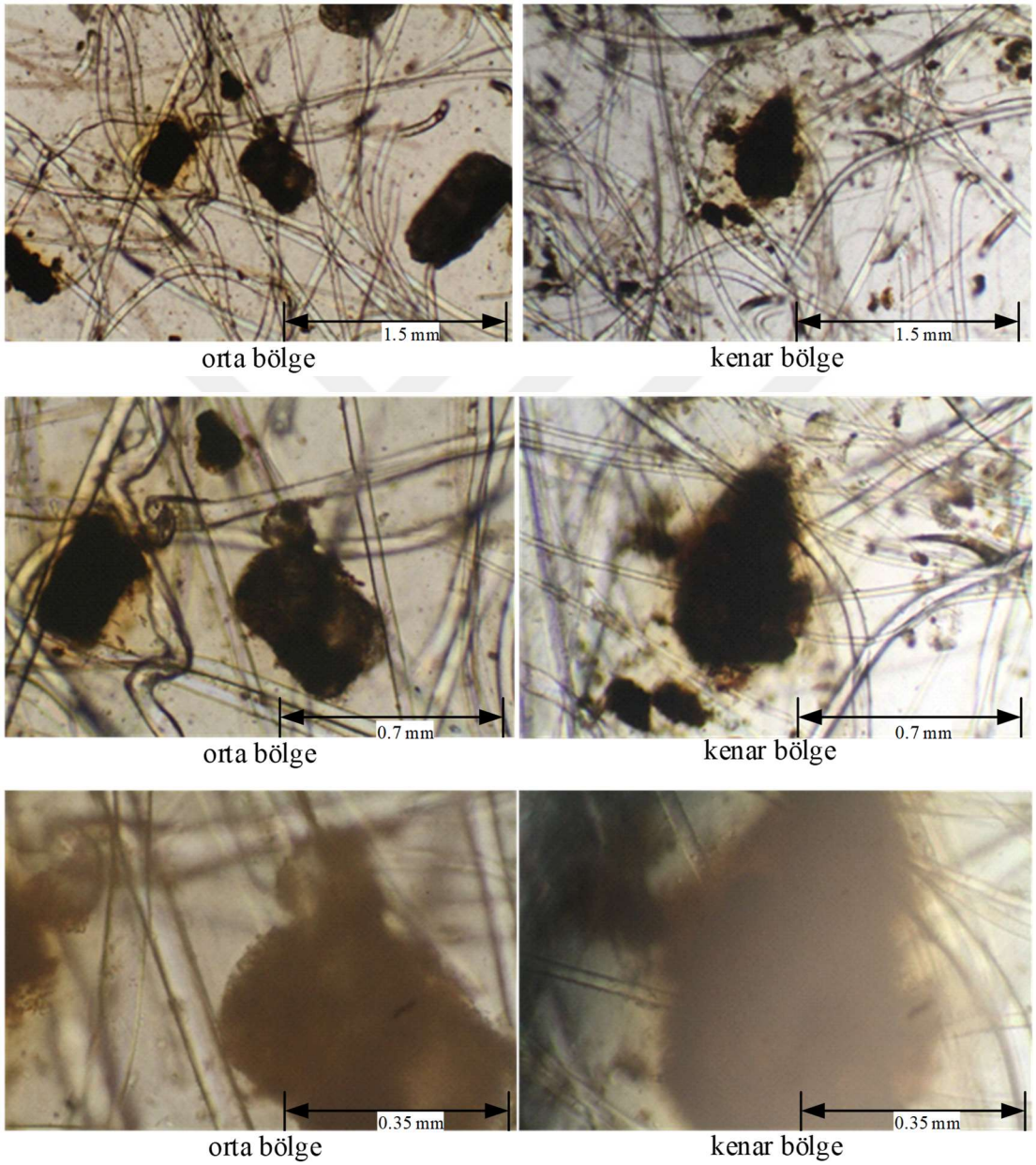
gelen değişimi kıyaslayabilmek için kullanılmamış geotekstilden de ince kesit numunesi hazırlanıp mikrofotoğrafları çekilmiştir. Kullanılmamış geotekstile ait X5, X10 ve X20 okülerdeki mikrofotoğraf görüntüleri Şekil 5. 25' te verilmiştir.



Şekil 5. 25: Uzun süreli filtrasyon deneyi öncesi, deneysel çalışmalarda kullanılan geotekstil malzemenin mikrofotoğrafı.

5.2.1 Geri kazanılmış asfalt-geotekstil sisteminin optik görüntüleri

Uzun süreli filtrasyon deneyi (LFT) ile filtrasyon parametreleri belirlenmiş olan geri kazanılmış asfalt (RAP) - geotekstil drenaj sisteminde LFT sonrası geotekstilin gözenekli yapısındaki değişimin tespiti için hazırlanan ince kesit numunelerinden mikrofotoğraflar çekilmiş ve Şekil 5.26'da verilmiştir.

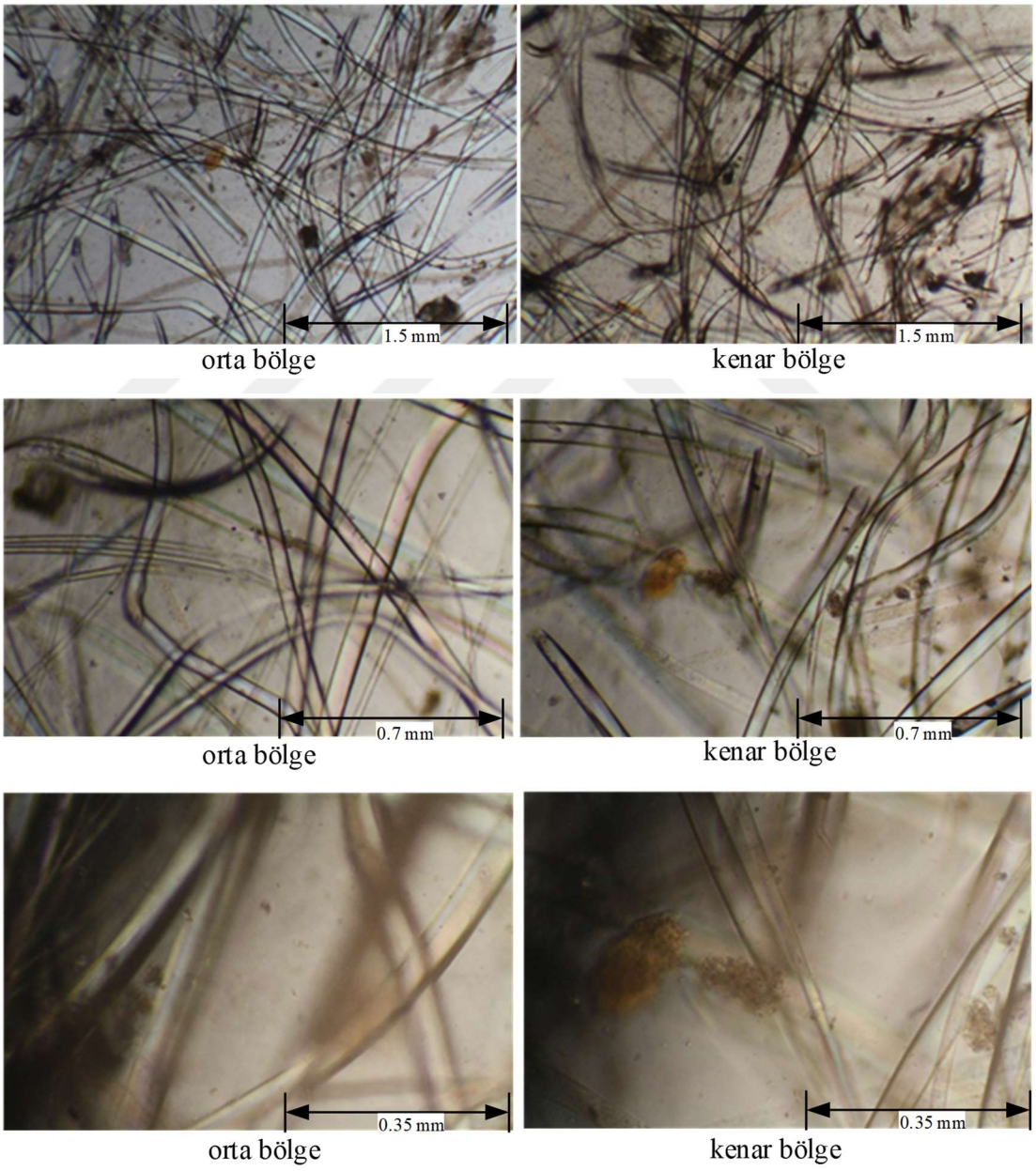


Şekil 5.26: RAP-geotekstil drenaj sistemindeki geotekstil numunenin LFT sonrası orta ve kenar bölgelerinin mikrofotoğrafları.

Şekil 5.26'da ki mikrofotoğraflardan anlaşılabilineceği gibi geotekstil gözeneklerinde kısmi tıkanma yaşanmıştır. Bu tıkanmaya özellikle RAP agregasının içindeki bitümlü malzemenin neden olmuş olabileceği düşünülmektedir.

5.2.2 Geri kazanılmış beton - geotekstil sisteminin optik görüntüleri

Geri kazanılmış beton (RCA) - geotekstil drenaj sisteminde uzun süreli filtrasyon deneyi (LFT) sonrası belirlenmiş olan filtrasyon parametrelerini görüntü analizi ile kontrol edebilmek için, RCA-geotekstil sisteminden filtrasyon deneyi sonrasında çıkarılan geotekstil numunesinin iki farklı bölgesinden ince kesit numuneleri hazırlanmış ve mikrofotoğrafları çekilmiştir. Şekil 5.27'de RCA malzeme ile drenaj sistemindeki performansı araştırılmış olan geotekstil numunenin mikrofotoğrafları verilmiştir.

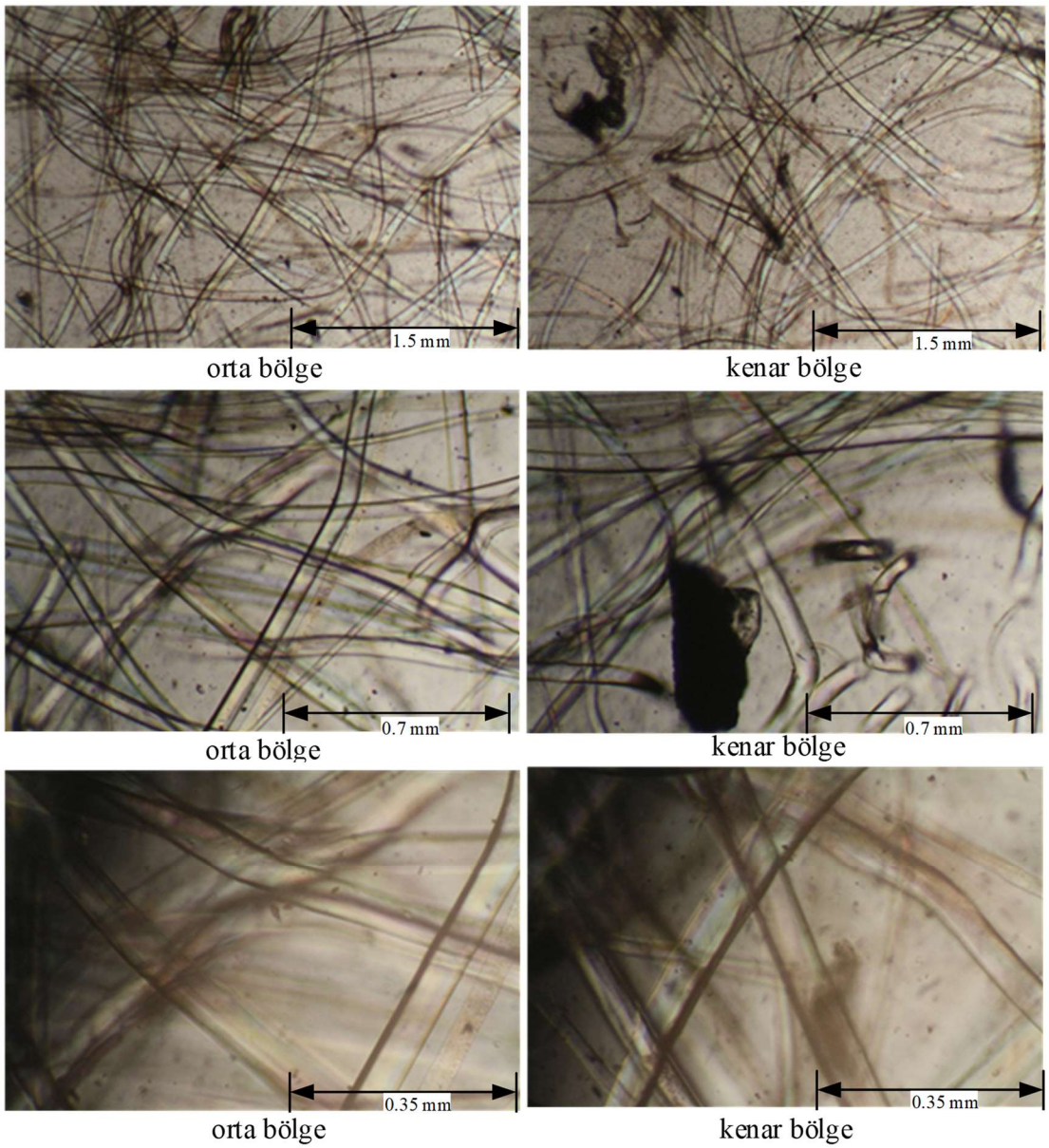


Şekil 5.27: RCA-geotekstil drenaj sistemindeki geotekstil numunenin LFT sonrası orta ve kenar bölgelerinin mikrofotoğrafları.

Şekil 5.27'deki fotoğraflardan da anlaşılacağı üzere geri kazanılmış beton malzeme de kullanılan geotekstil numunede de kısmi tıkanmalar yaşanmıştır.

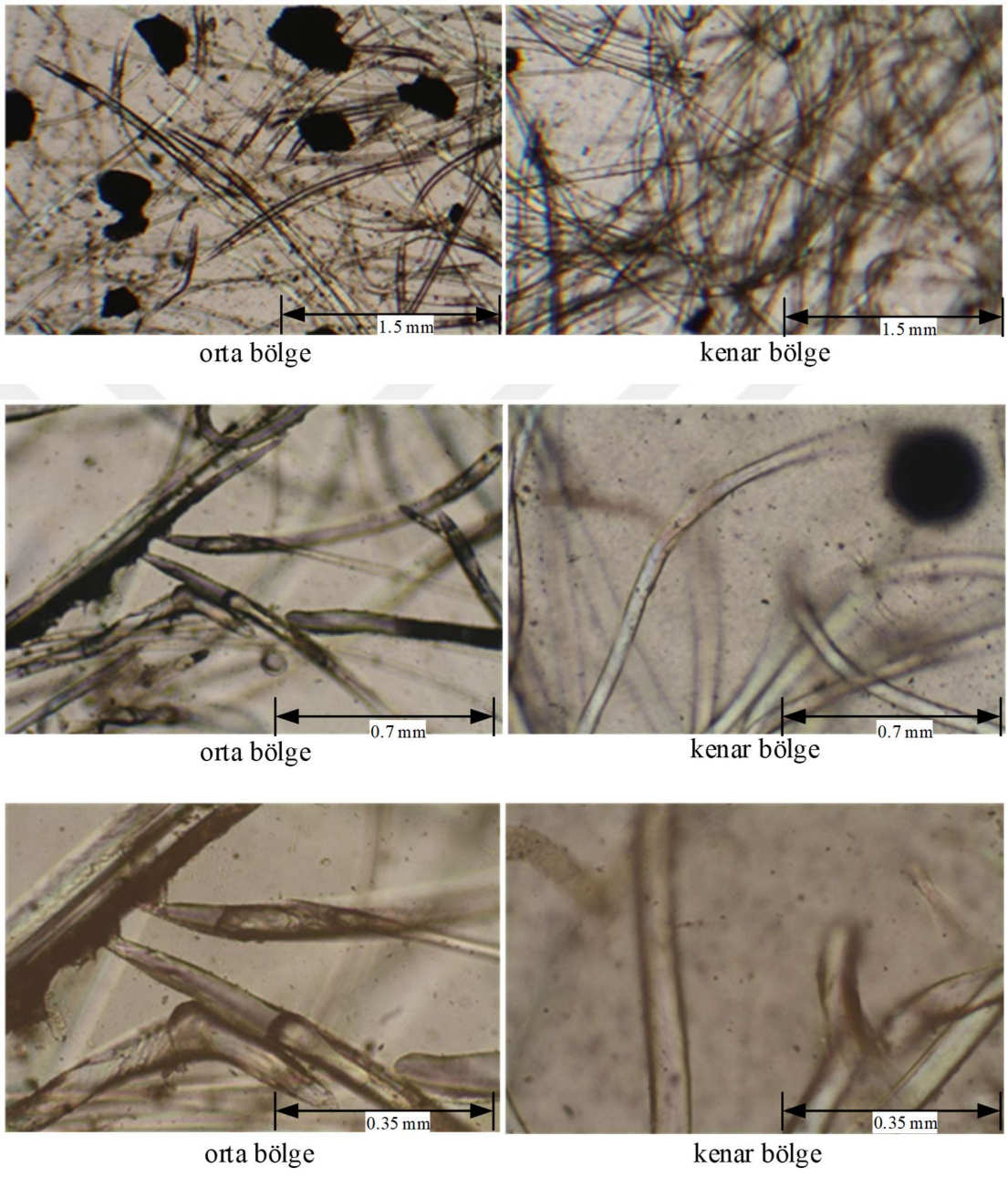
5.2.3 Çelik cürufu - geotekstil sisteminin optik görüntüleri

Uzun süreli filtrasyon deneyi sonrası numune hücresinden çıkarılan ve oda sıcaklığında kurutulan geotekstilin gözenekli yapısındaki değişimin tespiti için, geotekstil malzemenin iki farklı bölgesinden hazırlanmış olan ince kesit numunelerin mikrofotoğrafları çekilmiştir. Çelik cürufu-1'e (SS1) ait mikrofotoğraflar Şekil 5.28'de, çelik cürufu-2'ye (SS2) ait mikrofotoğraflar ise Şekil 5.29'da verilmiştir.



Şekil 5.28: SS1-geotekstil drenaj sistemindeki geotekstil numunenin LFT sonrası orta ve kenar bölgelerinin mikrofotoğrafları.

SS1 numunesi için iki farklı bölgeden elde edilen görüntüler karşılaştırıldığında geotekstil malzemenin kenarından hazırlanan ince kesit numunesinden elde edilen mikrofotoğraflarda tıkanmanın daha fazla olduğu anlaşılmaktadır.

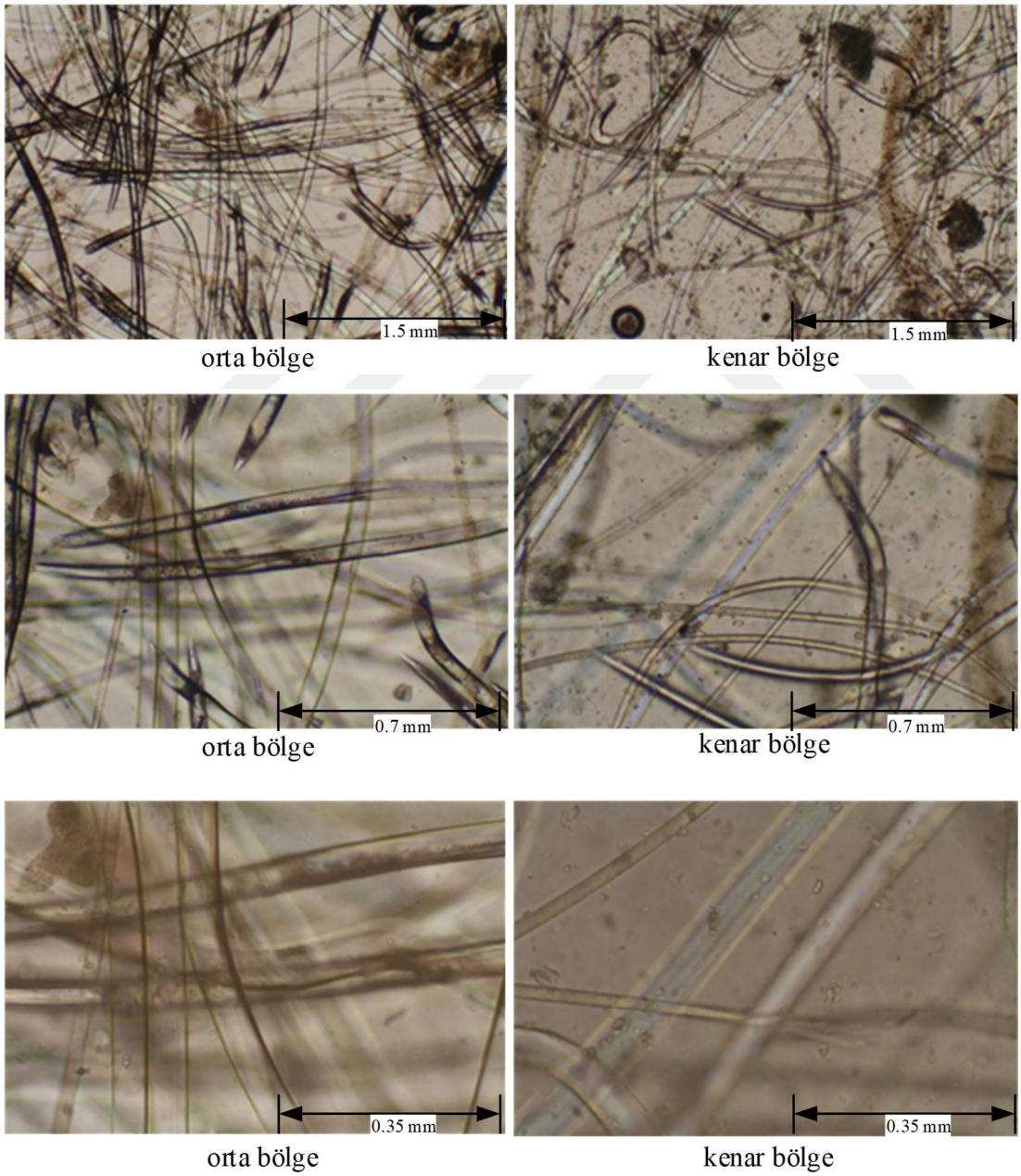


Şekil 5.29: SS2-geotekstil drenaj sistemindeki geotekstil numunenin LFT sonrası orta ve kenar bölgelerinin mikrofotoğrafları.

Şekil 5.29'ta verilen SS2 numunesine ait mikrofotoğraflar incelendiğinde ise SS1 numunesine göre tıkanmanın biraz daha fazla olduğu anlaşılmaktadır. Mikrofotoğraflar ile elde edilen bu sonuçlar nispeten LFT sonuçları ile kıyaslanabilir düzeydedir.

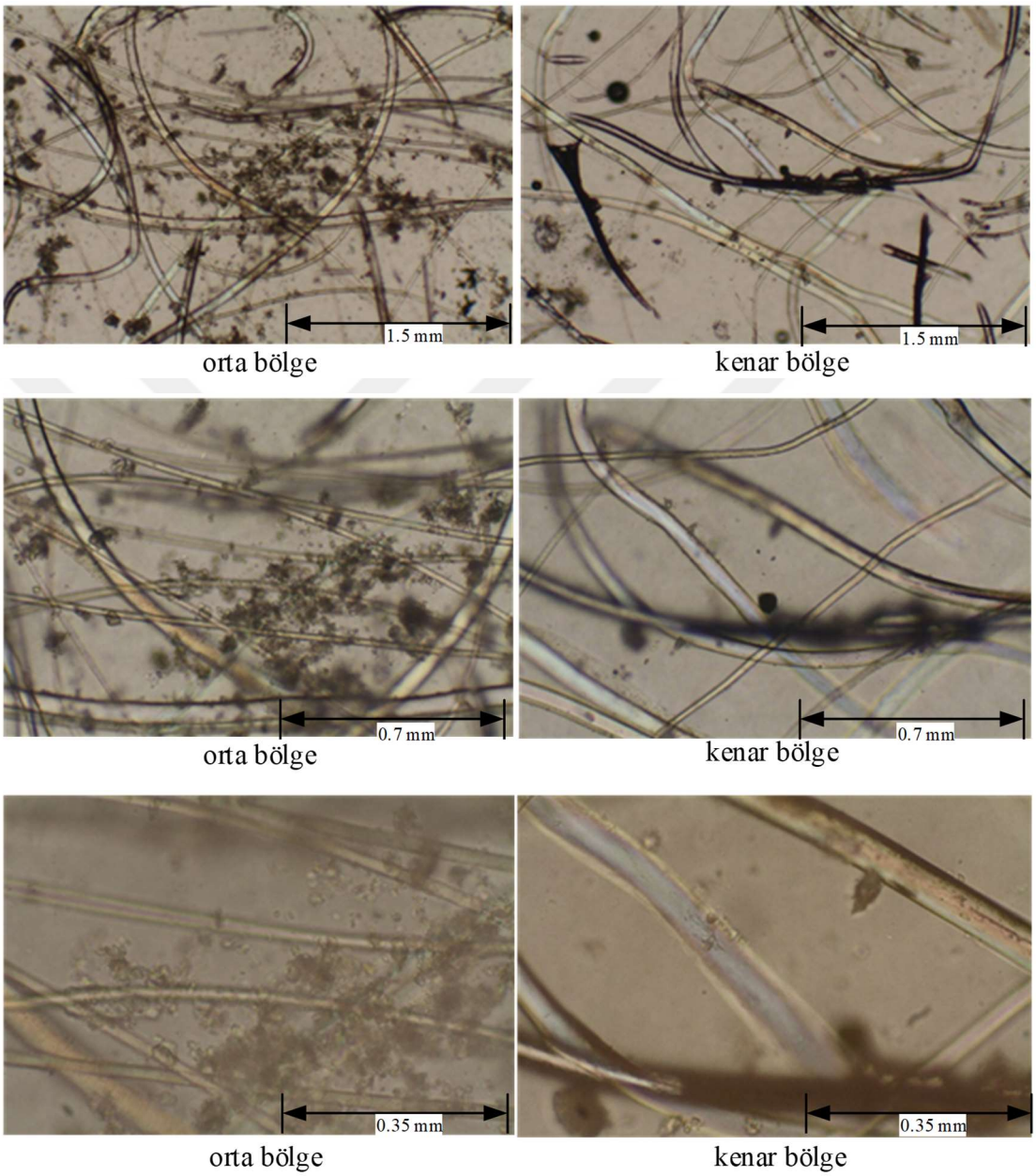
5.2.4 Doğal agrega - geotekstil sisteminin uzun süreli filtrasyon deney

Doğal agrega (NA) - geotekstil drenaj sisteminde uzun süreli filtrasyon deneyi (LFT) sonrası belirlenmiş olan filtrasyon parametrelerini görüntü analizi ile de değerlendirebilmek için, NA-geotekstil sisteminden filtrasyon deneyi sonrasında çıkarılan geotekstil numunesinin ortasından ve kenarından olmak üzere iki farklı bölgesinden ince kesit numuneleri hazırlanmış, mikrofotoğrafları çekilmiştir. Şekil 5.30'da NA1 malzeme ile drenaj sistemindeki performansı araştırılmış olan geotekstil numunenin mikrofotoğrafları verilmiştir.



Şekil 5.30: NA1-geotekstil drenaj sistemindeki geotekstil numunenin LFT sonrası orta ve kenar bölgelerinin mikrofotoğrafları.

Şekil 5.30'da verilen fotoğraflardan da anlaşılacağı gibi geotekstilin performanısın etkileyecek bir tıkanma görüntülenmemiştir. Şekil 5.31'de NA2 malzeme ile drenaj sistemindeki performansı araştırılmış olan geotekstil numunenin farklı iki bögesi için hazırlanmış ince kesitlerden elde edilen mikrofotoğrafları verilmiştir.



Şekil 5.31: NA2-geotekstil drenaj sistemindeki geotekstil numunenin LFT sonrası orta ve kenar bölgelerinin mikrofotoğrafları.

NA1 ve NA2 numunesi için çekilen görüntüler incelendiğinde NA2 numunesinde tıkanmış alanların daha fazla olduğu görülmektedir. LFT verileri ile ilde edilen GR ve KR parametreleri ile karşılaştırıldığında da NA2 numunesi için elde edilen tıkanma parametrelerinin daha büyük değerlere sahip olduğu söylenebilir.

6. SONUÇLAR

Atık malzemelerin drenaj sistemlerinde kullanım uygunluğunun deneysel olarak incelendiği bu çalışmada, agrega ve geotekstil malzemelerden teşkil edilecek olan drenaj sisteminde agrega olarak geri kazanılmış asfalt (RAP), geri kazanılmış beton (RCA), çelik cürufu (SS) gibi endüstriyel atık malzemelerinin kullanılması durumunda sistemin filtrasyon performansı araştırılmıştır. Endüstriyel atık malzemelerden teşkil edilecek olan drenaj sistemlerinin filtrasyon performanslarının değerlendirilmesi için drenaj sisteminin uzun süreli tıkanma davranışının araştırılması gerekmektedir. Bu nedenle laboratuvarda farklı endüstriyel atık malzemeleri ve geotekstilden oluşan drenaj sistemi üzerinde, ASTM D5101 standartında tanımlanmış olan uzun süreli fitrasyon deney sistemi geliştirilerek yeniden tasarlanmış ve üretimi yaptırılmıştır. Geliştirilmiş uzun süreli filtrasyon deney sisteminde;

1. Numune çapı ve yüksekliği artırılmıştır. ASTM D5101'de tanımlanan uzun süreli filtrasyon deney sisteminde100 mm çapında 100 mm yüksekliğinde numuneler kullanılırken, geliştirilmiş uzun süreli filtrasyon deney sisteminde 150 mm çapında, 150 mm yüksekliğinde silindirik numuneler kullanılmıştır.

2. Standart uzun süreli filtrasyon deney sisteminde numune tabanından itibaren 25 mm yüksekliğe ve 75 mm yüksekliğe yerleştirilmiş olan 4 adet manometre değerleri dikkate alınarak hidrolik eğim oranı (GR) belirlenirken, geliştirilmiş uzun süreli filtrasyon deney sisteminde numune tabanından itibaren 25 mm, 75 mm ve 125 mm yüksekliklere yerleştirilmiş 6 adet manometre okumaları dikkate alınarak GR parametresi belirlenmiştir.

3. ASTM D5101 standartında uzun süreli filtrasyon deney süresi için 24 saatin yeterli olduğu belirtilirken, deneysel çalışmada kullanılan agregadaki ince malzeme miktarına göre 24 saatlik bir zamanın yeterli olmadığı deneyler esnasında görülmüştür. Bu çalışma kapsamında yapılan deneyler, farklı hidrolik eğim altında tek bir numune üzerinde yaklaşık 6 ay sürmüştür.

Atık agregalardan teşkil edilecek olan drenaj sistemlerinin hidrolik eğim oranı (GR) ve geçirimlilik oranı (KR) olarak tanımlanan tıkanma parametrelerinin belirlenmesi için geliştirilmiş uzun süreli filtrasyon deney sisteminde uzun süreli filtrasyon deneyleri yapılmıştır. Aynı deney sisteminde, performans karşılaştırması yapabilmek için endüstriyel atık malzemeler ile aynı dane çapı dağılımına sahip doğal agrega üzerinde de uzun süreli filtrasyon deneyleri (LFT) gerçekleştirilmiş, sonuçlar karşılaştırılmıştır. Çalışmanın temel amacı; endüstriyel atık malzemenin drenaj sistemlerinde kullanılmasına yönelik performans incelemelerinin yapılması, bu atık malzemelerin tıkama performanslarının, halihazırda drenaj sistemlerinde kullanılan doğal agrega tıkanma parametreleri ile karşılaştırılarak kullanılabilirliğini belirlemektir.

Endüstriyel atık malzeme ve geotekstilden oluşan drenaj sistemlerinin filtrasyon performansını değerlendirmek için yapılan uzun süreli filtrasyon deney verileri değerlendirilerek, atık malzemelerin filtrasyon veya tıkanma performansını tanımlayacak olan hidrolik eğim oranı (GR) ve geçirimlilik oranı (KR) parametreleri elde edilmiştir. Ayrıca endüstriyel atık malzemelerin filtrasyon veya tıkanma performansını kıyaslayabilmek için drenaj sistemlerinde halihazırda kullanılan 2 farklı doğal agreganın da uzun süreli filtrasyon deneyi verileri ile GR ve KR parametreleri belirlenmiştir. Uzun süreli filtrasyon deneyi (LFT)sonrasında suyun hareketi ile göç eden agrega danelerini tespit edebilmek için numune 5 tabakaya ayrılmış, her bir tabaka üzerinde elek analizi yapılmıştır. Ayrıca bu çalışmada drenaj sistemlerinde kullanılan geotekstil malzemenin gözenekli yapısındaki değişikliğin görüntülenebilmesi için, geotekstil numuneden LFT öncesi ve sonrası ince kesit numuneleri hazırlanarak optik mikroskopla mikrofotoğrafları çekilmiştir.

Geliştirilmiş uzun süreli filtrasyon deney sisteminde yapılan deneylerde elde edilen veriler değerlendirilerek aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

1. Bu çalışmada farklı agrega ve geotekstil drenaj sistemlerinin filtrasyon davranışını laboratuvarda belirlemek için geliştirilerek imalatı yaptırılan deney sisteminin standart uzun süreli filtrasyon deney sistemine göre daha gerçekci sonuçlar verdiği düşünülmektedir. Daha hassas ve gerçekçi ölçümler alınmasının nedeni, deneysel çalışmada kullanılan numune boyutunun artırılması, daha hassas ölçüm alabilmek için haznenin 25-75-125 mm

yüksekliklerine yerleştirilen manometreler ve deney süresinin standartta belirlenen deney süresinden çok daha uzun olmasıdır.

2. Laboratuvarda, geliştirilmiş ASTM D5101 deney sisteminde yapılan uzun süreli filtrasyon deneylerinde farklı agrega ve geotekstil malzemeden teşkil edilen drenaj sisteminin filtrasyon davranışının zamana ve uygulanan hidrolik eğime göre değiştiği belirlenmiştir.
3. Geliştirilmiş uzun süreli filtrasyon deneyinde farklı seviyelerdeki manometre okumaları dikkate alınarak hesaplanan GR1, GR2, GR3 hidrolik eğim oranları kıyaslandığında, geotekstilden uzaklaştıkça GR değerinin azaldığı tespit edilmiştir. Yani, LFT ile edle edilen hidrolik eğim oranı (GR) parametreleri değerlendirildiğinde GR1> GR3> GR2 olduğu görülmektedir.
4. ASTM D5101 uzun süreli filtrasyon deneyinde hidrolik eğim oranının GR> 1 veya GR<1 olması sistemde agrega hareketinin başladığının göstergesi olarak kabul edilmektedir. GR değeri arttıkça tıkanma şiddeti ve akış kısıtlamasının arttığı düşünülmektedir. Bu yoruma dayanarak, mevcut çalışmada deneye tabi tutulan hemen hemen tüm agrega türlerinde dane göçü veya hareketi yaşanmış ve deneysel çalışmalarda kullanılan geotekstil malzemede de tıkanma yaşandığı görüntülenmiştir.
5. Uzun süreli filtrasyon deneylerinden elde edilen GR'nin, ince dane miktarı fazla olan agregalarda tıkanma performansının değerlendirilmesinde tek başına dikkate alınmaması, KR ile birlikte değerlendirilmesi daha doğru bir yaklaşım olacaktır. Geçmişte yapılmış çalışmalar da bu önerimizi desteklemektedir.
6. Endüstriyel atık ve geotekstil malzemelerden teşkil edilen drenaj sisteminin uzun süreli filtrasyon davranışı kimyasal ve fiziksel yapılarındaki farklılıklarından dolayı doğal agrega ve geotekstil malzemelerden teşkil edilen drenaj sistemlerinden farklı davranış sergilemektedir.
7. İnşaat/yıkım atığı olan geri kazanılmış asfalt (RAP) malzemesinin uzun süreli filtrasyon performansı değerlendirildiğinde sistemin zamana ve akış koşullarına bağlı olarak tıkanma yaşadığı deney sonuçlarından görülmektedir. Bu nedenle geri kazanılmış asfalt malzeme içeriğindeki doğal agrega miktarının fazla olması nedeni ile drenaj sistemlerinde içeriğindeki bitüm malzeme tamamen alınarak veya kısıtlanarak kullanılması gerekmektedir.

8. Bir diğer inşaat/yıkım atığı malzemesi olan geri kazanılmış beton (RCA) malzeme ve geotekstilden oluşan model drenaj sisteminin laboratuvar uzun süreli filtrasyon deneyi verileri ile elde edilen tıkanma veya filtrasyon parametreleri değerlendirildiğinde bir diğer inşaat/yıkım atığı malzemesi olan geri kazanılmış asfalt malzemeye göre daha iyi bir performans sergilediği görülmektedir.

9. RCA-geotekstil drenaj sisteminin filtrasyon davranışının zamana ve uygulanan hidrolik eğime göre değiştiği, RCA malzemenin yapısında bulunan, içerisinde çözünür minerallerin yer aldığı çimento nedeni ile filtrasyon davranışının doğal agrega-geotekstil drenaj sistemlerinden farklı olduğu görünmektedir. Ancak, RCA'nın bu yapısı, deneysel çalışmalarda kullanılan geotekstilin performansını etkileyecek derecede tıkanmasına neden olmamıştır. Ayrıca, uzun süreli filtrasyon deneyi verileri karşılaştırıldığında geri kazanılmış beton (RCA) malzemenin, doğal agrega ile kıyaslanabilir bir tıkanma performansı davranışı gösterdiği tespit edilmiştir.

10. Laboratuvar deney verilerinde, demir-çelik endüstrisi atık malzemesi çelik cürufun (SS) filtrasyon özelliklerinin aynı dane çapı dağılımına sahip olsalar bile, geri kazanılmış beton ve geri kazanılmış asfalt gibi inşaat/yıkım atık agregalarının filtrasyon davranışından farklı olduğu belirlenmiştir.
11. İki farklı çelik cürufu malzemesinin laboratuvar deneyleri verileri ile elde edilen filtrasyon veya tıkanma parametreleri değerlendirildiğinde ve RAP malzemesi filtrasyon parametreleri ile karşılaştırıldığında SS ve geotekstil drenaj sisteminin filtrasyon davranışının RAP ve geotekstil drenaj sisteminin filtrasyon davranışından daha iyi olduğu tespit edilmiştir. Önceki araştırmalarda da düşük ile orta seviyelerde potansiyel toksik elementler içermesine rağmen, iyileştirme işlemi uygulanarak drenaj sistemlerinde çelik cürufunun (SS) doğal agregaların yerine kullanılabilineceği bildirilmiştir.
12. Drenaj sistemlerinin yapımında çelik cürufu, geri kazanılmış asfalt ve geri kazanılmış beton gibi farklı endüstrilere ait atık malzemeler çevresel faktörler ve tıkanma performansları araştırılarak ve değerlendirilerek doğal agrega yerine kullanılabilir. Böylece sürdürülebilir malzeme yönetimi (SMM) geoteknik mühendisliği uygulamalarında desteklenmiş olur, hem de

endüstriyel atık malzemelerin depolama problemi çözülerek ülkelerin ekonomisine katkıda bulunulmuş olunur.

13. Uzun süreli filtrasyon deneyleri ile farklı agrega ve geotekstil malzemenin performansları değerlendirilmiş, drenaj sistemlerinde kullanım açısından agrega-geotekstil sistemlerinin uyumlulukları değerlendirilmiştir. Çalışmada kullanılan örgüsüz geotekstil malzeme ile RCA, SS ve NA malzemeleri uygulamada drenaj sistemlerinde kullanılabilineceği düşünülmektedir.
14. Laboratuvarda filtrasyon davranışı incelenmiş olan agrega-geotekstil drenaj sistemlerinin fiziksel tıkanmalarını belirlemek için geliştirilmiş uzun süreli filtrasyon deneyi uygun olabilir, fakat arazi koşulları, iklim şartları ve özellikle uzun vadede akış koşullarına bağlı olarak atık malzemelerin kimyasal yapısında meydana gelebilecek değişikliklerin de çevresel etkilerinin değerlendirilmesi gerekmektedir.
15. Uzunu süreli filtrasyon deneyi sonucu geotekstil malzemenin gözenek yapısındaki değişimin değerlendirilebilmesi için mikrofotoğrafları çekilmiştir. Geotekstil malzemenin farklı bölgelerinden (kenar ve orta) hazırlanmış numunelerin mikrofotoğrafları incelendiğinde uzun süreli filtrasyon deneyleri ile elde edilen tıkanma parametreleri ile örtüştüğü, tüm agregaların geotekstilde kısmi tıkanma yaşadığı belirlenmiştir.

Çalışma kapsamında sınırlı sayıda numune üzerinde yapılan deney sonuçlarına dayanarak kullanılan agregaların filtrasyon parametrelerini ve filtrasyon davranışlarını doğrudan herhangi bir malzemenin filtrasyon parametresi olarak kullanmamak gerekmektedir. Bu çalışmada kullanılan malzemeler için elde edilen değerler benzer malzemelerin filtrasyon davranışını sadece tahmin etmek ve bir öngörüde bulunulabilmesi için değerlendirilebilir. Bu çalışmada elde edilen verilerin kullanılan malzemelere özgü olduğu unutulmamalıdır.

KAYNAKLAR

Abbaspour, A., Tanyu, B. F., Aydilek, A. H., & Dayioglu, A. Y. (2018). Methodology to Evaluate Hydraulic Compatibility of Geotextile and RCA in Underdrain Systems. *Geosynthetics International*, *25*(1), 67–84.

Abbaspour, Aiyoub, Tanyu, B. F., & Cetin, B. (2016). Impact of Aging on Leaching Characteristics of Recycled Concrete Aggregate. *Environmental Science and Pollution Research*, *23*(20), 20835–20852.

Ajmeri, J. R., & Ajmeri, C. J. (2016). Developments in Nonwoven as geotextiles. *Advances in Technical Nonwovens*, 339–363.

Allwood, J. (2012). Sustainable Materials With Both Eyes Open. *University Of Cambridge*, 3–5.

Arulrajah, A., Piratheepan, J., Ali, M. M. Y., & Bo, M. W. (2012). Geotechnical Properties of Recycled Concrete Aggregate in Pavement Sub-Base Applications. *Geotechnical Testing Journal*, *35*(5), 1–9.

Arulrajah, A., Piratheepan, J., Bo, M. W., & Sivakugan, N. (2012). Geotechnical Characteristics of Recycled Crushed Brick Blends for Pavement Sub-Base Applications. *Canadian Geotechnical Journal*, *49*(7), 796–811.

Aslam, M. S., Huang, B., & Cui, L. (2020). Review of Construction and Demolition Waste Management in China and USA. *Journal of Environmental Management*, *264*(February).

Augiseau, V. (2020). Construction Materials Flows and Stocks in Paris Region: An Overview. *Ecocycles*, *6*(1), 18–22.

Aydilek, A. H., & Edil, T. B. (2002). Filtration Performance of Woven Geotextiles with Wastewater Treatment Sludge. *Geosynthetics International*, *9*(1), 41–69.

Aydilek, A. H., & Edil, T. B. (2003). Long-Term Filtration Performance of Nonwoven Geotextile-Sludge Systems. *Geosynthetics International*, *10*(4), 110–123.

Aydilek, A., Zhang, Y., & Goulias, D. (2017). Sustainability Evaluation of Pavements Using Recycled Materials. *Proceedings of the 10th International Conference on the Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields*, 1283–1291.

Aydilek, Ahmet H., Oguz, S. H., & Edil, T. B. (2002). Digital Image Analysis to Determine Pore Opening Size Distribution of Nonwoven Geotextiles. *Journal of Computing in Civil Engineering*, *16*(4), 280–290.

Aydilek, Ahmet H., Oguz, S. H., & Edil, T. B. (2005). Constriction Size of Geotextile Filters. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, *131*(1), 28–38.

Ayres, R. U., & Ayres, L. W. (2019). A Handbook of Industrial Ecology. In *Edward Elgar Publishing Limited U.K.*

Behera, M., Bhattacharyya, S. K., Minocha, A. K., Deoliya, R., & Maiti, S. (2014). Recycled Aggregate from C&D Waste & Its Use in Concrete - A Breakthrough Towards Sustainability in Construction Sector: A Review. *Construction and Building Materials*, *68*, 501–516.

Bestgen, J. O., Hatipoglu, M., Cetin, B., & Aydilek, A. H. (2016). Mechanical and Environmental Suitability of Recycled Concrete Aggregate as a Highway Base Material. *Journal of Materials in Civil Engineering*, *28*(9), 1–13.

Bhatia, S. K., & Suits, L. D. (1996). Recent Developments in Geotextile Filters and Prefabricated Drainage Geocomposites. In *ASTM STP 1281*.

Bilgen, G., Houlihan, M., Ryoo, S., Wang, Y., & Aydilek, A. H. (2020). Hydraulic and Environmental Compatibility of RCA with Filters and Subgrades in Highways. *Environmental Geotechnics*, 1–13.

Borges Cabrera, M., Satomi, T., & Takahashi, H. (2017). Study on Recycling of Waste Asphalt Blocks Containing Roadbed Materials Using New Screenless Separation Equipment with a Vibration Device. *International Journal of Pavement Research and Technology*, *10*(3), 228–244.

Bostanci, S. C., Limbachiya, M., & Kew, H. (2018). Use of Recycled Aggregates for Low Carbon and Cost Effective Concrete Construction. *Journal of Cleaner Production*, *189*, 176–196.

Braga, A. M., Silvestre, J. D., & de Brito, J. (2017). Compared Environmental and Economic Impact from Cradle to Gate of Concrete with Natural and Recycled Coarse Aggregates. *Journal of Cleaner Production*, *162*(2017), 529–543.

Bringezu, S. (2002). Towards Sustainable Resource Management in the European Union. In *Wuppertal Institute for Climate, Environment, Energy* (Issue 121).

Buzkan, C., & Erman, O. (2020). Yapısal Atıkların Geri Dönüşüm Sorunu ve Türkiye'deki Durumun Mevzuat Bakımından Değerlendirilmesi. *Doğal Afetler ve Çevre Dergisi*, *6*(1), 1–12.

Cardoso, R., Silva, R. V., Brito, de J., & Dhir, R. (2016). Use of Recycled Aggregates from Construction and Demolition Waste in Geotechnical Applications: A Literature Review. *Waste Management*, *49*, 131–145.

Cetin, B., Aydilek, A. H., & Guney, Y. (2010). Stabilization of Recycled Base Materials with High Carbon Fly Ash. *Resources, Conservation and Recycling*, *54*(11), 878–892.

Chang, I., Lee, M., & Cho, G. C. (2019). Global CO2 Emission-Related Geotechnical Engineering Hazards and the Mission for Sustainable Geotechnical Engineering. *Energies*, *12*(13).

Christopher, B. R., & Fischer, G. R. (1992). *Geotextile Filtration Principles, Practices and Problems*. 1–17.

Cooley, L. A., & Hornsby, H. (2012). *Evaluation of Crushed Concrete Base Strength.*

Coşkun, H., & Öztürk, M. (2012). Katı Atık Yönetimi Konusunda İnşaat Sektörü Paydaşlarının Algılamaları: Hatay İli Örneği. *New World Sciences Academy*, *7*(1), 299–310.

Dayioglu, A. Y., & Aydilek, A. H. (2019). Effect of pH and Subgrade Type on Trace-Metal Leaching from Steel-Slag Embankments into Groundwater. *Journal of Materials in Civil Engineering*, *31*(8).

Dayioglu, A. Y., Aydilek, A. H., Cimen, O., & Cimen, M. (2018). Trace Metal Leaching from Steel Slag Used in Structural Fills. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, *144*(12), 1–12.

Demir, İ. (2009). İnşaat ve Yıkıntı Atıklarının Beton Üretiminde Kullanımı ve Beton Özelliklerine Etkisi. *Demir/AKÜ Fen Bilimleri Dergisi*, *02*, 109–118.

Department of Transport and Main Roads. (2019). *Road Drainage*.

Diotti, A., Cominoli, L., Galvin, A. P., Sorlini, S., & Plizzari, G. (2021). Sustainable Recycling of Electric Arc Furnace Steel Slag as Aggregate in Concrete: Effects on the Environmental and Technical Performance. *Sustainability (Switzerland)*, *13*(521).

Dolez, P. I., & Blond, E. (2017). Evaluation of Geotextile Performance for the Filtration of Fine-Grained Tailings. *Geotechnical Frontiers*, *GSP 280*, 269–275.

Dondi, G., Mazzotta, F., Lantieri, C., Cuppi, F., Vignali, V., & Sangiovanni, C. (2021). Use of Steel Slag as an Alternative to Aggregate and Filler in Road Pavements. *Materials*, *14*(345), 1–13.

Engelsen, C. J., van der Sloot, H. A., & Petkovic, G. (2017). Long-Term Leaching from Recycled Concrete Aggregates Applied as Sub-Base Material in Road Construction. *Science of the Total Environment*, *587–588*, 94–101.

EPA. (2010). *Federal Environmental Requirements for Construction*.

Europen Environment Agency. (2016). *Country Profile Turkey 2015 Review of Material Resource Efficiency Policies in Europe*. *May*.

Evangelista, L., Guedes, M., De Brito, J., Ferro, A. C., & Pereira, M. F. (2015). Physical, Chemical and Mineralogical Properties of Fine Recycled Aggregates Made from Concrete Waste. *Construction and Building Materials*, *86*, 178–188.

Faure, Y. H., Baudoin, A., Pierson, P., & Plé, O. (2006). A Contribution for Predicting Geotextile Clogging During Filtration of Suspended Solids. *Geotextiles and Geomembranes*, *24*, 11–20.

Fischer, G. R., Holtz, R. D., & Christopher, B. R. (1990). Filter criteria based on pore size distribution. *Proceedings of the Fourth International Conference on Geotextiles, The Hague, The Netherlands*, 289 – 294.

Fischer, Gregory R., Maré, A. D., & Holtz, R. D. (1999). Influence of Procedural Variables on the Gradient Ratio Test. *Geotechnical Testing Journal*, *22*(1), 22–31.

Franks, C., Koebler, J., Myers, R., Hatipoglu, M., Davis, A. P., & Aydilek, A. H. (2015). Field Evaluation of a Geotextile Filter for Stormwater Runoff Control. *Geosynthetics International*, *22*(4), 288–300.

Gebremariam, A. T., Di Maio, F., Vahidi, A., & Rem, P. (2020). Innovative Technologies for Recycling End-of-Life Concrete Waste in the Built Environment. *Resources, Conservation and Recycling*, *163*(104911).

Geiseler, J. (1996). Use of Steelworks Slag in Europe. *Waste Management*, *16*(1–3), 59–63.

Giroud, J. P. (2010). Development of Criteria for Geotextile and Granular Filters. *9th International Conference on Geosynthetics - Geosynthetics: Advanced Solutions for a Challenging World, ICG 2010*, 45–64.

Gökalp, İ., Uz, V. E., Saltan, M., & Tutumluer, E. (2018). Technical and Environmental Evaluation of Metallurgical Slags as Aggregate for Sustainable Pavement Layer Applications. *Transportation Geotechnics*, *14*(2018), 61–69.

Gonzalez, R., & Chini, A. (2020). Using the Circular Economy to Manage Construction Waste. *EPiC Series in Built Environment*, *1*, 310–319.

Guo, J., Bao, Y., & Wang, M. (2018). Steel Slag in China: Treatment, Recycling, and Management. *Waste Management*, *78*, 318–330.

Haider, I., Cetin, B., Kaya, Z., Hatipoglu, M., Cetin, A., & Ahmet, H. A. (2014). Evaluation of the Mechanical Performance of Recycled Concrete Aggregates Used in Highway base layers. *Geo-Congress*, *234 GSP*, 3686–3694.

Hajdukiewicz, A., & Pera, B. Z. (2020). International Trade Disputes Over Renewable Energy—the Case of the Solar Photovoltaic Sector. *Energies*, *13*(500), 1–23.

Hasita, S., Hoy, M., Suddeepong, A., Horpibulsuk, S., Yeanyong, C., Arulrajah, A., & Mohammadinia, A. (2021). Performance and Toxic Leaching Evaluation of Dense-Graded Asphalt Concrete Using Steel Slag as Aggregate. *Journal of Materials in Civil Engineering*, *33*(1).

Hung, V. Q., Egodawatta, P., Gallage, C., & Dawes, L. (2017). Investigating Potential Environmental Issues of using Recycled Materials in Road Construction. *6th International Conference on Advances in Engineering and Technology*.

Husain, D., & Prakash, R. (2019). Ecological Footprint Reduction of Built Envelope in India. *Journal of Building Engineering*, *21*, 278–286.

Ioannidou, D., Meylan, G., Sonnemann, G., & Habert, G. (2017). Is Gravel Becoming Scarce? Evaluating the Local Criticality of Construction Aggregates. *Resources, Conservation and Recycling*, *126*, 25–33.

Jahren, C. T., & Dong, C. (2005). *Long-Term Performance of Cold In-Place Recycled Asphalt Roads*. Iowa State University.

Jullien, A., Proust, C., Martaud, T., Rayssac, E., & Ropert, C. (2012). Variability in the Environmental Impacts of Aggregate Production. *Resources, Conservation and Recycling*, *62*, 1–13.

Kabirifar, K., Mojtahedi, M., Wang, C., & Tam, V. W. Y. (2020). Construction and Demolition Waste Management Contributing Factors Coupled with Reduce, Reuse, and Recycle Strategies for Effective Waste management: A review. *Journal of Cleaner Production*, *263*.

Karadağ, H., Fırat, S., & Işık, N. S. (2020). Çelikhane Cürufunun Yol Temel ve Alttemel Malzemesi Olarak Kullanılması. *Politeknik Dergisi*, *23*(3), 799–812.

Kay, M. J., Kay, S. A., & Tuininga, A. R. (2018). Green Teams: A Collaborative Training Model. *Journal of Cleaner Production*, *176*, 909–919.

Kermani, B., Stoffels, S. M., & Xiao, M. (2020). Evaluation of Effectiveness of Geotextile in Reducing Subgrade Migration in Rigid Pavement. *Geosynthetics International*, *27*(1), 97–109.

Kermani, Behnoud, Xiao, M., Stoffels, S. M., & Qiu, T. (2018). Reduction of Subgrade Fines Migration into Subbase of Flexible Pavement Using Geotextile. *Geotextiles and Geomembranes*, *46*(4), 377–383.

Koerner, R. M., Lord, A. E., & Halse, Y. H. (1988). Long-Term Durability and Aging of Geotextiles. *Geotextiles and Geomembranes*, *7*(1), 147–158.

Kumar, S. (2019). Techno Trends: Recent Trends in Slag Management & Utilization in the Steel Industry. In *Minerals & Metals Review* (Vol. 71, Issue January).

Kutay, M. E., & Aydilek, A. H. (2005). Filtration Performance of Two-Layer Geotextile Systems. *Geotechnical Testing Journal*, *28*(1), 79–91.

Lafleur, J. (1999). Selection of Geotextiles to Filter Broadly Graded Cohesionless Soils. *Geotextiles and Geomembranes*, *17*(5–6), 299–312.

Lantieri, C., Quist, J., & Bocken, N. (2018). Circular Economy in the Building Sector: Three Cases and a Collaboration Tool. *Journal of Cleaner Production*, *176*, 976–989.

Li, L., Benson, C. H., Edil, T. B., & Hatipoglu, B. (2008). Sustainable Construction Case History: Fly Ash Stabilization of Recycled Asphalt Pavement Material. *Geotechnical and Geological Engineering*, *26*(2), 177–187.

Luettich, S. M., Giroud, J. P., & Bachus, R. C. (1992). *Geotextile Filter Design Guide*. 19–34.

Maddalena, R., Roberts, J. J., & Hamilton, A. (2018). Can Portland Cement be Replaced by Low-Carbon Alternative Materials? A Study on the Thermal Properties and Carbon Emissions of Innovative Cements. *Journal of Cleaner Production*, *186*, 933–942.

Maduabuchukwu Nwakaire, C., Poh Yap, S., Chuen Onn, C., Wah Yuen, C., & Adebayo Ibrahim, H. (2020). Utilisation of Recycled Concrete Aggregates for Sustainable Highway Pavement Applications; A Review. *Construction and Building Materials*, *235*.

Maharaj, C., White, D., Maharaj, R., & Morin, C. (2017). Re-Use of Steel Slag as an Aggregate to Asphaltic Road Pavement Surface. *Cogent Engineering*, *4*(1).

Mahedi, M., Cetin, B., & Dayioglu, A. Y. (2020). Effect of Cement Incorporation on the Leaching Characteristics of Elements from Fly Ash and Slag Treated Soils. *Journal of Environmental Management*, *253*.

McCulloch, T., Kang, D., Shamet, R., Lee, S. J., & Nam, B. H. (2017). Long-Term Performance of Recycled Concrete Aggregate for Subsurface Drainage. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, *31*(4), 1–8.

McIsaac, R., & Rowe, R. K. (2006). Effect of Filter-Separators on the Clogging of Leachate Collection Systems. *Canadian Geotechnical Journal*, *43*(7), 674–693.

Mijic, Z., Dayioglu, A. Y., Hatipoglu, M., & Aydilek, A. H. (2020). Hydraulic and Environmental Impacts of Using Recycled Asphalt Pavement on Highway Shoulders. *Construction and Building Materials*, *234*.

Miszkowska, A., Lenart, S., & Koda, E. (2017). Changes of Permeability of Nonwoven Geotextiles due to Clogging and Cyclic Water Flow in Laboratory Conditions. *Water (Switzerland)*, *9*.

Morata, M., & Saborido, C. (2017). Recycled Aggregates with Enhanced Performance for Railways Track Bed and Form Layers. *Journal of Sustainable Metallurgy*, *3*(2), 322–335.

Nam, B. H., An, J., & Youn, H. (2016). Accelerated Calcite Precipitation (ACP) Method for Recycled Concrete Aggregate (RCA). *Construction and Building Materials*, *125*, 749–756.

Nam, B. H., Behring, Z., Kim, J., & Chopra, M. (2014). *Evaluate the Use of Reclaimed Concrete Aggregate in French Drain Applications*. University of Central Florida.

NAPA. (2016). *Asphalt Pavement Industry Survey on Recycled Materials and Warm-Mix Asphalt Usage 2016*.

Netinger Grubeša, I., & Barišić, I. (2016). Environmental Impact Analysis of Heavy Metal Concentrations in Waste Materials Used in Road Construction. *Elektronički Časopis Građevinskog Fakulteta Osijek*, *13*, 23–29.

Noferini, L., Simone, A., Sangiorgi, C., & Mazzotta, F. (2017). Investigation on Performances of Asphalt Mixtures made with Reclaimed Asphalt Pavement: Effects of Interaction Between Virgin and RAP Bitumen. *International Journal of Pavement Research and Technology*, *10*(4), 322–332.

Ok, B., Sarici, T., Talaslioglu, T., & Yildiz, A. (2020). Geotechnical Properties of Recycled Construction and Demolition Materials for Filling Applications. *Transportation Geotechnics*, *24*.

Özkök, E., Davis, A. P., Asce, F., Aydilek, A. H., & Asce, M. (2016). Treatment Methods for Mitigation of High Alkalinity in Leachates of Aged Steel Slag. *Journal Environmental Engineering*, *142*(2).

Palmeira, E. M., Gardoni, M. G., & Bessa da Luz, D. W. (2005). Soil-Geotextile Filter Interaction under High Stress Levels in the Gradient Ratio Test. *Geosynthetics International*, *12*(4), 162–175.

Palmeira, Ennio M., Remigio, A. F. N., Ramos, M. L. G., & Bernardes, R. S. (2008). A Study on Biological Clogging of Nonwoven Geotextiles under Leachate Flow. *Geotextiles and Geomembranes*, *26*, 205–219.

Rahardjo, H., Satyanaga, A., Leong, E. C., & Wang, J. Y. (2013). Unsaturated Properties of Recycled Concrete Aggregate and Reclaimed Asphalt Pavement. *Engineering Geology*, *161*, 44–54.

Rahman, S. M. M., & Kim, J. (2020). Circular Economy, Proximity, and Shipbreaking: A Material Flow and Environmental Impact Analysis. *Journal of Cleaner Production*, *259*.

Raymond, A. J., Kendall, A., & Jason, T. D. (2020). Life Cycle Sustainability Assessment (LCSA): A Research Evaluation Tool for Emerging Geotechnologies. *Geo-Congress 2020 GSP 320*, 141–149.

Raza, F., Alshameri, B., & Jamil, S. M. (2021). Assessment of Triple Bottom Line of Sustainability for Geotechnical Projects. *Environment, Development and Sustainability*, *23*, 4521–4558.

Ryoo, S. C., & Aydilek, A. H. (2020). Hydraulic Compatibility of Geotextile-Compost Systems in Landfill Covers. *Geosynthetics International*, *27*(1), 48–64.

Sabiri, N. E., Caylet, A., Montillet, A., Le Coq, L., & Durkheim, Y. (2020). Performance of Nonwoven Geotextiles on Soil Drainage and Filtration. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, *24*(5), 670–688.

Sandanayake, M., Zhang, G., & Setunge, S. (2019). Estimation of Environmental Emissions and Impacts of Building Construction – A Decision Making Tool for Contractors. *Journal of Building Engineering*, *21*, 173–185.

Sanger, M., Natarajan, B. M., Wang, B., Edil, T., & Ginder-Vogel, M. (2020). Recycled Concrete Aggregate in Base Course Applications: Review of Field and Laboratory Investigations of Leachate pH. *Journal of Hazardous Materials*, *385*.

Smith, T. W. (1967). *Karayollarında Yeraltı Sularının Kontrolü*.

Sochanik, R. (2020). *Geotechnical Sustainability in the United Arab Emirates – Sustainability Rating Tools*. *3*, 7–24.

Soleimanbeigi, A., & Edil, T. B. (2015). Compressibility of Recycled Materials for Use as Highway Embankment Fill. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, *141*(5), 1–14.

T.C. Çevre Ve Şehircilik Bakanlığı. (1991). *Çevre Kanunu*.

T.C. Çevre Ve Şehircilik Bakanlığı. (2004a). *Hafriyat Toprağı, İnşaat ve Yıkıntı Atıklarının Kontrolü Yönetmeliği*. T.C. Çevre ve Orman Bakanlığı.

T.C. Çevre Ve Şehircilik Bakanlığı. (2004b). Hafriyat Toprağı, İnşaat Ve Yıkıntı Atıklarının Kontrolü Yönetmeliği. *Resmî Gazete Tarihi: 18.03.2004 Resmî Gazete Sayısı: 25406*.

T.C. Çevre Ve Şehircilik Bakanlığı. (2020a). *Sıfır Atık Yönetim Sistemi Uygulama Kılavuzu*. 1–24.

T**.C. Karayolları Genel Müdürlüğü.** (2013). *Karayolları Teknik Şartnamesi 2013*.

Tanyu, B. F. (2012). *Evaluation of Use of Recycled Concrete as an Additive to Base Coarse/Subbase Material in Virginia Department of Transportation Projects*. George Mason University.

Tavakoli Mehrjardi, G., Azizi, A., Haji-Azizi, A., & Asdollafardi, G. (2020). Evaluating and Improving the Construction and Demolition Waste Technical Properties to Use in Road Construction. *Transportation Geotechnics*, *23*.

Teo, P. Ter, Zakaria, S. K., Salleh, S. Z., Taib, M. A. A., Sharif, N. M., Seman, A. A., Mohamed, J. J., Yusoff, M., Yusoff, A. H., Mohamad, M., Masri, M. N., & Mamat, S. (2020). Assessment of Electric Arc Furnace (EAO) Steel Slag Waste's Recycling Options into Value Added Green Products: A Review. *Metals*, *10*, 1–21.

The U.S. EPA Municipal and Industrial Solid Waste Division Office of Solid Waste. (1998). *Characterization of Building-Related Construction and Demolition Debris in the United States*.

Thives, L. P., & Ghisi, E. (2017). Asphalt Mixtures Emission and Energy Consumption: A Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *72*, 473–484.

TSE. (2017). TS EN 13242 + A1 İnşaat Mühendisliği İşleri Ve Yol Yapımında Kullanılan Bağlayıcısız Ve Hidrolik Bağlayıcılı Malzemeler İçin Agregalar. *Türk Standartlar Enstitüsü*, *15189*(112).

U.S. Environmental Protection Agency. (2020). *Historical Recycled Commodity Values*. *July*, 1–5.

United States Environmental Protection Agency (EPA). (2020). *Recycling Economic Information Report*.

UNO Environment. (2019). *Global Resources Outlook 2019 Natural Resources for the Future We Want*.

Uysal, F. F., & Bahar, S. (2018). Cüruf Çeşitleri ve Kullanım Alanları. *Trakya Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, *19*(1), 37–52.

Val, B., & Orman, E. V. E. (2005). *Çevre Durum Raporu*.

Wang, G. C. (2020). *Mathematical and Mechanical Modeling of Steel Slag Coarse Aggregate in Concrete*. *September*, 1–12.

Worldsteel Association. (2014). World Steel in Figures 2016. *World Steel Associatiom*, 3–30.

Wu, H., Yao, C., Li, C., Miao, M., Zhong, Y., Lu, Y., & Liu, T. (2020). Review of Application and Innovation of Geotextiles in Geotechnical Engineering. *Materials*, *13*, 1–21.

Yildirim, I. Z., & Prezzi, M. (2011). Chemical, Mineralogical, and Morphological Properties of Steel Slag. *Advances in Civil Engineering*.

Zaumanis, M., Mallick, R. B., & Frank, R. (2016). 100% Hot Mix Asphalt Recycling: Challenges and Benefits. *Transportation Research Procedia*, *14*, 3493–3502.

Zornberg, J. G., Azevedo, M., Sikkema, M., & Odgers, B. (2017a). Geosynthetics with Enhanced Lateral Drainage Capabilities in Roadway Systems. *Transportation Geotechnics*, *12*, 85–100.

Zornberg, J. G., Azevedo, M., Sikkema, M., & Odgers, B. (2017b). Transportation Geotechnics Geosynthetics with Enhanced Lateral Drainage Capabilities in Roadway Systems. *Transportation Geotechnics*, *12*, 85–100.

ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad **:** Ayşegül BAYIN SARIAHMETOĞLU

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** **:** 2007, Cumhuriyet Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü
- **Yükseklisans** **:** 2011, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği

DOKTORA TEZİNDEN TÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- **Sarıahmetoğlu, A.B.,** İyisan R., Dayıoğlu, A.Y., Hatipoğlu M. 2021. Geri Kazanılmış Asfalt Malzemenin Uzun Süreli Filtrasyon Performansı, Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi