

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

GERİ DÖNÜŞTÜRÜLMÜŞ BETON MALZEMESİNİN FİLTRASYON
ÖZELLİKLERİNİN DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mehmet Halil ÇALIM

ARALIK 2024

TRABZON



KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**GERİ DÖNÜŞTÜRÜLMÜŞ BETON MALZEMESİNİN FİLTASYON
ÖZELLİKLERİNİN DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ**

Mehmet Halil ÇALIM

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünce
"İNŞAAT YÜKSEK MÜHENDİSİ"
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 26 / 11 / 2024

Tezin Savunma Tarihi : 12 / 12 / 2024

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Sabriye Banu İKİZLER

İkinci Danışman : Doç. Dr. Ashı YALÇIN DAYIOĞLU

Trabzon 2024

ÖNSÖZ

“Geri Dönüştürülmüş Beton Malzemesinin Filtrasyon Özelliklerinin Deneysel Olarak İncelenmesi” isimli bu tez Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Programı’nda hazırlanmıştır.

Tez çalışmam boyunca hiçbir desteğini esirgemeyen ve bilim insanı olma yolundaki ilk adımlarımı atarken kıymetli bilgileriyle ve tecrübesiyle yolumu aydınlatan danışman hocam Sayın Prof. Dr Sabriye Banu İKİZLER’e ve eş danışman hocam Doçent Dr. Aslı YALÇIN DAYIOĞLU’na teşekkürü bir borç bilirim. Ayrıca, yapıcı eleştirileri ve önerileri ile tezime büyük katkıları bulunan saygıdeğer hocalarım Sayın Dr. Öğretim Üyesi Mustafa HATİPOĞLU’na ve Sayın Öğretim Görevlisi Doktor Ayşegül BAYIN SARIAHMETOĞLU hocalarıma teşekkür ediyorum. Eğitim öğretim hayatımda katkısı olan tüm hocalarıma, ortak olarak çalışmalar yürüttüğümüz ve tez çalışması süresinde de hiçbir yardımdan kaçınmayan meslektaşım Arş. Gör. Bilal KORKMAZ’a ve geotekstillere temini konusunda İSTANBUL TEKNİK firmasına teşekkür ederim.

Tez çalışması sürecinde bana desteklerini esirgemeyen İnşaat Mühendisliği Bölümü’ndeki tüm değerli hocalarıma ve asistan arkadaşlarıma teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak, doğduğum günden beri elimi hiç bırakmayan, hayatım boyunca aldığım tüm kararlarda bilgi ve tecrübelerinden faydalandığım ve her kararında arkamda olan, maddi ve manevi desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen ve bugünlere gelmemde en büyük paya sahip olan annem Ayşe ÇALIM, babam Faruk Fırat ÇALIM ve kardeşim Emre Kaan ÇALIM’a teşekkür eder, minnettarlığımı sunarım.

Bu tez çalışmasının bundan sonraki çalışmalara katkı sağlamasını temenni ederim.

Mehmet Halil ÇALIM

Trabzon 2024

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Geri Dönüştürülmüş Beton Malzemesinin Filtrasyon Özelliklerinin Deneysel Olarak İncelenmesi” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Prof. Dr. Sabriye Banu İKİZLER’ in sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 12/12/2024

Mehmet Halil ÇALIM

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET	VII
SUMMARY	VIII
ŞEKİLLER DİZİNİ	IX
TABLolar DİZİNİ.....	XII
SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ	XIII
1. GENEL BİLGİLER	1
1.1. Giriş.....	1
1.2. İnşaat ve Yıkıntı Atıkları	3
1.3. Geri Dönüşüm ve Sürdürülebilirlik.....	5
1.4. İnşaat ve Yıkıntı Atıklarının İnşaat Mühendisliğine Kullanımı.....	7
1.5. Karayollarında Drenaj Sistemleri.....	9
1.6. Yol Altı Drenaj Sistemlerinde Kullanılan Atıklar.....	11
1.6.1. Geri Dönüştürülmüş Asfalt Agregası.....	12
1.6.2. Çelik Cürufu.....	13
1.6.3. Geri Dönüştürülmüş Beton Malzeme	16
1.7. Geosentetikler.....	21
1.8. Karayollarında Kullanılan Geçirimlilik Deneyleri.....	25
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	32
2.1. Deneysel Çalışmada Kullanılan Malzemeler	32
2.1.1. Geri Dönüştürülmüş Beton Agregası	32
2.1.2. Örgüsüz Geotekstil.....	36
2.2. Deneysel Yöntem	39
2.2.1. Geliştirilmiş Uzun Süreli Filtrasyon Deneyi.....	43
2.2.2. Filtrasyon Deneyi Sonrası Numune Üzerine Elek Analizi Deneyi.....	54
3. BULGULAR VE TARTIŞMA	55
3.1. GT1 - RCA Sistemi Filtrasyon Performansı	56
3.2. GT2 - RCA Sistemi Filtrasyon Performansı	62

3.3. GT3 - RCA Sistemi Filtrasyon Performansı	67
3.4. Geotekstil Göz Açıklığının Filtrasyon Performansı Üzerindeki Etkisi.....	73
4. SONUÇLAR.....	75
5. ÖNERİLER.....	77
6. KAYNAKLAR	78
ÖZGEÇMİŞ	



Yüksek Lisans Tezi

ÖZET

GERİ DÖNÜŞTÜRÜLMÜŞ BETON MALZEMESİNİN UZUN SÜRELİ FİLTASYON ÖZELLİKLERİNİN DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ

Mehmet Halil ÇALIM

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. Sabriye Banu İKİZLER
2024, 86 Sayfa

Çalışmada, yıkıntı atıklarından biri olan beton malzemesinin yol altı drenaj sistemlerinde kullanılmak üzere yeterliliği deneysel yöntemlerle incelenmiştir. Beton atıklarının geri dönüştürülmesiyle elde edilen geri dönüştürülmüş beton agregası (RCA) ve filtrasyon performansını iyileştiren örgüsüz geotekstilden oluşan drenaj sisteminin zamana bağlı filtrasyon performansı ve tıkanma durumunu incelenmek için *ASTM D 5101 (2023)* standardı temel alınarak geliştirilip, imalatı yeniden yaptırılmıştır. Geliştirilen deney sisteminde uzun süreli filtrasyon (LFT) deneyleri gerçekleştirilmiştir. LFT deneyi ile RCA-geotekstil sisteminde su akışının yarattığı ince dane malzeme göçüne bağlı olarak tıkanmalar yaşanmaya başlaması beklenmektedir. Buna rağmen, yaşanan tıkanmaların, şartnameler içerisinde yer alan tıkanma sınırlarının içerisinde kalacağı ve buna bağlı olarak doğal agrega (NA) yerine RCA kullanılabileceği hipotez edilmektedir. Farklı hidrolik eğimler altında gerçekleştirilen deneylerde RCA-geotekstil sisteminin tıkanma performansını incelemek amacıyla hidrolik eğim oranı (*GR*) ve geçirimsizlik oranı (*KR*) değerleri belirlenmiştir. Yapılan deneylerden elde edilen veriler ışığında, RCA'ların performansının NA'lar ile kabul edilebilir seviyede karşılaştırılabilir olduğu ve RCA'ların kullanılması ile atık malzemelerin depolama sorununa pozitif katkı sağlayacağı, çevreye verilen zararın azaltılabileceği ve sürdürülebilir malzeme yönetimine (*SMM*) katkıda bulunabileceği görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Geri Dönüştürülmüş Malzeme, Filtrasyon, Geçirimsizlik, *ASTM D 5101*, *GR*, *KR*

MSc. Thesis

SUMMARY

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF LONG-TERM FILTRATION PROPERTIES OF RECYCLED CONCRETE MATERIAL

Mehmet Halil ÇALIM

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Civil Engineering Graduate Program
Supervisor: Prof. Sabriye Banu IKIZLER
2024, 86 Pages

In this study, the adequacy of concrete material, which is one of the demolition wastes, for use in under-road drainage systems was investigated by experimental methods. The drainage system consisting of recycled concrete aggregate (RCA) obtained by recycling concrete wastes and non-woven geotextile, which improves filtration performance, was developed and manufactured based on the *ASTM D 5101* (2023) standard to examine the time-dependent filtration performance and clogging status. Long-term filtration (LFT) experiments were carried out in the developed test system. With the LFT experiment, it is expected that the RCA-geotextile system will start to experience clogging due to fine grain material migration caused by water flow. However, it is hypothesized that the clogging will remain within the clogging limits specified in the specifications and therefore RCA can be used instead of natural aggregate (NA). The hydraulic gradient ratio (*GR*) and permeability ratio (*KR*) values were determined to examine the clogging performance of the RCA-geotextiles system in the experiments conducted under different hydraulic gradients. In the light of the data obtained from the experiments, it was observed that the performance of RCAs is comparable to that of NA's at an acceptable level and that the use of RCAs can contribute positively to the storage problem of waste materials, reduce environmental damage and contribute to sustainable materials management (*SMM*).

Key Words: Recycled Material, Filtration, Permeability, ASTM D 5101, GR, KR

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1. Örnek drenaj yöntemleri	10
Şekil 2. RCA'ların elementsel bileşimi	18
Şekil 3. Geotekstillerin geoteknik mühendisliğinde aplikasyonları	23
Şekil 4. Sabit seviyeli permeabilite deney sistemi.....	27
Şekil 5. Uzun süreli filtrasyon deney sistemi.....	28
Şekil 6. Elenmemiş RCA malzemesi	34
Şekil 7. Depolanan RCA malzemesi.....	34
Şekil 8. Dane boyutlarına göre ayrılmış RCA malzemesi	35
Şekil 9. RCA malzeme reçetesinin dane çapı dağılımı.....	35
Şekil 10. Deneylerde kullanılan geotekstillerin üstten görünümü	36
Şekil 11. Çalışmada kullanılan geotekstillerin yandan görünümü.....	37
Şekil 12. Laboratuvar ortamında depolanan numuneler	40
Şekil 13. Reçetelerin hazırlanması.....	40
Şekil 14. Numune üst kalıbının sökülmesi	41
Şekil 15. Manometre girişlerinin örtülmesi	42
Şekil 16. Geotekstilin sistemin tabanına yerleştirilmesi	43
Şekil 17. Tamamı PVC'den imalatı yaptırılan deney sistemi.....	45
Şekil 18. Sızdırmazlık için kullanılan farklı ürünler.....	46
Şekil 19. Sızdırmazlığın sağlanması için kullanılan lastikler ve kelepçe	46
Şekil 20. Sakız bantla desteklenmiş kalıp.....	46
Şekil 21. Pleksiglastan imalatı yaptırılmış, geliştirilmiş filtrasyon deney sisteminin kalıpları.....	47
Şekil 22. Tamamı PVC'den imalatı yaptırılmış, geliştirilmiş filtrasyon deney sisteminin kalıpları.....	47
Şekil 23. Pleksiglas su tankı ve şamandıra	48
Şekil 24. Şebeke suyu filtrasyon elemanları	48
Şekil 25. Pleksiglas sisteme giriş kabı	49
Şekil 26. Pleksiglas sistemden çıkış kabı.....	49
Şekil 27. Deney sisteminden çıkan fazla suyun tahliyesi	50
Şekil 28. Giriş ve çıkış aparatları.....	50
Şekil 29. Manometre portlarının konumları.....	51

Şekil 30.	Karadeniz Teknik Üniversitesi Geoteknik laboratuvarına kurulan filtrasyon deney sistemi	53
Şekil 31.	Deney sonrası 5 tabakada çıkartılan RCA numunesi	54
Şekil 32.	Deney sonrası kalıptan çıkarılan geotekstil	54
Şekil 33.	GR parametresinin GT1 - RCA sistemi için zamana bağlı değişim grafiği.....	57
Şekil 34.	k_{sistem} parametresinin GT1 - RCA sistemi için zamana bağlı değişim grafiği.....	57
Şekil 35.	k_{agrega} parametresinin GT1 - RCA sistemi için zamana bağlı değişim grafiği.....	58
Şekil 36.	KR parametresinin GT1 - RCA sistemi için zamana bağlı değişim grafiği.....	58
Şekil 37.	GT1 - RCA sistemi için hidrolik eğime bağlı GR parametrelerinin değişimi.....	60
Şekil 38.	GT1 - RCA sistemi için hidrolik eğime bağlı KR parametrelerinin değişimi.....	60
Şekil 39.	GT1 - RCA sistemi için GR4 parametresine bağlı KR parametresinin değişimi.....	61
Şekil 40.	GT1 - RCA sistemin granülometre eğrileri	61
Şekil 41.	GR parametresinin GT2 - RCA sistemi için zamana bağlı değişim grafiği.....	62
Şekil 42.	k_{sistem} parametresinin GT2 - RCA sistemi için zamana bağlı değişim grafiği.....	63
Şekil 43.	k_{agrega} parametresinin GT2 - RCA sistemi için zamana bağlı değişim grafiği.....	63
Şekil 44.	KR parametresinin GT2 - RCA sistemi için zamana bağlı değişim grafiği.....	64
Şekil 45.	GT2 - RCA sistemi için hidrolik eğime bağlı GR parametrelerinin değişimi.....	65
Şekil 46.	GT2 - RCA sistemi için hidrolik eğime bağlı KR parametrelerinin değişimi.....	66
Şekil 47.	GT2 - RCA sistemi için KR parametresinin GR4 parametresine bağlı değişimi.....	66
Şekil 48.	GT2 - RCA sisteminin granülometre eğrileri	67
Şekil 49.	GR parametresinin GT3 - RCA sistemi için zamana bağlı değişim grafiği.....	68
Şekil 50.	k_{sistem} parametresinin GT3 - RCA sistemi için zamana bağlı değişim grafiği.....	68
Şekil 51.	k_{agrega} parametresinin GT3 - RCA sistemi için zamana bağlı değişim grafiği.....	69

Şekil 52.	KR parametresinin GT3 - RCA sistemi için zamana bağlı değişim grafiği.....	69
Şekil 53.	GT3 - RCA sistemi için hidrolik eğime bağlı GR parametrelerinin değişimi.....	71
Şekil 54.	GT3 - RCA sistemi için hidrolik eğime bağlı KR parametrelerinin değişimi.....	71
Şekil 55.	GT3 - RCA sistemi için GR4 değerine bağlı KR parametrelerinin değişimi.....	72
Şekil 56.	GT3 - RCA sisteminin granülometre eğrileri	72
Şekil 57.	Farklı göz açıklıklarına sahip geotekstil sistemlerinin hidrolik eğime bağlı GR4 parametresindeki değişimi	73
Şekil 58.	Farklı göz açıklıklarına sahip geotekstil sistemlerinin hidrolik eğime bağlı KR parametresindeki değişimi	74

TABLolar DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1. KTŞ’de verilen filtrasyon ve permeabilite kriterleri	11
Tablo 2. KTŞ’de verilen kabul edilebilir malzemelerin dane çapı dağılımı	12
Tablo 3. elik cürufunun özelliklerine göre uygulama alanları	14
Tablo 4. Literatürde yapılan uzun süreli filtrasyon deneyleri.....	31
Tablo 5. Geri dönüştürölmüş beton agregasının endeks özellikleri.....	33
Tablo 6. Geri dönüştürölmüş beton agregasının fiziksel özellikleri	33
Tablo 7. Geotekstilin fiziksel mekanik ve hidrolik özellikleri.....	38
Tablo 8. Reçetesi hazırlanan RCA numunesinin elek üstünde kalan ağırlıkları.....	42
Tablo 9. Standart ve geliştirilmiş deney sistemlerinin karşılaştırması.....	44
Tablo 10. GR parametrelerinin GT1 - RCA sistemi için hidrolik eğime bağlı değişim tablosu	59
Tablo 11. K parametrelerinin GT1 - RCA sistemi için hidrolik eğime bağlı değişim tablosu	59
Tablo 12. GR parametrelerinin GT2 - RCA sistemi için hidrolik eğime bağlı değişim tablosu	64
Tablo 13. K parametrelerinin GT2 - RCA sistemi için hidrolik eğime bağlı değişim tablosu	65
Tablo 14. GR parametrelerinin GT3 - RCA sistemi için hidrolik eğime bağlı değişim tablosu	70
Tablo 15. K parametrelerinin GT3 - RCA sistemi için hidrolik eğime bağlı değişim tablosu	70

SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<i>AASTO</i>	: American Association of State Highway and Transportation Officials
<i>AOS</i>	: Görünür açıklık boyutu
<i>ASTM</i>	: American Society for Testing Materials
<i>BZSS</i>	: Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemi
<i>CBR</i>	: California Bearing Ratio
<i>EAO</i>	: Elektrik Ark Ocağı
<i>EPA</i>	: Environmental Protection Agency
<i>NG</i>	: Örgüsüz geotekstil
<i>NA</i>	: Doğal agrega
<i>İDO</i>	: İnce dane oranı
<i>KTŞ</i>	: Karayolları teknik şartnamesi
<i>LFT</i>	: Uzun süreli filtrasyon deneyi
<i>WG</i>	: Geri dönüştürülmüş asfalt malzeme
C_c	: Derecelenme katsayısı
C_u	: Uniformluk katsayısı
<i>GR</i>	: Hidrolik eğim oranı
<i>KR</i>	: Geçirimsizlik katsayısı
<i>i</i>	: Hidrolik eğim
i_{agrega}	: Agreganın hidrolik eğimi
i_{sistem}	: Sistemin hidrolik eğimi
K_{agrega}	: Agreganın geçirimsizlik katsayısı
K_{sistem}	: Sistemin geçirimsizlik katsayısı
<i>WOPT</i>	: Optimum su muhtevası
γ_{kmax}	: Maksimum kuru birim hacim ağırlık

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Gelişen ve küreselleşen dünyamızda, toplumların artan ve değişen ihtiyaçları, doğada sınırlı olan kaynaklarımızın geri kazanılamayacak bir hızla tüketilmesine yol açmaktadır. Küresel çapta yaşanan büyük ölçekli tüketimin bir sonucu olarak, inşaat ve yıkım faaliyetlerinden kaynaklanan atıklar her yıl milyonlarca ton seviyesine ulaşmaktadır (Environmental Protection Agency, 2020). Ortaya çıkan inşaat ve yıkım atıkları, birçok geri dönüştürülebilir veya geri kazanılabilir malzeme barındırmaktadır. Ülkemizde ve sürdürülebilirliğe önem veren diğer ülkelerde, bu atıkların hammadde olarak yeniden kullanılması; doğal kaynakların korunması, küresel ısınma, inşaat ve yıkıntı atıklarının depolama krizi ve ekonomiye olumlu katkısı artık bir seçenek değil, zorunluluk haline gelmiştir. Bu bağlamda, geri dönüştürülmüş veya geri kazanılmış malzemelerin ziyan edilmek yerine yeniden kullanması, sürdürülebilirlik ilkesinin hayata geçirilmesi için büyük önem taşımaktadır (Kabirifar vd., 2020).

İnşaat ve yıkım işlemlerinden ortaya çıkan atık malzemelerinin geoteknik mühendisliği uygulamalarında tekrardan kullanılması, gün geçtikçe artan çevre kirliliği ve sınırlı bulunan doğal kaynakların muhafazası hususuna dikkat çekilmesi ve ekonomik getirisi sebebiyle bilimsel çalışmalara konu olmuştur (Arulrajah vd., 2012; Bestgen vd., 2016; Ok vd., 2020). Geoteknik uygulamalarda inşaat ve yıkıntılardan ortaya çıkan atıkların toplanıp, geri dönüştürülüp yeniden kullanılması çevresel anlamda birçok yarara sahiptir. Örneğin karayollarında kullanılan drenaj sistemlerindeki agregalar genellikle kırmataş (doğal kaynaklardan) tercih edilmektedir. Ancak doğal agregaların tercih edilmesi hem doğada sınırlı miktarda bulunan kaynaklarımızın tükenmesine hem de doğal kaynakların kullanılabilmesi için gerekli işlemler sonucu ortaya çıkan zararlı emisyonlar sebebiyle çevreye negatif etki etmektedir. İnşaat ve yıkım işlerinden ortaya çıkan atıkların dönüştürülüp tekrardan kullanılması, NA'ların geoteknik işlerde kullanılmasına önemli bir alternatif olarak karşımıza çıkmaktadır. İnşaat ve yıkım işlerinden ortaya çıkan atıkların geri dönüştürülerek drenaj sistemlerinde tekrardan kullanılması, atıkların depolanacağı alanları daha efektif kullanmamıza fırsat vermekle beraber doğada sınırlı miktarlarda bulunan kaynakların korunması hususunda da katkıda bulunmaktadır. Böylelikle inşaat ve yıkıntı

atıklarının yeniden kullanılmasıyla çevresel hasarın azaltılmasına ve sürdürülebilirliğe pozitif katkıda bulunulması beklenmektedir (Mehrijardi vd., 2020; Behera vd., 2014).

Drenaj sistemleri, çelik, asfalt, betonarme gibi her türlü yapı malzemesiyle inşa edilmiş yapıların, hizmet ömrü boyunca güvenli ve tasarım sırasında planlanmış performansında çalışabilmeleri açısından kritik bir öneme sahiptir. Karayollarında da bu durum farklı değildir. Yol altı ve yol üstü drenaj sistemlerinin varlığı sayesinde yol yapıları, hizmet ömrü sürecince tasarıma uygun olarak görevini sürdürmektedir. Karayollarında kullanılan drenaj sistemlerinin etkinliği ve dayanıklılığı, kullanılan dolgu malzemesinin dane boyut dağılımı ile geçirgenlik katsayısına (k) doğrudan bağlıdır. Sistemde, zamana ve hidrolik eğime bağlı oluşan ince dane göçü sebebiyle kısmi tıkanmalar yaşanabilir. Bu durum, yol altlarında kullanılan RCA-NG bileşenlerinden oluşan drenaj sisteminin filtrasyon performansını olumsuz etkileyebilir. Filtrasyon performansının negatif etkilenmesi halinde yapı, planlanan servis ömrü boyunca arzu edilen performansı gösteremeyebilir. Bu sebeple tasarımı veya uygulaması iyi yapılmamış, uygulama sırasında gerekli kontrolleri veya bakımı yapılmamış drenaj sistemleri, görevini yerine getiremeyerek karayollarında ciddi problemlere yol açmakta ve bu sebeple ulaşım konusunda sorunlar yaşanmaktadır. Bu sebeple, drenaj sistemlerinin tasarımı yapılırken; sistemin hidrolik eğimine, kullanılan agrega malzemesinin türüne, yağış rejimine, geotekstil hidrolik iletkenliğine ve göz açıklığına dikkat edilmelidir. Aksi takdirde karayollarının sık bakıma girmesi sebebiyle oluşacak trafik yoğunluğu ve konforsuzluk, yolu yenilemek için kullanılan ham madde zaiyatı, yolun yenilenmesi sırasında oluşan atıkların depolama sorunu, yol yenilenirken kullanılan maddi kaynakların zaiyatı, yolun tasarlanan performansta çalışmamasından ötürü mal ve can kayıpları yaşanması beklenmektedir.

Yol altı drenaj sistemlerinde kullanılan örgüsüz geotekstiller, birçok araştırmacı tarafından incelenmiştir. Bu geosentetik malzemeler, çeşitli araştırmalarda farklı açılardan incelenmiş ve değerlendirilmiştir (Dolez ve Blond, 2017; Miszkowaska vd., 2017; Kermani vd., 2018). Örgüsüz geotekstiller (NG) RCA'larla birlikte kullanılarak yol altı drenaj sistemleri oluşturulmaktadır. Bahsi geçen RCA-NG sisteminin tıkanma davranışı ve filtrasyon performansı, uzun süreli filtrasyon deneyleri ile ASTM D 5101 (2023) standardına uygun olarak incelenmektedir. ASTM D 5101 (2023) standardında tanımlanan geçirimsizlik oranı (KR) ve hidrolik eğim oranı (GR) sistemin tıkanma durumunun ve filtrasyon performansının en önemli göstergeleridir. Zamanla ve su akışının etkisiyle ince daneli malzemenin, su akış yönünde geotekstil yüzeyine doğru hareket ederek geotekstil ve agrega

arayüzünde birikime yol açtığı gözlemlenmiştir. Bu birikimin zamanla tıkanmaya neden olabileceği anlaşılmıştır (Faure vd., 2004). Bu sebeple geotekstilin göz açıklığı ve hidrolik iletkenliği, yolun dizaynı sırasında doğru seçilmeli ve agregayla olan etkileşimi incelenmelidir.

Bu amaçla çalışmada, sürdürülebilirliği teşvik etmek, doğal kaynakların korunmasını sağlamak, enerji verimliliğini arttırmak ve milli servetin korunması amacıyla, RCA malzemesinin geotekstillerle beraber drenaj sistemlerinde kullanım potansiyeli deneysel yöntemlerle incelenmiştir. Yapılan deneylerde, literatürden farklı olarak, yol altı drenaj sistemlerinde karşılaştırılması daha muhtemel, gerçeğe daha yakın olan hidrolik eğim değerleri ($i = 0.33$, $i = 0.66$ ve $i = 1$) hidrolik eğimleri tercih edilmiştir. Ayrıca literatürle karşılaştırmak adına $i = 2,5$ ve $i = 5$ hidrolik eğimleri de çalışmaya eklenmiştir. Geliştirilmiş LFT sisteminde yapılan deneylerde, sistemin potansiyel tıkanma mekanizması ve buna bağlı parametreleri incelenmiştir. RCA ve geotekstil ile oluşturulan drenaj sisteminin, doğal malzeme kullanılarak oluşturulan sistemle kabul edilebilir derecede karşılaştırılabileceği görülmüştür.

1.2. İnşaat ve Yıkıntı Atıkları

Dünya Bankası raporuna göre, 2018 yılında 2,01 milyar ton olan küresel atık üretiminin, 2050 yılına kadar 3,40 milyar tona ulaşacağı öngörülmektedir. Andeobu vd. (2022) yaptıkları çalışmada yetersiz atık yönetiminin, çevresel bozulmanın ve çevresel tehlikelerin başlıca sebeplerinden biri olduğunu, bunun da ciddi sağlık sorunlarına yol açabileceğini belirtmektedir. Atık sorunu, inşaat sektörü için de ciddi bir endişe kaynağıdır. Fatemi ve İmaninasab (2016)'ya göre inşaat sektörü, katı atık üretiminin başlıca kaynakları arasındadır. İnşaat sektörü üretilen toplam atığın %36'sından sorumlu olmaktadır. Bu da yaklaşık yılda 2,5 ila 3,5 milyar ton arasında değişmektedir (ISWA, 2015). İnşaat ve yıkıntı sırasında ortaya çıkan atıkların tamamına inşaat ve yıkıntı atıkları (İYA) denilmektedir. Hızlı kentleşme, binaların ve altyapıların inşa edilmesiyle yaşam kalitesini artırmış olsa da aynı zamanda İYA'ların miktarında önemli bir artışa neden olmuştur (Zhang vd., 2021). Küresel nüfus arttıkça bina sayısının artacağı ve eski yapıların yıkılacağı, bunun da kaçınılmaz olarak İYA üretimini artıracığı öngörülmektedir (Wang vd., 2020). İnşaat ve yıkım atıklarının (İYA) yeniden kullanılması, atık depolama sahalarının yetersizliği gibi ciddi sorunlara etkili bir çözüm sunmaktadır. İYA'ların tekrardan kullanılması, depolama alanlarına olan ihtiyacı

azaltarak çevreye verilen zarar hafifletmekte ve aynı zamanda atıkların yeniden ekonomiye kazandırılmasını sağlamaktadır. Atık depolama sahalarına olan ihtiyaç özellikle de gelişmekte olan ülkelerde hızla artmaktadır. Örneğin, İngiltere yılda yaklaşık 138 milyon ton İYA üretmektedir. Bu da toplam atığın üçte ikisine tekabül etmektedir (DEFRA, 2023). Avrupa Birliği ülkeleri yılda 800 milyon tondan fazla İYA üretmekte ve bu da toplam üretilen atığın atığın %25-30'unu oluşturmaktadır. Körfez İş birliği Konseyi ülkeleri ise yıllık 66 milyon ton atık üretmekte ve bu, toplam atığın %55'ini oluşturmaktadır (Ouda vd., 2018). Çin 1,5 milyar ton ve ABD 2017 yılında 569 milyon ton İYA üretmektedir (Chang vd., 2018). 2012 senesinde 6306 sayılı Afet Riski Altındaki Alanların Dönüştürülmesi Hakkında Kanun'un yönetmeliğe girmesiyle birlikte her yıl ülkemiz yaklaşık yılda 10 milyon ton İYA üretmektedir. Artan atık üretimi, geri dönüştürülmeyen inşaat ve yıkım atıklarının depolanması için atık depolama alanına duyulan ihtiyacı arttırmaktadır. İYA'ların tekrardan kullanılmasıyla bu soruna çözüm getirilebileceği düşünülmektedir.

Bir diğer ciddi tehdit ise doğal kaynaklarımızın hızla tükenmesidir. İYA'lar, küresel doğal kaynakların, özellikle yenilenemeyen enerji ve malzemelerin tükenmesinde önemli bir rol oynamaktadır. İnşaat faaliyetleri küresel kaynakların %35'ini, çeliğin %25'ini, suyun %12'sini ve yapı malzemelerinin (kum çakıl vd.) %50'sinden fazlasını tüketmektedir. Ayrıca, inşaat sektörü küresel enerji tüketiminin %36'sından sorumludur (IEA ve UNEP, 2018).

Çevreye verilen negatif etki de önemli bir sorun teşkil etmektedir. İYA hacimlerindeki artış çevresel zorlukları artırmakta ve inşaat faaliyetleri toprak, su ve havayı ciddi şekilde kirletmektedir. Küresel olarak İYA'ların %33'ü herhangi bir sınırlama olmaksızın bertaraf edilmekte ve açık dökümün yaygın olduğu gelişmekte olan ülkelerde bu oran %93'e kadar çıkmaktadır (Ferronato vd., 2017). Ayrıca, inşaat sektörünün enerji tüketimi, küresel karbondioksit emisyonlarının %11'ini oluşturmaktadır.

İnşaat projelerinden kaynaklanan atıklar ciddi finansal kayıplara neden olmakta ve maliyetleri artırmaktadır. İnşaat malzemelerinin yaklaşık %15'i atık olarak sonuçlanmaktadır (Hao vd., 2024). Tahminler, atıkların gerçek maliyetin bertaraf maliyetinin yaklaşık 20 katı olduğunu göstermektedir (Osmani, 2011). Özellikle düşük ve orta gelirli ülkelerde, atık yönetimi, belediye bütçelerinin %20'sinden fazlasının ve yerel yönetim yatırımlarının %50'sinin katı atık yönetimine ayrılmasına yol açarak önemli ekonomik zorluklar yaratmaktadır (World Bank, 2018).

1.3. Geri Dönüşüm ve Sürdürülebilirlik

Toplumlar, doğada sınırlı miktarda bulunan kaynakları, yenilenme hızlarından daha hızlı bir şekilde tüketmektedir. Gün geçtikçe artış gösteren konfor beklentisi, toplumları tüketim çılgınlığına ve buna bağlı olarak da müsrifliğe itmektedir. Ancak dünyada kaynakların sınırlı miktarlarda bulunması nedeniyle insanlık, bu tüketimin yol açtığı sorunlarla da başa çıkmak zorundadır. Önceden yalnızca yerel düzeylerde hissedilen sınırlı doğal kaynakların kullanımı ve ortaya çıkan atıkların yarattığı çevresel problemler, günümüzde küresel ölçekte etkiler yaratmaya başlamıştır (EPA, 2020).

Atıkların çevreye olan negatif etkisi, yalnızca atıkların yaratmış olduğu hava kalitesini negatif etkileyen emisyonların azaltılması ile çözülmeyecek kadar komplikedir. Doğal kaynakların akıllıca kullanılması, katı atık ve zararlı emisyonların yarattığı zararı minimize edebilir. Bu sebeple eldeki kaynakların yönetimi ve doğru kullanımı, çevrenin korunması için kilit stratejiler haline gelmektedir. Bu sebeple günümüzde kullanım kolaylığı sebebiyle tercih edilen doğrusal yönde ilerleyen malzeme akışlarının (kullan – at) döngüsel bir yapıya (kullan, ömrü bitince geri dönüştür ve tekrar kullan) dönüştürülmesi gerekmektedir. Bu dönüşüm, atıkların atık depolama sahalarında çürümeye bırakılmalarından ziyade hayatımızın her noktasında sözgelimi topluma yeniden kazandırılarak başarılabılır. Tükenebilir doğal kaynakların korunması ve döngüsel bir ömürle yeniden kullanılması, uzun vadede olumlu sosyo-ekonomik ve çevresel sonuçlar doğurmaktadır (Gonzalez ve Chini, 2020).

Birçok ülke, kullanılan doğal malzemelerin geride bıraktıkları atıklarını yeniden değerlendirip ekonomiye kazandırmak için farklı metotlar izlemektedir. Farklı türde atıklar farklı türde problemlere neden olmakta bu da farklı türde çözümler aranmasına sebebiyet vermektedir. Bu farklılıkların üstesinden gelebilmek için, kaynaklar, yerel yönetimler, piyasa ve akademinin arasında iş birliğine izin veren bir sisteme ihtiyaç duyulmaktadır. Bu iş birliği ancak sürdürülebilir üstyapı ve altyapılara geçişin sağlanabilmesi ile mümkündür. Bunun için temel ihtiyaçların karşılanma biçiminin dönüştürülmesi gerekmektedir (Rahman ve Kim, 2020). Yerel yönetimin, akademinin ve piyasanın mevcudu kullanıp tüketmek yerine, atıl durumda olan malzemeleri yeniden kullanmaya insanları teşvik etmesi, sürdürülebilirlik adına pozitif bir adım olacaktır.

İnsanların atıl durumda olan malzemeleri yeniden kullanması, doğal kaynakları kullanma ve koruma biçimi, insanlığın, çevrenin ve ekonominin refahını doğrudan

etkilemektedir. Doğal kaynaklar, devletlerin ve toplumların temel ihtiyaçlarını karşılamada hayati bir öneme sahiptir. Bu sebeple, gelecek nesillerin refahını sağlamak için doğal kaynakların korunması, sürdürülebilir bir şekilde yönetilmesi ve iyileştirilmesi şarttır (EPA, 2020).

Temel altyapı ve gıda tedarik sektörleri, küresel kaynak kullanımına ve insan sağlığı üzerindeki çevresel etkilere önemli ölçüde katkıda bulunmaktadır. Hajdukiewicz ve Pera, (2020)'ya göre 2050 yılına kadar inşa edilmesi beklenen kentsel altyapının %60'ı henüz inşa edilmemiştir. Bu sebeple uzun vadede geri dönüşüm ve sürdürülebilirlik çok mühim bir öneme sahiptir. İnsanlar tarafından yapılmış tüm yapılar, üretim ve tüketim ürünleri, atıklar vb. tüm malzemeler, dünyada bulunan tüm canlı varlığının ağırlığına eşdeğer bir kütleye ulaşmıştır. Yapılan ölçeklendirmeden de anlaşılacağı gibi tüketim ürünlerinin miktarı çok yüksek seviyelere ulaşmıştır. Atıkların yeniden kullanılmasının ülke çapında yapılması büyük önem taşımaktadır.

Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK)'in açıkladığı rakamlara göre son 30 yılda (1975-2005) nüfus yalnızca %3 artmıştır. Ancak bu ufak artışa rağmen doğal kaynakların kullanımı ve enerji sarfiyatı yaklaşık iki katına çıkmıştır. Türkiye'de bu ciddi miktarlara ulaşan sarfiyattan ve atıkların yarattığı sorunlardan ötürü, 2017 yılında Sıfır Atık Projesi doğmuştur. Proje kapsamında mümkün olan en fazla atığın geri dönüştürülerek ekonomiye kazandırılması hedeflenmektedir. Bu projeyle, doğal kaynak israfını önleyerek kaynakların daha verimli kullanılmasını sağlamak amaçlanmaktadır. Ülkemiz, iklim dostu yatırımları desteklemekte ve temiz üretim teknolojilerine yatırım yapan tesisleri teşvik etmektedir.

Sıfır Atık Projesi ile amaç, özellikle atıkların yüzde en büyük kısmını oluşturan İYA'ların, daha sonra kurtulmak için atıkların atık depolama sahalarına götürülmesi yerine, geri dönüştürülerek hammadde olarak endüstriye ve ekonomiye kazandırılmasını sağlamaktır. Bu sayede doğada sınırlı miktarlarda bulunan kaynakların israfı önlenecek, kaynaklar daha verimli kullanılacak ve oluşan atıklar depolanmak yerine yeniden kullanılarak geri dönüştürülecek, böylece Türkiye'de döngüsel ekonomi modeli uygulanacaktır (T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, 2020b).

Özetle, İYA'ların yeniden kullanımı, dünyada ve Türkiye'de kritik bir konu olarak değerlendirilmekte ve önlemler alınmaya başlanmaktadır. Dünyada en çok kullanılan İYA'lar arasında çelik cürufu, asfalt atığı ve beton atığı bulunmaktadır. Bu bağlamda, bahsi geçen atık malzemelerin dönüştürülüp yeniden kullanılmasının inşaat mühendisliği uygulamalarındaki yeri araştırılmaktadır.

1.4. İnşaat ve Yıkıntı Atıklarının İnşaat Mühendisliğine Kullanımı

İnşaat ve yıkıntı atıklarının (İYA) giderek kontrol edilemez boyutlara ulaşması nedeniyle, malzemelerin geri dönüştürülüp yeniden kullanılmasını destekleyen bir yaklaşıma geçilmesi gerekmektedir. Kullan-at modelinin terk edilmesi, sürdürülebilirlik açısından önemli bir adım olacak ve kaynakların daha verimli kullanılmasını sağlayacaktır.

İYA'ların geoteknik mühendisliğinde kullanılabilmesi için, söz konusu malzemelerin endeks, fiziksel ve kimyasal özelliklerinin doğru bir şekilde belirlenip tanımlanarak bu özelliklere uygun projelerde kullanılması gerekmektedir. Geoteknik mühendisliği uygulamalarında doğal agregaların yerine, İYA'ların kullanılması, sürdürülebilirlik hedeflerine önemli ölçüde katkı sağlayacaktır (Sariahmetoğlu, 2021).

Luo vd., (2024) yaptıkları çalışmada, RCA'ların beton içeriğine dahil edilmesi durumunda betonun, fiziksel, mekanik ve dayanıklılık parametrelerini incelemişlerdir. Bu veriler ışığında, RCA'ların istenilen gradasyonda ayarlanabileceği bildirilmiştir. RCA'ların taze betonun işlenebilirliğini kayda değer ölçüde etkilediği, bu sebeple işlenebilirliği optimize etmek adına süper akışkanlaştırıcı kullanım gereksinimi ortaya çıkabileceği bildirilmektedir.

Jaramillo vd., (2024) yaptıkları çalışmada, İYA'ların prefabrikasyon panel yapımını araştırmışlardır. Yalnızca doğal malzeme kullanılan numunelere kıyasla, İYA kullanılan numunelerin ağırlığı azalmıştır. Bu nedenle İYA'ların, ağırlıkça hafif ancak dayanımı kabul edilebilir seviyelerde olan dayanıklı beton panellerin üretiminde kullanılmaya uygun olduğu görülmüştür.

Alam vd., (2024) yaptıkları çalışmada, İYA'ların zemin stabilizasyonunda kullanımını incelemişlerdir. Çalışmada İYA'ların zemin stabilizasyonunda kullanıldığında, mukavemet parametreleri bakımından tatmin edici sonuçlar alındığını tespit etmiştir. Ayrıca kesme kutusu deneyi (DST) ve Kaliforniya taşıma oranı deneyi (CBR) testlerinden elde edilen sonuçların, İYA'ların zemin stabilizasyonunda kullanılmasını destekleyici nitelikte olduğu görülmüştür.

Nasiri vd., (2024) yaptıkları çalışmada İYA'ların duvar arkası dolgusunda kullanılabilme performansını incelemişlerdir. Deneyde kullanılan İYA'ların CBR değerleri, temel ve alt temel uygulamalarında kullanılma potansiyeline sahip olmadığı, ancak daha düşük mukavemet gereksinimlerine uygun yol kaldırım temel ve alt temel uygulamalarında

doğal agregalarla karıştırılarak kullanılabilceğı belirtilmiştir. İYA'ların tekrar kullanılması durumunda sürdürülebilirliğe büyük katkı sunacağı rapor edilmiştir.

Khan vd., (2024) yaptıkları çalışmada İYA'ların yol altı temel katmanlarındaki kullanımı araştırmışlardır. İYA'ların fiziksel parametreleri dane boyutuna, dane boyut dağılımına, kimyasal bileşimlerine ve geri dönüşüm tekniğine göre değışkenlik göstermektedir. Düşük kaliteli İYA'lar bile mukavemet iyileştirici katkılar kullanıldıktan sonra yol altı temel katmanlarında kullanılabilir. Ancak İYA'ların yapı elemanlarında kullanımının uzun vadedeki etkisini tam olarak anlayabilmek adına daha fazla araştırmaya ihtiyaç bulunmaktadır.

Hatipoğlu vd., (2016) İYA'lardan olan RCA'lardan sızan metal konsantrasyonlarının pH > 7 olduğunu bunun da EPA maksimum kirletici seviyelerinin (MLC) altında kaldığını belirtmiştir.

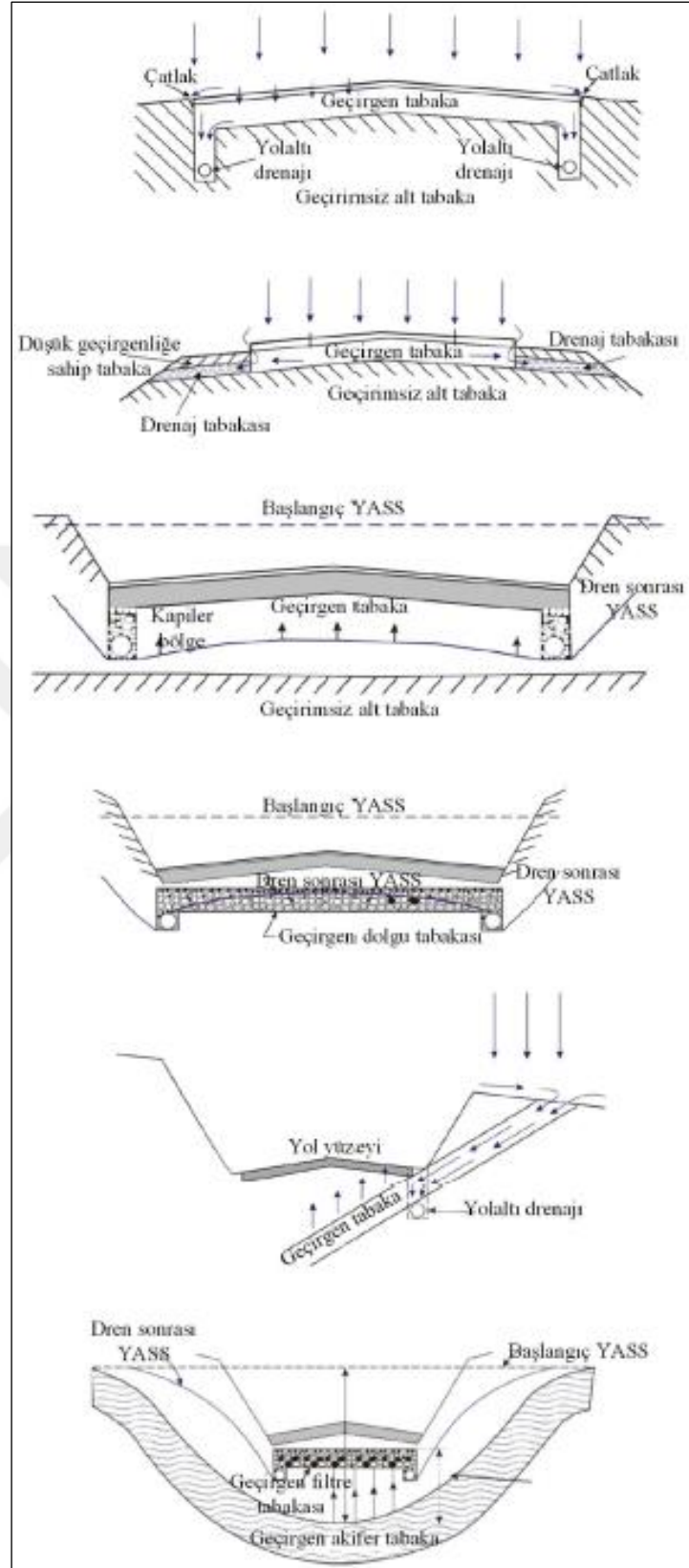
Sariahmetoğlu vd., (2021) geri dönüştürülmüş asfalt malzemesinin (RAP) yol altı drenaj sistemlerinde kullanılabilirliğini incelemiştir. Laboratuvarında yapılan deneylerden elde edilen veriler neticesinde, yol altı drenaj sistemlerinde kullanılmak üzere, RAP malzemesinin doğal agregalarla yeterli miktarda kıyaslanabileceğı, tıkanma durumunun standartlarda verilen sınırlar içerisinde kaldığı bu sebeple de filtrasyon malzemesi olarak, bitüm oranı kontrol sınırları içerisinde olmak üzere, kullanılabilceğı belirtilmiştir.

Dayıoğlu (2024) yaptığı çalışmada, çelik endüstrisinin bir yan ürünü olan çelik cürufunun (SS) atık agrega olarak kullanılma potansiyelini ele almıştır. Çelik cürufu, diğer agrega türleriyle kıyaslanabilecek düzeyde iyi mekanik özelliklere sahip olduğundan dolayı büyük bir potansiyele sahiptir. Ancak serbest kalsiyumun yüksek miktarlarda bulunmasından kaynaklanan yüksek genleşme potansiyeli ve alkalın içeriğı, dolayısıyla metal sızıntısı riski, kullanım alanlarını sınırlamaktadır. Bu sebeple SS'in bir ön işlem sürecine maruz kalması gerekmektedir. Ön işlemlerin ardından SS'in agrega olarak kullanılabilmesi beklenmektedir.

Çalım vd., (2024) geri dönüştürülmüş beton agregasının (RCA) yol altı drenaj sistemlerindeki performansını, ASTM D 5101 (2023) standardına dayalı olarak geliştirilmiş bir filtrasyon deney sistemiyle test etmektedir. Deneylerden elde edilen veriler, yol altı drenaj sistemlerinde RCA kullanımı sebebiyle ince dane malzeme göçüne bağılı olarak tıkanmanın başladığını göstermektedir. Ancak bu tıkanma, mevcut standartlardaki tıkanma sınırlarını aşmamaktadır. Bu nedenle, RCA'nın doğal agregaya alternatif olarak yol altı drenaj sistemlerinde kullanılabilceğı ifade edilmektedir.

1.5. Karayollarında Drenaj Sistemleri

Drenaj, yeraltı su seviyesini düşürmek ve zemin içinde biriken suyu yapıdan uzaklaştırmak amacıyla kullanılan bir sistemdir. Bu sistem, drenaj tabakası, drenaj boruları ve kontrol ile bakım rögarlarından oluşur. Konutlardan okullara köprülerden havalimanlarına demiryolu ve karayolları yapılarına kadar yapıların uzun ömürlülüğü, yapıya zarar verebilecek suyun tahliyesini sağlayan drenaj sistemlerine bağlıdır. Beton, çelik, asfalt gibi yapı malzemeleri suya temas ettiklerinde, tasarımlarından daha düşük performans gösterebilirler. Performans düşüklüğü, yapının tasarım hizmet ömrü tamamlanmadan, yapının bakım-onarımına girmesine veya istenilen performansı sağlayamamasına neden olabilmektedir. Yapıya etki eden su kaynaklarının türleri ve miktarı dikkate alınarak, farklı drenaj yöntemleri seçilip uygulanabilir. Örneğin, yüzey sularının hızlı ve etkili bir şekilde yapıdan uzaklaştırılabilmesi için yüzey suyu drenajı kullanılır. Bu yöntem, yağmur suyu veya yüzey akışını kanalizasyon ederek suyun yapıya zarar vermesini engellemektedir. Diğer taraftan, yapı çevresindeki veya altındaki zemin tabakasında biriken yeraltı sularının kontrol altına alınması için yeraltı suyu drenajı yöntemi tercih edilmektedir. Yeraltı suyu drenajı, suyun zeminden çekilerek su basıncını azaltıp yapının temeline veya alt yapıya zarar vermesini engellemektedir. Bu şekilde her iki drenaj yöntemi de yapıyı suyun olumsuz etkilerinden korumak için tamamlayıcı bir işlev üstlenmektedir. Bu drenaj yöntemlerinin şekilsel gösterimi Şekil 1’de sunulmuştur (Sarıahmetoğlu, 2021). Küresel ölçekte, artan kentleşme ve küresel ısınmanın bir sonucu olarak hızlı ve büyük çevresel değişiklikler yaşanmaktadır. Kentleşmenin artışı, yalnızca doğru bir şekilde yönetildiğinde sürdürülebilir büyümeye katkıda bulunabilmektedir. Bununla birlikte, kentleşmenin yağmur suyu sistemleri üzerindeki etkisi göz ardı edilmemelidir. Su geçirmez kentsel alanlar, yağmur yağışlarından kaynaklanan yüzey akışını hızlandırarak, daha şiddetli sel olaylarına neden olmaktadır. Bu durumu hafifletmek için bilim insanları ve mühendisler dünyanın dört bir yanında çalışmalar yapmaktadır. Birleşik Krallık ve Avrupa’nın birçok bölgesinde sürdürülebilir drenaj sistemleri (SuDS), Kuzey Amerika ve Yeni Zelanda’da düşük etkili gelişim (LID), Avustralya’da ise suya duyarlı kentsel tasarım (WSUD) olarak bilinen sürdürülebilir kentsel drenaj sistemleri yaklaşımlarını geliştirmiştir. Birçok araştırmacı, sürdürülebilir kentsel drenaj sistemleri üzerine çalışmalarına devam etmektedir. (Fletcher vd, 2015; Fontaneda vd., 2018; Dayıoğlu, 2024; Sarıahmetoğlu vd., 2024).



Şekil 1. Örnek drenaj yöntemleri (Department of Transport and Main Roads)

1.6. Yol Altı Drenaj Sistemlerinde Kullanılan Atıklar

Yol altı drenaj sistemlerinde kullanılacak agreganın seçimi büyük önem arz etmektedir. Su tarafından sürüklenen ince dane malzemesinin, drenaj sistemini tıkamaması gerekmektedir. Suyun hızlıca tahliye olabilmesi için de yüksek hidrolik iletkenliğe sahip malzeme kullanılması gerekmektedir. Yani yol altında kullanılan drenaj sistemlerinin hem filtrasyon hem geçirimsizlik kriterlerini sağlaması beklenmektedir. Dünyanın birçok ülkesinde olduğu gibi ülkemizde de yol altı drenaj tabakalarında kullanılacak malzemelerin özellikleri Karayolları Teknik Şartnamesi (KTŞ)'nde ayrıntılı bir şekilde açıklanmıştır. Üiform doğal zeminler için deneye tabii tutulan filtrasyon malzemesinin %85'nin geçtiği elek çapının (D_{85Z}) 5 katının, %15'nin geçtiği elek çapından (D_{15F}) büyük olması ($5D_{85Z} > D_{15F}$) beklenmektedir. İyi derecelenmiş doğal zeminler için deneye tabii tutulan zeminin (D_{15F}) değerinin 20 katının deneye tabii tutulan filtrasyon malzemesinin %15'nin geçtiği elek çapından (D_{15Z}) büyük olması ($D_{15F} \leq 20D_{15Z}$) beklenmektedir. Ayrıca deneye tabii tutulan zemin malzemesinin %50'sinin geçtiği elek çapının (D_{50Z}) 25 katının, deneye tabii tutulan filtrasyon malzemesinin %50'sinin geçtiği elek çapından (D_{50F}) büyük olması permeabilite performansı açısından beklenmektedir (Tablo 1).

Tablo 1. KTŞ'de verilen filtrasyon ve permeabilite kriterleri

Üiform 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

KTŞ'de, yer altı su seviyesi kontrolü için yapılacak olan yüzey altı drenaj sistemlerinde kullanılacak malzemelerin fiziksel özellikleri ve endeks parametreleri açıkça belirtilmiştir. İnce ve kaba filtre malzemeleri için, eleklerden geçen malzeme yüzdeleri ve elek açıklıkları, KTŞ'de verildiği şekliyle Tablo 2'de sunulmuştur.

Tablo 2. KTŞ’de verilen kabul edilebilir malzemelerin dane çapı dağılımı

Elek No	Elek Açıklığı (mm)	Geçen Malzeme (%)	
		İnce Filtre Malzeme	Kaba Filtre Malzeme
1"	25	100	100
3/4"	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	-	0
No 16	1,18	45-80	-
No 50	0,3	10-30	-
No 100	0,15	2-10	-

Şartnamede verilen tablolardan da anlaşılacağı üzere, tüm filtre malzemeleri dane çapı boyutu sınırları bulunmaktadır. Bu sınırlar KTŞ tarafından, ince filtre malzemesi için, maksimum dane çapı (D_{max}) < 9,5 mm, kaba filtre malzemesi için D_{max} < 25 mm ve minimum dane çapı (D_{min}) > 2 mm olarak kabul edilmiştir. Ayrıca malzemenin Plastisite indisi (I_p) 5 değerinden küçük olmalı yani non-plastik malzeme sınıfına girmelidir.

1.6.1. Geri Dönüştürülmüş Asfalt Agregası

Birleşmiş Milletler, altyapının güvenilir, sürdürülebilir, yüksek kaliteli ve erişilebilir olmasının gerekliliğini vurgulamaktadır (UN, 2023). Dünyada yaklaşık 21 milyon kilometreyi (dünyanın çevresini yaklaşık 525 kez dolaşmaya eşit) kaplayan yol altyapısı, günlük yaşamın ayrılmaz bir parçası olarak öne çıkmaktadır (Costa vd., 2020). Ancak, karayollarının inşası ve bakımı, yüksek enerji ve kaynak tüketimi gerektiren süreçlerdir ve çevre üzerinde olumsuz etkiler yaratmaktadır. Karayollarının yapım ve bakım işlemleri, enerji tüketiminin ve karbon salınımının yaklaşık %30’undan sorumludur (Choi, 2019)., Beton yollarda da asfalt yollarda da hacimce en büyük yeri kaplayan yapı malzemesi doğal agregalardır (NA). Yıllık yaklaşık 3 milyar ton tüketilen NA’nın %20’si ulaştırma altyapılarında kullanılmaktadır (UEPG, 2021). Bu süreçte, kullanım ömrü dolan malzemelerin büyük bir kısmı atık depolama sahalarına gönderilmekte ve bu da küresel atık üretiminin %30’unu oluşturan inşaat atıklarına katkıda bulunmaktadır (Purchase vd., 2022)

Bu kapsamda, iklim değişikliği, yenilenemeyen doğal kaynaklarının tükenmesi ve atıkları depolama problemi gibi çevresel sorunlar düşünüldüğünde, geri dönüşüm ve yeniden kullanım stratejilerinin çevresel etkilerini azaltmada önemli bir rol oynayabileceği

düşünülmektedir. Bu doğrultuda, yol altyapısının sürdürülebilirliğini artırmak için geri dönüştürülmüş malzemelerin kullanımı yaygınlaşmaktadır. En yaygın geri dönüştürülmüş agregalar arasında geri dönüştürülmüş beton, çelik cürufu, atık cam, kırık tuğla ve geri kazanılmış asfalt malzeme (RAP) bulunmaktadır.

Araştırmalar, RAP'ların kara yollarında kullanımının çevresel etkileri azaltma potansiyeline sahip olduğunu göstermektedir. RAP'ın kullanımı, yapının inşası için gerekli doğal agrega ihtiyacını azaltmaktadır. Ayrıca, karayollarında kullanılan asfalt malzemesine RAP eklenmesi, çevresel etkilerde %15 ila %30 oranında azalma sağlamaktadır (Vidal vd., 2013). Buna örnek olarak Gruber vd., (2023) yaptıkları çalışmada, doğal agregaların %50'sinin RAP ile değiştirilmesinin, sera gazı emisyonlarının üzerinde %17'lik bir düşüşe neden olabileceğini bildirmişlerdir. Betonlarda ise belirli oranda RAP kullanımı, sera gazı emisyonları, enerji ve su tüketimi, ötrofikasyon, asitlenme ve insan sağlığı gibi çevresel etkenlerde %20'ye varan oranlarda düşüş sağlanabilmektedir (Plati ve Tsakoumaki, 2023). Küresel RAP üretimi ve kullanımı dikkate alındığında, Avrupa ve Amerika Birleşik Devletleri'nin 2020'de 100 milyon tondan fazla RAP ürettiği ve bunların %95'inden fazlasının yeniden kullanıldığı kaydedilmiştir. RAP'ların yapılarda tekrar kullanılması, çevreye yarar sağladığı gibi, milli servetin korunmasına da katkı sağlamaktadır.

1.6.2. Çelik Cürufu

Çelik cürufu, çelik üretimi sırasında farklı fırınlarda meydana gelmektedir. Oksijen fırını (BOF), elektrik ark ocağı (EAF), pota fırını (LF), yüksek fırın (BF) ve indüksiyon fırınları (IF) bu fırınlara örnek olarak verilebilir (Manso vd., 2004; Rodríguez vd., 2015; Stumpe vd., 2012; Zhang vd., 2015). Çelik cürufu, üretim süreçlerine bağlı olarak çeşitli mineralojik, fiziksel ve kimyasal özelliklere sahip olmaktadır. Çelik cürufunun ana bileşenleri arasında Si, Ca, Al, Fe, Mg ve Mn bulunurken, eser miktarda farklı bazı elementler de içermektedir. BOF, EAF ve LF cürufu, yüksek CaO içeriklerinden dolayı çimento üretiminde kullanılırken, indüksiyon fırını cürufu daha düşük CaO içeriği nedeniyle çimento üretiminde tercih edilmemektedir (Agalit vd., 2017).

Çelik cürufu, yoğunluk bakımından 3,3-3,6 g/cm³ aralığında olup, görünüş itibarıyla gevşek bir yığın halinde ve sert yapısıyla aşınmaya dirençlidir. Bu dayanıklılık yüksek demir içeriğinden kaynaklanmaktadır. Çelik cürufunun öğütülebilirlik katsayısı 0,7 olup, bu değer yüksek fırın cürufunda 0,96 ve üniform kumda 1,0'dir (Hou vd., 2010). Çelik cürufunun

temel bileşenleri SiO_2 , CaO , Fe_2O_3 , FeO , Al_2O_3 , MgO , MnO ve P_2O_5 'tir (Motz ve Geiseler, 2001). Çelik cürufunun kimyasal içeriği, fırın türü, çelik kalitesi ve uygulanan ön işlem yöntemine göre değişiklik göstermektedir. Çelik cürufunda bulunan ana mineral fazlar arasında dikalsiyum silikat (C_2S), trikalsiyum silikat (C_3S), RO fazı (CaO-FeO-MnO-MgO katı çözeltisi), tetra-kalsiyum alüminoferrit (C_4AF), olivin, merwinite ve serbest CaO yer almaktadır. Çelik cürufunun kullanım alanları, kimyasal ve fiziksel özellikleri ile doğrudan bağlantılıdır. Tablo 3'te bu özelliklerin uygulama alanları ile ilişkisi detaylandırılmıştır.

Tablo 3. Çelik cürufunun özelliklerine göre uygulama alanları

Çelik Cürufunun Özellikleri	Uygulama Alanları
Sert, aşınmaya dayanıklı, yapışkan, pürüzlü	Yol ve hidrolik yapı inşaatları için agrega
Gözenekli, alkali	Atık su arıtma
FeO , Fe barındıran	Demir geri kazanımı
CaO , MgO , FeO , MgO , MnO barındıran	Aflüks (akış) maddesi
Çimentomsu bileşenler	Çimento ve beton üretimi
CaO , MgO barındıran	CO_2 yakalama
FeO , CaO , SiO_2 barındıran	Çimento klinkeri hammaddesi
CaO , SiO_2 , MgO , FeO barındıran	Gübre ve toprak iyileştirme

Dünya Çelik Birliği raporuna göre, her yıl 400 milyon tondan fazla demir ve çelik cürufu üretilmektedir (Association, 2016). Dünyada üretilen ham çeliğin %49,5'inden Çin tek başına sorumludur (Guo vd., 2018). Çin, dünya genelinde en büyük çelik üreticisi olmakla beraber yılda 100 milyon tondan fazla çelik cürufu üretmektedir (Guo vd., 2018). Hindistan'da ise yaklaşık 27 milyon ton yüksek fırın cürufu, 8 milyon ton bazik oksijen fırını cürufu, 2,5 milyon ton elektrik ark ocağı cürufu ve 1 ila 1,5 milyon ton indüksiyon fırını cürufu üretilmekte olup, bu miktarın yalnızca %25'i çimento üretiminde değerlendirilebilmektedir (Nadeem ve Pofale, 2012). Avrupa Birliği'nde sadece elektrik ark ocaklarıyla (EAF) yılda 10 milyon ton cüruf üretilirken, İspanya yılda 1,5 milyon ton ile bu üretime büyük katkı sağlamaktadır (Manso vd., 2004; Khalaf vd., 2020). Küresel ölçekte, yılda üretilen 400 milyon ton çelikle birlikte, ton başına yaklaşık 120-140 kg çelik cürufu yan ürün olarak ortaya çıkmaktadır (Li ve diğerleri, 2018). Bu nedenle, cürufun geniş çapta tüketimini sağlayacak alternatif yöntemlere ihtiyaç vardır (Lee vd., 2019; Liu vd., 2020). Bu

ihtiyacı karşılamak adına, çelik cürufunun kullanımına yönelik birçok araştırma devam etmektedir (Chakraborty vd., 2014).

Birçok araştırmacı, çelik cürufunu betonun içinde agrega veya çimento malzemesi olarak değerlendirmektedir (Faraone vd., 2009). Metalurjik yan ürünlerin geri dönüştürülmesi, sürdürülebilir endüstriyel üretimini desteklerken çevreyi koruma anlamında da pozitif katkı sağlamaktadır (Han vd., 2019). Cürufun içeriğindeki bileşenler, geri dönüşüm ve kullanım süreçlerinde önemli rol oynamaktadır. Çelik cürufunun geri dönüştürülmesi, çelik ve demir üretiminde yaygın olarak uygulansa da bazı endüstrilerde üretilen cürufun büyük miktarlarını değerlendirmek mümkün olmamaktadır (Reuter vd., 2004). Üretilen yüksek hacimdeki çelik cürufunu tüketmek için farklı uygulamalara ihtiyaç vardır. İnşaat sektöründe çelik cürufunun kullanımı, diğer uygulamalara kıyasla daha büyük hacimlerde cüruf tüketme imkanı sunduğundan, önemli bir avantaj sağlamaktadır. Son yıllarda, sürdürülebilirliği ve döngüsel ekonomiyi desteklemek amacıyla inşaat projelerinde geri dönüştürülmüş malzemelerle üretilen beton, yaygın şekilde kullanılmaktadır (Grady vd., 2021; Liu vd., 2020).

Betonun hammaddesi olan doğal agregaların belirli oranlarda çelik cürufuyla değiştirilmesi, betonun mekanik özelliklerinde iyileşme sağlamıştır (Prateek vd., 2023). Ancak, cürufun gözenekli yapısı, betonun geçirimsizliğini arttırmakta bu da betonun dayanımı üzerinde ve donatı korozyonu hususunda endişelere sebep olmaktadır (Palankar vd., 2016).

Türkiye’de de çelik cürufunun karayollarında standart bir ürün olarak kullanılabilirliği üzerine çeşitli araştırmalar yapılmaktadır. Çelik cürufunun yol altyapısı ve üstyapısında kullanımı ve performansının değerlendirilmesi amacıyla, ülkemizde farklı tesislerde üretilen çelik cürufları çeşitli çalışmalar kapsamında incelenmiştir. Bu araştırmalarda, çelik cürufunun granüler tabakalarda ve bitümlü sıcak karışımlarda yapay agrega olarak kullanımı incelenmiş, malzemenin fiziksel ve endeks özelliklerinin KTŞ standartları içinde kaldığı saptanmıştır (Karadağ vd., 2020).

İlcalı (1988) ise, çalışmasında Erdemir çelik cüruflarının yol üst yapısında kullanılabilirliğini incelemiştir. Çelik cürufunun, üstyapı tabakalarında kullanım için uygun fiziksel değerlere sahip alternatif bir agrega olduğu sonucuna ulaşmıştır. Ayrıca, çelik cürufu ile yapılan bitümlü karışımın ağır trafikli yollarda aşınma tabakasında da kullanılabileceği belirtilmiştir. Fırat vd., (2019), belirli oranlarda çelik cürufu, uçucu kül ve dolgu için uygun bir zemin malzemesi ile karıştırılarak hazırlanan numunenin CBR değerinde %130 oranında

bir artış sağladığını belirlemiş ve çelik cürufunun güvenle yol dolgu malzemesi olarak kullanılabileceği sonucuna varmışlardır (Karadağ ve ark., 2020).

Karadağ vd. (2020), çelik cürufunun karayollarında kullanılabilirliğini sonlu elemanlar yöntemi ile modelleyerek analiz etmişlerdir. Elde edilen sonuçlara göre, Türkiye’de çelik cürufunun doğal agreganın yerine üstyapıda güvenle kullanılabileceği, alt temel olarak kullanıldığında ise tekrarlı trafik yükleri altında yol performansını artırabileceği ve aynı zamanda doğal kaynak tüketimini azaltarak demir-çelik endüstrisinden kaynaklanan atıkların geri dönüşümünü sağlayabileceği belirtilmiştir (Karadağ ve ark., 2020).

1.6.3. Geri Dönüştürülmüş Beton Malzeme

Modern betonların %65-70 kadar kısmı agregalardan oluşmaktadır. Doğal agregaların çıkarılması ve hazırlanması, taş ocaklarından başlayarak üretim, taşıma ve kırma süreçleri boyunca ciddi enerji tüketimi gerektirmektedir. Ittyeipe vd. (2020)’nin araştırmasına göre, bir ton doğal agreganın enerji tüketimi (20000 kJ civarlarında), geri dönüştürülmüş beton agregasının (16000 kJ civarlarında) üretimindeki enerji tüketiminden yaklaşık %25 daha fazladır. Ayrıca, inşaat sektöründe üretilen büyük miktarda beton atığı, doğal kaynakların azalmasına, enerji tüketiminin artmasına ve çevreye zarar verilmesine neden olmaktadır (Magalhaes vd., 2017).

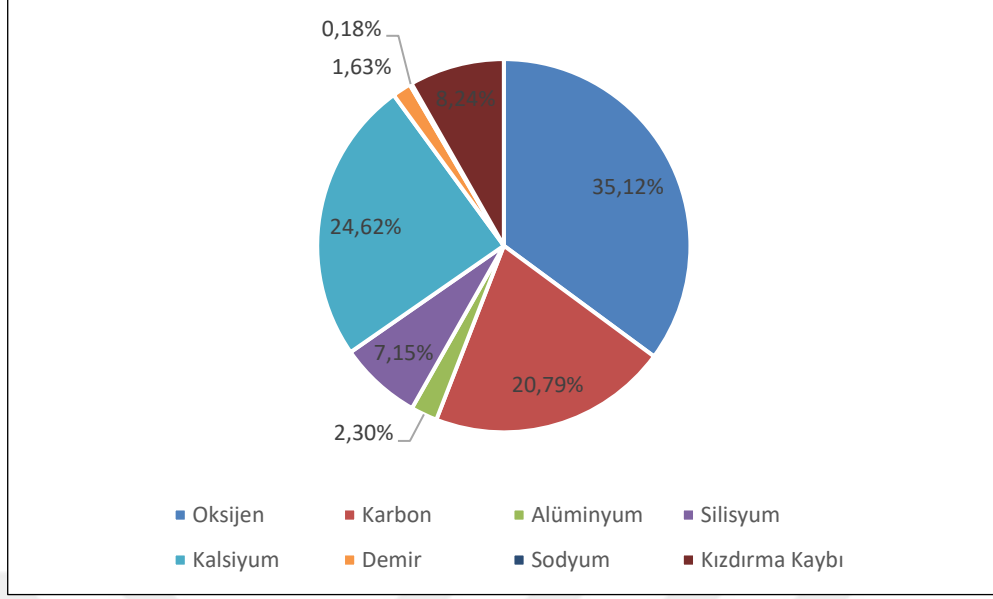
Yapılan çalışmalarda, inşaat sektörünün yılda yaklaşık 75 milyar metrik ton beton yan ürünü ürettiği belirtilmektedir (Kaarthlk vd., 2021). 2018’de Çin, yaklaşık 2,36 milyar ton inşaat ve yıkım atığı (İYA) üretmiş olup; onu Amerika Birleşik Devletleri (yaklaşık 600 milyon megaton) ve Hindistan (yaklaşık 530 milyon megaton) takip etmektedir. Avrupa’da ise, Fransa ve Almanya sırasıyla 240 milyon megaton ve 225 milyon megaton C&D atığı üretmektedir (Wang vd., 2021). Gelişmekte olan ülkelerde katı atık yönetimi giderek zorlaşırken, inşaat atıkları da önemli bir çevresel sorun olarak öne çıkmaktadır. Örneğin, Sahra Altı Afrika’da kentsel nüfusun artışıyla birlikte günlük kişi başına yaklaşık 1 kg çöp üretimi beklenmektedir. Diğer Afrika ülkelerinde de kişi başına günlük 0,7 ila 1,1 kg arası atık üretilmekte olup, bu oranın %30’una kadar inşaat ve yıkım atıklarından oluşmaktadır (Aboginije vd., 2021).

Bu büyük miktardaki inşaat ve yıkım atıkları, küresel ölçekte hızlı bir çözüm gerektirmektedir. Ancak, bu atıkların büyük bir kısmının geleneksel olarak atık depolama sahalarına gönderilmesi hem artan maliyetler hem de çevresel endişeler nedeniyle giderek

daha zor hale gelmektedir (Liang vd., 2022). Üstelik, bu tür atıkların, toprağa ve yeraltı sularına zarar verebilecek kimyasal maddeler içermesi de risk oluşturmaktadır. Dolayısıyla, geri dönüşüm ve yeniden kullanım odaklı teknolojiler, inşaat ve yıkım atıklarını yönetmek adına oldukça önemli hale gelmiştir. Hong Kong'da yapılan bir araştırma, geri dönüştürülmüş agrega betonunun, doğal agrega betona kıyasla sera gazı emisyonunu %65 ve yenilenemeyen enerji tüketimini %58 oranında azalttığını göstermiştir (Hossain vd., 2016).

Yıkımdan kaynaklanan beton atıklarının büyük bir kısmı agrega içermektedir. Ancak, agregalar sınırlı kaynaklar olduğundan, gelişmekte olan ülkelerde artan şehirleşme ile birlikte talepler daha da yükselmektedir. Bu malzemelerin gelecekte tedarik edilmesi zorlaşabilir ve kıtlık yaşanabilir. Bu nedenle, inşaat sektörünün sürdürülebilir hale gelmesi ve İYA'lardan elde edilmiş bazı beton agregalarının (RCA) yeni beton üretiminde kullanılması önemlidir. Bu yaklaşım, doğal agrega rezervlerinin korunmasına, sera gazı salınımının azaltılmasına, agrega üretimi sürecinde yenilenemeyen enerji tüketiminin düşmesine ve arazilerin atık depolama sahası olarak kullanılmasını önlemeye yardımcı olabilir (Sajan vd., 2022).

RCA'ların, doğal agregalar (NA) yerine beton üretiminde kullanılması önerilen bir yaklaşımdır. Bu agregalar büyük ölçüde inşaat atıkları ve yıkılmış beton yapılardan elde edilmektedir. Her ne kadar RCA'lar, hem ekonomik hem de çevresel anlamda önemli avantajlar sunsa da, RCA'nın doğal agregalara kıyasla daha düşük kalitede olması nedeniyle kullanımı sınırlıdır (Wang vd., 2015; Ignjatovic vd., 2017). RCA'nın performansı, kaynağına bağlı olarak değişen özelliklerinden etkilenmektedir (Liu vd., 2019). Örneğin, Liu ve Zhou'nun çalışmaları, farklı RCA türlerinden üretilen betonun kayma kapasitesi, basınç dayanımı ve kırılma modülünde farklılık yarattığını göstermektedir (Zhou ve Chen, 2017). Nam vd., 2016 yaptığı çalışmada, RCA'ların ağırlıkça %35,12'si oksijen, %20,79'u karbon, %23'ü alüminyum, %7.15'i silisyum, %24.62'si kalsiyum, %1.63'ü demir, %0.18'i sodyumdan oluştuğunu belirtmişlerdir. RCA'ların elementsel bileşimi Şekil 2'de sunulmuştur.



Şekil 2. RCA'ların elementsel bileşimi (Nam vd., 2016)

Arulrajah vd. (2012) tarafından yapılan çalışmada, RCA'ların yol altı temel uygulamalarında kullanım performansı incelenmiştir. Laboratuvarda, elek analizi, modifiye proktor deneyi, dane yoğunluğu, statik üç eksenli basınç deneyi ve dinamik üç eksenli basınç deneyleri yapılmıştır. Yapılan deneylerden elde edilen verilerin ışığında, RCA'ların yol altı temel uygulamalarında kullanılmasının uygun olduğu görülmüştür.

Behera vd. (2014) tarafından yapılan çalışmada, RCA'ların beton içinde kullanım performansı incelenmiştir. Beton gibi malzemelerin üretimi sebebiyle doğal kaynaklar hızla tükenmektedir. Doğal kaynakların yerini alabilecek alternatif malzemelere duyulan talep, doğal kaynakların; yüksek maliyet, çevre kirliliği, yüksek enerji kullanımı ve atık malzemelerin depolanması gibi negatif etkenlerden dolayı artmıştır. Yapılan araştırmalar sonucunda, RCA'ların kullanımının sürdürülebilirlik açısından pozitif etkiye sahip olduğu ancak uzun dönem performanslarının daha fazla araştırılması gerektiği görülmüştür.

Haider vd. (2014) tarafından yapılan çalışmada, RCA'ların yol altı temel uygulamalarında kullanım performansı incelenmiştir. Beton atıkları, doğada en uzun süre çözünmeden kalan atıklardan biridir. Bu sebeple geri dönüştürülmeyen beton atıkları çevreye büyük zararlar vermektedir. Yol inşaatlarında RCA kullanımı; enerji tüketimi, bütçe kullanımı, doğal kaynakların korunması ve çevreye olan zararın azaltılması gibi sebeplerden dolayı tercih edilmektedir. RCA ve NA'lardan oluşan numuneler hazırlanmıştır. Numunelerin dayanım, dayanıklılık ve kalıcı deformasyon özellikleri laboratuvar deneyleriyle incelenmiştir. NA ile hazırlanan numunelerin, RCA ile hazırlanan numunelere

kıyasla, tekrarlı yüklemelere karşı dayanım performansının daha iyi olduğu, kalıcı deformasyon değerlerinin daha düşük olduğu görülmüştür. Ancak deneylerden elde edilen veriler ışığında, RCA'nında yol altı temel uygulamalarında kullanılmasının uygun olduğu görülmüştür.

Cardoso vd. (2015) tarafından yapılan çalışmada, geri dönüştürülmüş beton agregasının (RCA) geoteknik uygulamalarda kullanım performansı incelenmiştir. Farklı tipte RCA'ların fiziksel özelliklerinin ele alındığı bu çalışmada, RCA'ların doğal agregayla (NA) kıyaslanmasına da yer verilmiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda, RCA'nın üstyapı ve altyapıda kullanılabilir olduğu görülmüştür.

Bestgen vd. (2016) tarafından yapılan çalışmada, RCA'ların yol altı temel uygulamalarında kullanım performansı incelenmiştir. RCA'lar, maliyeti düşürdüğü, doğal kaynakların kullanımını azalttığı ve çevre dostu olması sebebiyle, yol altı temel uygulamalarında kullanılmaktadır. RCA'ların laboratuvar incelemesi için 2 farklı RCA ve 4 farklı NA ile numuneler hazırlanmıştır. Numuneler üzerinde yapılan deneylerden elde edilen veriler ışığında dayanım, rezilyans modülü, kalıcı deformasyon ve dayanıklılık parametreleri hesaplanmış ve kıyas edilmiştir. Yapılan çalışmalar sonucu, RCA ile hazırlanmış numunelerin, tekrarlı yükler altında NA ile hazırlanmış numunelere kıyasla daha düşük performans gösterdiği ve daha yüksek metal sızıntısına sahip olduğu ancak kabul edilebilir sınırlar içinde kaldığı görülmüştür.

Morata vd. (2016) tarafından yapılan çalışmada, çelik cürufuyla güçlendirilmiş RCA'ların demiryolu balast ve yol altı dolgu malzemesi olarak kullanım performansı ele alınmıştır. Balastta kullanılan agreganın, yüksek aşınma dayanımına sahip olması, demiryolunun daha uzun süre kullanılması açısından önemlidir. Ancak yüksek kalite agrega kullanımı, uzun vadede ekonomik ve çevre dostu değildir. Çelik cürufuyla güçlendirilmiş RCA kullanımı güçlü mukavemet özellikleri, ekonomik ve çevre dostu olması sebebiyle tercih edilmiştir. Laboratuvarda yapılan yaşam döngüsü testi (LCA) ve sahada yapılan çalışmalardan elde edilen veriler ışığında, balastta ve dolgu zemininde kullanılan cüruflla güçlendirilmiş RCA'ların, sertlik, stabilite, taşıma gücü ve dayanıklılık parametrelerine pozitif etki ettiği görülmüştür.

Braga vd. (2017) tarafından yapılan çalışmada, betonda kullanılan, RCA'nın ve NA'nın çevresel ve ekonomik etkilileri incelenmiş ve kıyaslanmıştır. 24 farklı referanstan 216 adet beton karışımı üretilmiş, harcanan toplam enerji ve maliyet hesaplanmıştır.

Yapılan deneylerin ışığında, RCA'ların betondaki kullanımı, maaliyeti ve çevreye verilen hasarı büyük ölçüde azalttığı ve betonda kullanılmaya uygun olduğu görülmüştür.

Hung vd. (2017) tarafından yapılan çalışmada, RCA'nın yol inşaatında kullanılmasının yaratabileceği potansiyel sorunlar ele alınmıştır. Binaların ve yolların yıkılması sonucu elde edilen RCA'ların tekrar kullanılması doğa dostu bir yaklaşımdır. Ancak ince dane içeriğine bağlı olarak metal sızıntısı problemi görülebilmektedir. Yapılan çalışmalar ışığında, %70 veya daha fazla ince dane içeriğine sahip RCA'larda metal sızıntısı riskinin arttığı görülmüştür.

Mehrjardi vd. (2020) tarafından yapılan çalışmada, RCA'nın yol inşaatlarındaki kullanımı ve geliştirilmesi ele alınmıştır. İnşaat atıklarının miktarı her geçen yıl artmaktadır. Buna bağlı olarak çevre büyük zarar görmektedir. İnşaat atıklarını geri dönüştürerek yol inşaatlarında yeniden kullanılması çevreyi korumak adına önemli bir adımdır. Laboratuvar, elek analizi, Atterberg kıvam limitleri deneyleri, modifiye kompaksiyon, Kaliforniya taşıma gücü (CBR) ve kesme kutusu deneyleri yapılmıştır. Yapılan deneylerden elde edilen veriler ışığında, RCA'nın yol altı temel malzemesi olarak kullanılmasının uygun olduğu görülmüştür.

OK vd. (2020) tarafından yapılan çalışmada, RCA'ların dolgu malzemesi olarak kullanım performansı incelenmiştir. RCA'ların performansını ölçmek için laboratuvar, elek analizi, Los Angeles aşınma testi, piknometre testi, modifiye kompaksiyon deneyi, Kaliforniya taşıma gücü testi, tek eksenli basınç deneyi ve rezilyans modülü testi yapılmıştır. Aynı deneyler daha sonra RCA'larla karşılaştırmak için, genelde dolgu için kullanılan yüksek kalite NA'lar için de yapılmıştır. Laboratuvar deneylerinden elde edilen veriler ışığında, RCA'ların NA'lara iyi bir alternatif olabileceği görülmüştür.

Han ve Thakur (2014) tarafından yapılan çalışmada, RCA-geosentetik sistemlerinin sürdürülebilir şekilde yol inşasında kullanılmasını ele almışlardır. Günümüzde, asfalt, beton ve balasttan yapılan yolların yıkımı sırasında açığa çıkan atık agreganın, dönüştürülüp yeniden yol yapımında kullanılması sık rastlanan bir durum haline gelmiştir. Geri dönüştürülmüş malzemenin mukavemet parametreleri, doğal malzemeye kıyasla zayıf olabilmektedir. RCA'lar geotekstillerle güçlendirildiklerinde, mukavemet parametrelerinde iyileşme görülmektedir. Yapılan deneylerden elde edilen verilerin ışığında, geotekstillerin, yanal ve düşey deformasyon değerlerini azalttığı söylenebilir.

Ferreira vd. (2022) tarafından yapılan çalışmada, RCA'larla birlikte kullanılan yüksek dayanımlı geotekstillerin, uzun dönem gerilme davranışı incelenmiştir. RCA'ların

geosentetikle güçlendirilmiş yapılarda dolgu malzemesi olarak kullanılması, sürdürülebilirlik ve doğal kaynakların korunması açısından iyi bir alternatiftir. Geosentetik kullanılan sahalarda sünme, dikkatle incelenmesi gereken bir parametredir. Laboratuvarında yapılan sünme deneyleriyle, geotekstillerin, uzun dönem gerilme davranışı karakterize edilmeye çalışılmıştır. RCA'ların geotekstil üzerinde uzun vadede yaratabileceği sorunları gözlemleyebilmek için geotekstil-RCA kompozitinden oluşan numuneler 24 ay boyunca doğal çevre koşullarında gözlemlenmiştir. Deneylerden elde edilen veriler ışığında, geotekstillerin, RCA'larla etkileşimi sonucunda kısa dönem dayanım parametrelerinin negatif etkilendiği ancak uzun vadede kayda değer bir sorun oluşturmadığı görülmüştür. RCA'ların, geotekstillikle beraber kullanılmasında bir sakınca olmadığı görülmüştür.

Manzoor vd. (2022) tarafından yapılan çalışmada, RCA-geotekstil sistemlerinin yol kalınlığına olan etkisi incelenmiştir. Modern karayolları yapılarında dizayn ve bakım, geotekstillerin kullanımına doğrudan bağlıdır. Geotekstillerin kullanıldığı derinliğe bağlı yaratacağı değişiklikleri gözlemlemek için CBR testi yapılmıştır. CBR testinin sonucunda elde edilen veriler ışığında, geotekstil kullanılan numunelerin kullanılmayan numunelere kıyasla daha yüksek CBR değerine sahip olduğu, orta derinliğe yerleştirilen geotekstillerin, gerekli yol kalınlığını azalttığı görülmüştür.

Çalışmada, RCA'ların yol altı drenaj sistemlerinde drenaj ve filtrasyon performansı incelemesi yapılmıştır.

1.7. Geosentetikler

Geosentetikler, inşaat mühendisliğinin birçok alanında giderek daha önemli hale gelmektedir. Geosentetikler, zeminle temel yapı elemanlarının temas arayüzünde kullanılan sentetik veya doğal polimerik malzemelerden yapılmış ürünlerdir. Kullanılan başlıca temel polimer sınıfları polietilen, polipropilen, polyester ve polivinil klorürdür. Ancak, her sınıfta belirli polimer türleri (örneğin, düşük yoğunluklu polietilen oktan veya heksan kopolimerleri, düşük karboksil uç grubu konsantrasyonlu yüksek molekül ağırlıklı polietilen tereftalat) ve ilgili katkı paketleri (örneğin, antioksidan paketleri) seçilir. Yapılacak geotekstil seçimi çalışılacak alan, yapılacak yapı ve zeminin şartlarına göre seçilmelidir.

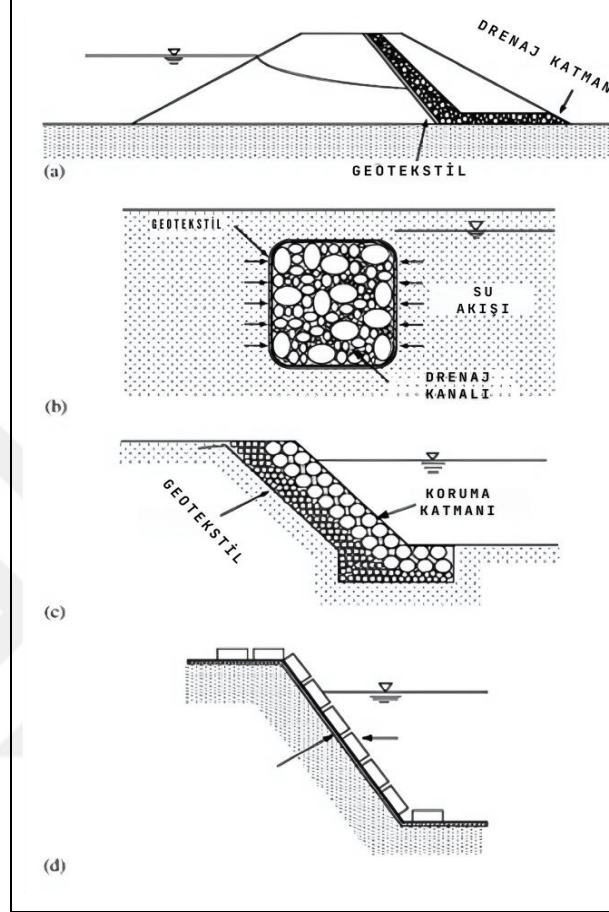
Uygulamada birçok geosentetik türü mevcuttur. Geotekstillik örgüsüz veya örülmüş, geçirgen, polimerik bir tekstil malzemesidir. Örgüsüz geotekstillik (NG), yönlendirilmiş veya rastgele oryantasyonlu lifler, filamentler veya diğer elemanlardan oluşan ve mekanik,

termal veya kimyasal olarak bağlanmış bir levha, ağ veya tabakadır. Örgülü geotekstil (WG), genellikle dik açılarda iki veya daha fazla iplik, lif, filament, bant veya diğer elemanların birleştirilmesiyle üretilir. Geogridler açık bir ağ yapısına sahip, entegre olarak birbirine bağlı çekme elemanlarından oluşan, düzenli bir polimerik yapıdır. Geogridler, esas olarak güçlendirme uygulamaları için kullanılır. Geonetler düğümlene veya ekstrüzyon yoluyla birbirine bağlı yoğun bir ağ oluşturan, daha büyük açıklıklara sahip bir polimerik yapıdır. Geomembranlar göreceli olarak geçirimsiz olan bir polimerik tabakadır. Geosentetik kil örtüler geosentetik malzemeler ve düşük hidrolik geçirgenlikli toprak (kil) içeren bir tabaka şeklinde üretilmiş bir yapıdır. Geofaamlar polimerin yarı sıvı formda uygulanmasıyla oluşan bir köpük malzemedir; bir köpürtme maddesi kullanımıyla yüksek boşluk içeriğine sahip hafif bir malzeme elde edilmektedir. Geokompozitler en az bir geosentetik ürün ve diğer bileşenler kullanılarak üretilen veya monte edilen bir malzemelerdir (Müller ve Saathoff, 2015).

Geoteknik mühendisliğinde, yapıların oturduğu tabaka basit olarak zemin ve kaya olmak üzere iki kategoriye ayrılabilir. Çoğu zemin, suyun etkisinde hızlı bir şekilde fiziksel ve endeks özellikleri değiştirebilirken kayalar ancak uzun süreli su maruziyetinden sonra bu değişimi göstermektedir. Bu sebeple geoteknikte, malzemenin tipi kadar suyun varlığı ve nasıl uzaklaştırılacağı da önemli bir yere sahiptir. Geoteknik mühendisliğinde bir diğer sorun, zeminin düşük çekme mukavemetidir. Bahsi geçen geosentetiklerin birçoğu zeminin doğası gereği olan zayıflıklarıyla veya suyla etkileşimi sonucu ortaya çıkan problemlere çare olmak için üretilmiştir. Geosentetikler birçok farklı uygulamada farklı görevler üstlenebilmektedir. Bariyerlerde kullanılan geosentetikler sıvı veya gazların göçünü önlemek amacıyla kullanılmaktadır. Muhafaza yapılarında kullanılan geosentetikler zemin malzemesini belirli bir geometrik yapı içinde tutmak ve kayıplarını önlemek için kullanılır. Drenaj tabakalarında kullanılan geosentetikler suyu toplama ve taşıma görevini üstlenmektedir. Dayanım artırıcı olarak kullanılan geosentetikler bir yüzeyin veya katmanın hasarını önlemek veya azaltmak için lokalize bir stres azaltma tabakası olarak işlev görmektedir. Filtrasyon tabakalarında kullanılan geosentetikler suyun geçişine izin verirken, ince daneli zemin partiküllerinin kontrolsüz geçişini önlemektedir.

Tez çalışmasında, yüzey altı drenaj sistemlerinde filtrasyon iyileştirmesi için kullanılacak olan örgüsüz geotekstiller kullanılmıştır. Örgüsüz geotekstillerin filtrasyon ve geçirimsizlik performansı araştırmacılar tarafından yıllardır incelenen ve incelenmeye devam

eden bir konudur. Örgüsüz geotekstillerin geoteknik mühendisliğinde kullanımına ilişkin örnekler Şekil 3’te sunulmuştur (Wu vd., 2006).



Şekil 3. Geotekstillerin geoteknik mühendisliğinde uygulamaları (Wu vd., 2006)

Faure vd. (2004) tarafından yapılan çalışmada, geotekstillerde, askıda kalan daneciklerin filtrasyonu esnasında yaşanabilecek tıkanma, ampirik yöntemlerle tahmin edilmeye çalışılmıştır. Filtrasyon esnasında yaşanabilecek potansiyel tıkanmalar, geotekstilin açıklığı yapısı ve daneciklerin boyutuyla doğrudan alakalıdır. Geotekstillerde tıkanma testinden elde edilen veriler ışığında, geotekstilde malzeme birikimi sonucu tıkanmanın ampirik bağıntılarla tahmin edilebildiği görülmüştür.

Kutay ve Aydilek (2006) tarafından yapılan çalışmada, iki katman olarak yerleştirilen geotekstillerin filtrasyon performansları incelenmiştir. Örgüsüz geotekstiller filtrasyon performansları sebebiyle sıklıkla tercih edilmektedir. Ancak bazı uygulamalarda, örgüsüz geotekstiller oluşacak deformasyonları karşılayamayacağı için, örgülü geotekstillerle beraber kullanılır. Örgüsüz-örgülü geotekstil sisteminin filtrasyon özellikleri, yalnızca

örgüsüz geotekstil kullanılarak oluşturulan sistemlerden farklıdır. Yapılan çalışmalar sonucunda, yalnızca örgüsüz geotekstil kullanmak yerine, örgüsüz-örgülü geotekstil çiftinin kullanılması halinde hem dayanım parametrelerinde hem de filtrasyon performansında artış gözleneceği vurgulanmıştır.

Dolez vd. (2017) tarafından yapılan çalışmada, geotekstillerin filtrasyon performansı incelenmiştir. İnce daneli malzeme kullanılarak yapılan filtrasyon testlerinde, geotekstilin hemen üzerinde topaklanmış şekilde malzeme biriktiği ancak 100 günden fazla süreyle tıkanma yaşanmadığı görülmüştür. Yapılan çalışmalar sonucunda, geotekstillerin, ince daneli malzemelerin filtrasyonunda kullanılabileceği görülmüştür.

Miskowaska vd. (2017) tarafından yapılan çalışmada örgüsüz geotekstillerin permeabilitelerindeki değişim incelenmiştir. Geotekstilller, geoteknik uygulamalarda kullanım performanslarından dolayı yaygın olarak kullanılmaktadırlar. Filtre ve drenaj sistemlerinde sıklıkla kullanılan geotekstillerin, yapay olarak tıkanma ve tekrarlı su akışıyla değişen permeabilitesi ve geotekstilin tıkanma mekanizması tomografi cihazıyla incelenmiştir. Yapılan incelemeler sonucunda yapay olarak tıkanma ve tekrarlı su akışı altında geotekstilin permeabilitesi kayda değer ölçüde azalmıştır.

Kermani vd. (2018) tarafından yapılan çalışmada, geotekstil yardımıyla yol altı yapılarda ince daneli malzeme taşınımının azaltılması ele alınmıştır. İnce daneli malzemenin yol yüzeyinden yol tabanına geçişi, yolun, drenaj performansını ve servis ömrünü negatif etkilemektedir. 1/3 ölçekle hazırlanmış, hızlandırılmış yol yükleme deneyleri yapılmıştır. Deneylerden bir tanesinde, geotekstil, yol tabanına yerleştirilmiştir. Yapılan deneylerden alınan sonuçların ışığında; geotekstillerin, ince daneli malzeme göçünü engellemek için kullanılabileceği görülmüştür.

Biswas vd. (2021) tarafından yapılan çalışmada, şişen zeminler üzerine inşa edilmiş yollarda geotekstil kullanımının drenaj performansına etkisi incelenmiştir. Karayollarının kullanım ömrü, yol altı dolgu malzemesinin karakteristik özelliklerine doğrudan bağlıdır. Yollarda sıklıkla karşılaşılan deformasyonlar genellikle yol altı zemini şişmesinden kaynaklıdır. Geotekstil kullanımı, şişme sorunu olan zeminlerde, kolay uygulanabilirliği ve zeminin mekanik-hidrolik özelliklerini iyileştirmesi gibi sebeplerden tercih edilmektedir. Emiciliği ve drenaj kapasitesi yüksek olan yeni tip bir geotekstil, küçük ölçekli laboratuvar ve büyük ölçekli saha deneylerine tabii tutulmuştur. Deneylerden elde edilen veriler ışığında, geotekstillerin, karayollarında kullanımının uzun dönem drenaj performansına pozitif etki ettiği görülmüştür.

Geotekstil göz açıklığının filtrasyonu ve geçirimsizliği doğrudan etkilediği bilinmektedir (Aydilek vd., 2002). Filtrasyon geomalzemesinin içeriğinde bulunan ince daneli partiküller suyun ve zamanın etkisiyle geotekstile göç etmektedir. Göç eden bu partiküller geotekstil gözlerini tıkayabilmektedir. Tıkanma parametrelerini birçok faktör etkileyebilmektedir. ASTM D 5101 (2023) standardında verilen hidrolik eğim oranı (GR) > 1 tıkanma sınırı olarak belirtilmiştir. Ancak Amerika Birleşik Devletleri Ordusu Mühendisleri standardında GR > 3 tıkanma sınırı olarak belirtilmiştir. ASTM D 5101 (2023) standardına istinaden yapılan deneylerde, standartta belirtilen 24 saatlik kısa periyotların stabilize bir hidrolik eğim yakalamak için yetersiz olduğu saptanmıştır. Deneylerin uzun vadelerde de yapılması önerilmektedir.

1.8. Karayollarında Kullanılan Geçirimsizlik Deneyleri

Permeabilite deneylerinin ana amacı permeabilite katsayısının (k) hesaplanıp zeminlerin geçirimsizliği hakkında bilgi sahibi olmaktır. Permeabilite katsayısının ölçümünde kullanılan test yöntemi de katsayının belirlenmesinde ve doğruluğunda önemli bir rol oynamaktadır. Permeabilite katsayısının büyüklüğünü etkileyen başlıca faktörlerden başlıcası dane boyutudur. Dane şekli ve yapısı (structure), boşlukların miktarı ve bağlantıları, üniformluk katsayısı, su muhtevası ve deney başlamadan önceki doygunluk durumu, geçirilen sıvının özellikleri (örneğin su), hidrolik koşullar (hidrolik gradyan, Reynolds sayısı gibi parametreler) ve geçici etkiler (örneğin danelerin taşınması veya yıkanması) gibi diğer etmenlerin permeabilite katsayısı üzerinde daha düşük fakat ihmal edilemez etkileri bulunmaktadır. Permeabiliteyi belirlemek için temelde 2 yöntem kullanılmaktadır. Bunlar sabit seviyeli permeabilite testi ve düşen seviyeli permeabilite testi olarak isimlendirilmektedirler. Sabit seviyeli permeabilite deneyi ASTM D2434 – 19 (2022) standardında ayrıntılı bir şekilde açıklanmıştır.

Bu deney yöntemi, granüler zeminlerde suyun laminar akış şartı için permeabilite katsayısının sabit başlıklı bir yöntemle belirlenmesini kapsamaktadır. Bu işlem, doğal yataklarda bulunabilen ya da dolgu ve asfalt alt tabanlarında kullanılan granüler zeminlerin permeabilite katsayısını ortaya koymayı amaçlamaktadır. Deney sırasında konsolidasyon etkilerini sınırlamak için, bu yöntem yalnızca örselenmiş, 75- μ m (No. 200) elekten %10'dan fazla ince madde geçmeyen granüler zeminlerde uygulanmaktadır. Burada deney için SI

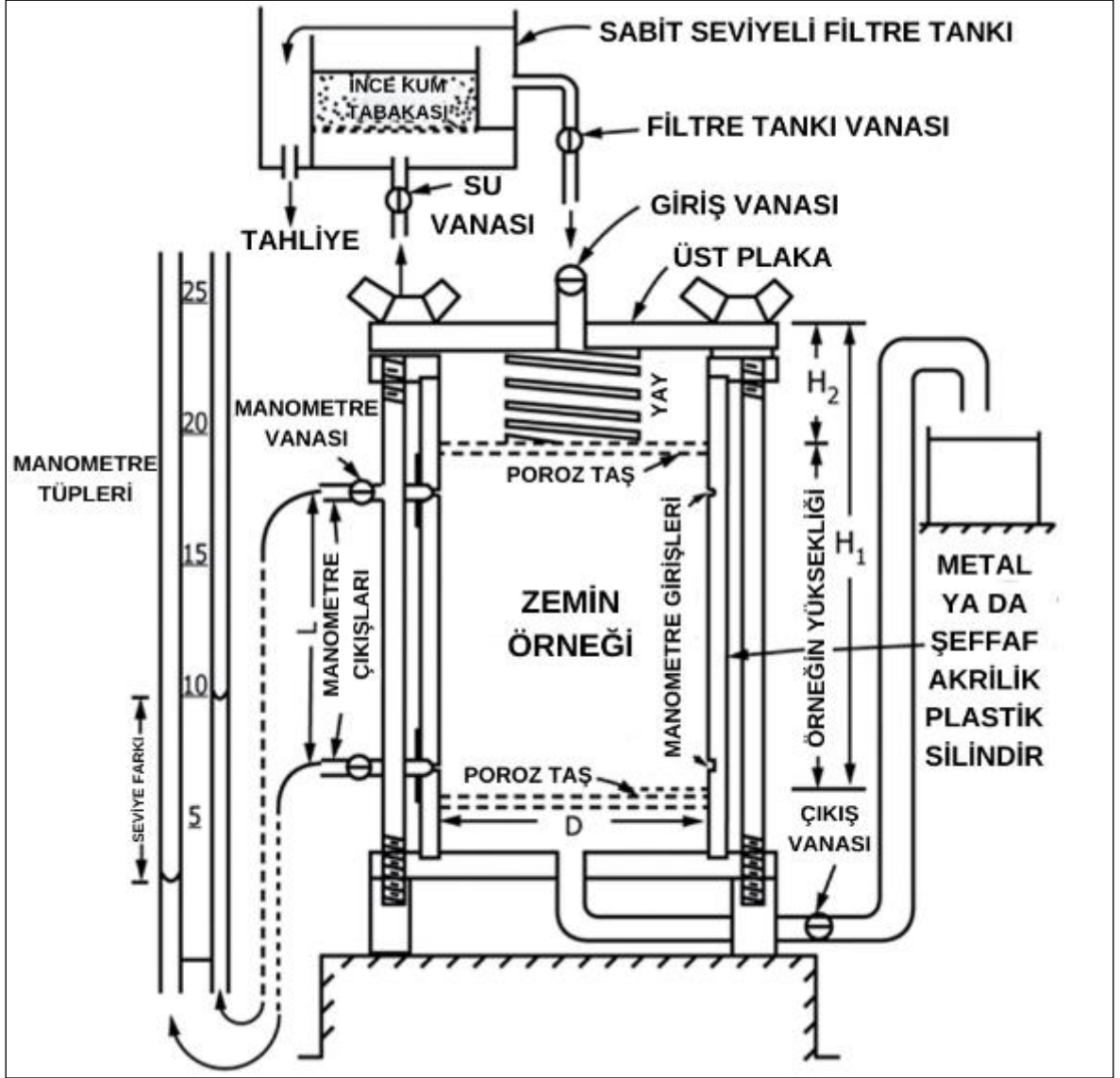
standartlarında önerilen birimler kullanılmaktadır. Diğer ölçü birimleri sadece bilgi amaçlı kullanılabilmekte ve standartta kabul edilmemektedir.

Bu standartta, deneyin uygulanması esnasında ortaya çıkabilecek tüm iş sağlığı ve güvenliği endişeleri konu edilmemiştir. Bu yüzden, bu standardı kullanan kişinin güvenlik, sağlık ve çevre uygulamalarını doğru bir şekilde belirlemesi ve kullanım öncesinde ilgili düzenlemelere uygunluğunu değerlendirmesi gerekmektedir.

Bu deneyin amacına uygun bir biçimde yapılabilmesi için, granüler zeminlerde suyun laminar akışı sağlanmalıdır. Bunun için bazı ideal koşullar gereklidir. İlk olarak, deney süresince zemin hacminde herhangi bir değişiklik olmadan sürekli bir akış sağlanmalı, ikinci olarak zemin boşlukları tamamen suya doymun olmalı ve hava kabarcığı içermemelidir. Üçüncü olarak, akış durumu dengeli olmalı ve hidrolik eğimde bir değişiklik olmamalıdır. Son olarak, hidrolik eğimlerle akış hızı doğrudan orantılı olmalı ve türbülans oluşacak seviyelere gelmemelidir.

Zemin boşluklarının kısmen doyması, türbülanslı akış durumunun önünü açabilmektedir. Deney başlamadan önce yaptığımız ideal koşul kabulü gereği akımın türbülanslı olmaması gerekmektedir.

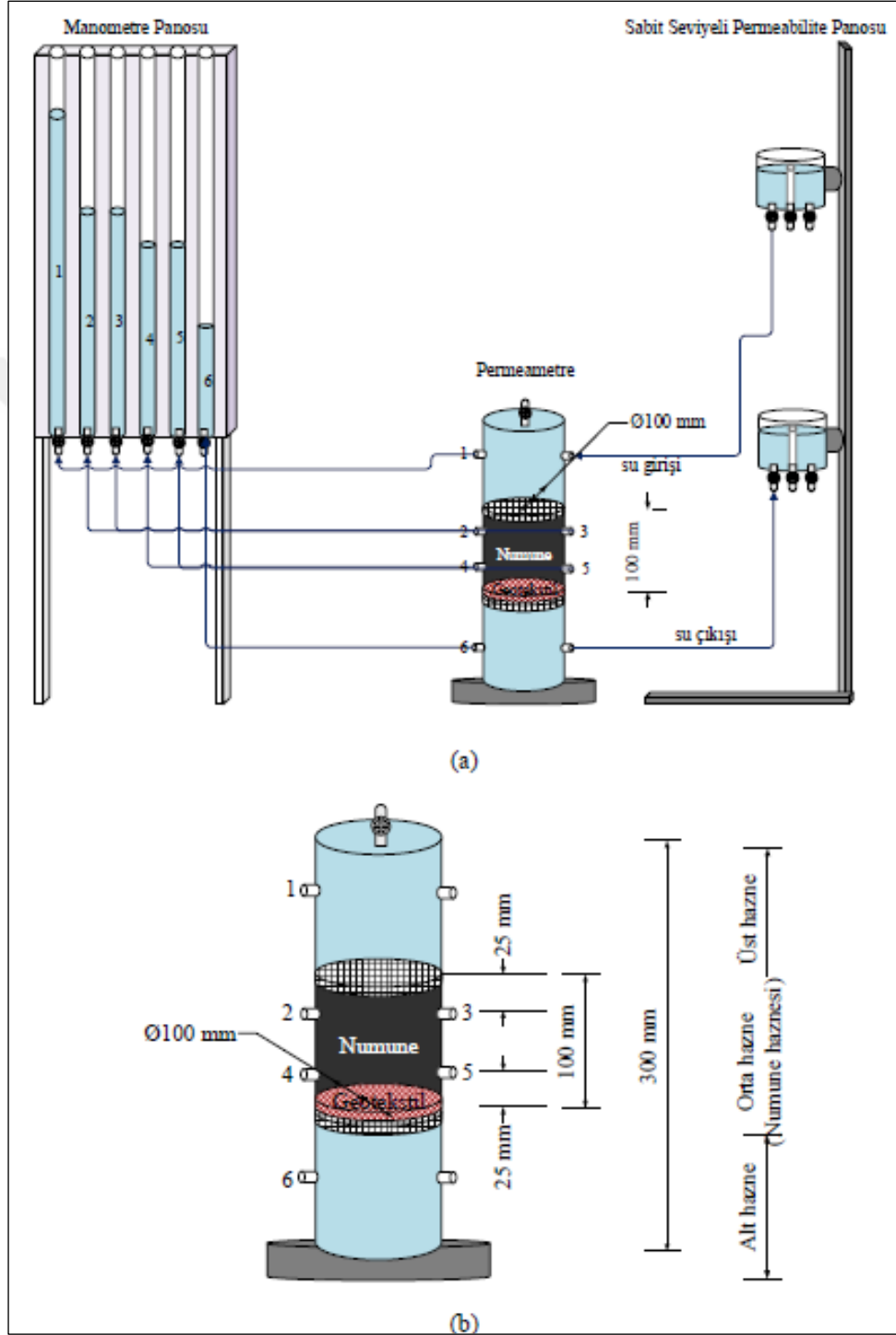
Permeabilite deney sisteminde numunenin yerleştirildiği kalıp, standartlara uygun olarak maksimum dane çapı dikkate alınarak belirlenmektedir. Deney sisteminin ayrıntılı gösterimi Şekil 4'te sunulmuştur.



Şekil 4. Sabit seviyeli permeabilite deney sistemi (ASTM D2434 – 19, 2022)

Karayollarında yüzey altı drenaj sistemlerinde kullanılan agrega-geotekstil sisteminin filtrasyon performansı, ASTM D 5101 (2023) standardıyla test edilmektedir. Bu test yöntemiyle, suya doyurulmuş zemin numunesinin tek yönlü akış koşulları altında, geotekstiller ile uyumluluk performansı ölçümlenebilir. Dikkat edilmesi gereken nokta, zemin numunesinin plastisite indeksi değerinin (I_p) 5'ten küçük olması gerekliliğidir. Standartta belirtilen değerler SI birim sistemini temel almaktadır. Bu standartta, deneyin uygulanması esnasında ortaya çıkabilecek tüm iş sağlığı ve güvenliği endişeleri konu edilmemiştir. Bu yüzden, bu standardı kullanan kişinin güvenlik, sağlık ve çevre uygulamalarını doğru bir şekilde belirlemesi ve kullanım öncesinde ilgili düzenlemelere

uygunluğunu değerlendirmesi gerekmektedir. Deney sistemi ayrıntılı olarak Şekil 5'te sunulmuştur.



Şekil 5. Uzun süreli filtrasyon deney sistemi (Sarıahmetoğlu, 2021)

Geotekstillerde tıkanma, zemin partiküllerinin geotekstilin göz açıklıklarına göç ederek yerleşmesi veya zemin-geotekstil arayüzünde bir tabaka oluşturması sonucunda, geotekstilin geçirimsizliğini azaltması durumudur. Ayrıca, zemin daneciklerinin geotekstilden geçerek sistem dışına taşınması, istenmeyen malzeme kayıplarına yol açabilmektedir. Bu partikül kayıpları, tasarım sırasında hesaba katılmayan stabilite sorunlarına ve ek performans kayıplarına neden olabilmektedir.

2-3 ve 4-5 numaralı manometrelerden elde edilen basınç farkı, agreganın hidrolik eğimini ifade ederken, 4-5 ve 6 numaralı manometreler arasındaki basınç farkı, agrega ve geotekstilden oluşan sistemin hidrolik eğimini göstermektedir. Bu iki değer arasındaki oran, hidrolik eğim oranı (GR) olarak tanımlanmakta ve sistemdeki tıkanmayı değerlendirmede kullanılmaktadır. Bir başka tıkanma göstergesi olan geçirimsizlik oranı ise, agreganın permeabilite katsayısının (k_{agrega}), agrega ve geotekstilden oluşan sistemin permeabilite katsayısına (k_{sistem}) oranı (KR) olarak tanımlanmaktadır. Literatürde birçok farklı malzemeyle geotekstillerin ASTM D 5101 (2023) standardı kapsamında filtrasyon performansı incelenmiştir.

Drenaj sisteminde tıkanma yaşanması durumunda, sistemin geçirimsizlik değerinin, agreganın geçirimsizlik değerinden daha düşük olması beklenmektedir. ASTM D 5101 (2023) standardına göre, geçirimsizlik oranı değerinin 1'den büyük olması durumunda, sistemde bir tıkanma yaşanmaya başladığı söylenebilir. Geçirimsizlik oranının 1'den küçük olması durumunda ise sistemde borulanma durumu ihtimali düşünülmelidir. Borulanma durumunda, sistemin geotekstile daha yakın bölgesinin geçirimsizliği, sistemin diğer kısımlarının geçirimsizliğinden yüksek olması beklenmektedir. ASTM D 5101 (2023) standardında yer alan deney sisteminde yapılan deneylerde, yanlarda bulunan duvarlardan sızıntı olmadığı ve numunenin tam doygun durumda olduğu varsayılmaktadır.

McCulloch vd. (2017) tarafından yapılan çalışmada, RCA'nın yol altı drenaj performansına etkisi ele alınmıştır. RCA'nın yol altı drenaj sistemlerinde kullanılması, sürdürülebilirlik ve ekonomik sebeplerden dolayı tercih edilir hale gelmiştir. Ancak RCA'nın kullanımı, uzun süreli drenaj performansında, tıkanma ve topaklanma gibi negatif etkiler yaratabilmektedir. Yapılan çalışmalar sonucunda, ince dane içeriği yüksek RCA kullanımının drenaj performansını düşürebildiği ancak kalsite bağlı tıkanmaların göz ardı edilebilecek kadar az olduğu gözlemlenmiştir. İnce dane oranı kontrol altında tutulmak kaydıyla, RCA-geotekstil sistemlerinin yol altı drenajı için kullanılabileceği görülmüştür.

Sariahmetoğlu vd. (2024) tarafından yapılan çalışmada, farklı endüstrilerden elde edilen üç farklı geri dönüştürülmüş malzemenin (iki çelik cürufu, geri dönüştürülmüş asfalt kaplaması ve geri dönüştürülmüş beton agregası) drenaj sistemlerinde filtre malzemesi olarak kullanılması durumunda uzun vadeli filtrasyon performansı incelenmiştir. Tıkanma açısından en olumsuz senaryoyu temsil eden küçük bir geotekstil göz açıklığı boyutuna sahip örgüsüz bir geotekstil kullanılmıştır. Uzun vadeli filtrasyon deneyleri, geliştirilmiş ASTM D 5101 (2023) filtrasyon deney sistemi yardımıyla yapılmış olup tıkanma performansını değerlendirmek amacıyla farklı hidrolik eğimler altında hidrolik eğim oranı (GR) ve geçirimsizlik oranı (KR) belirlenmiştir. Sonuçlar, en olumsuz koşullarda bile geri dönüştürülmüş malzemelerin doğal agregalarla karşılaştırıldığında tatmin edici bir filtrasyon performansı sergilediğini ve karayollarında yüzey altı drenaj sistemlerinde agrega malzemesi olarak kullanılabileceğini göstermektedir.

Aydilek ve Edil (2002) tarafından yapılan çalışmada, atık su arıtma çamuru ve farklı göz açıklıklarına sahip örgüsüz geotekstillerden oluşan sistemlerin filtrasyon performansları araştırılmıştır. Bu çamur-geotekstil sisteminin performansını kıyaslayabilmek adına, aynı dane boyut dağılımına sahip olan siltli kum ile de deneyler yapılmıştır. Filtrasyon testinden önce ve sonra, geotekstil numunelerine görüntü analizi uygulanmıştır. Ayrıca, saha deney hücrelerinde geotekstillerin arıtma çamuruyla olan filtrasyon performansları incelenmiştir. Saha koşullarında, kapak altında yerleştirilen geotekstiller 6 ila 12 aylık bir süre sonunda çıkarılarak üzerinde geçirimsizlik deneyleri yapılmıştır. Araştırmacılar, çamurun filtreleme özelliklerinin, aynı dane çapı dağılımına sahip olmasına rağmen, siltli kumdan farklılık gösterdiğini bildirmişlerdir. Çamurdaki organik madde varlığı ve kendine özgü yapısı, daha karmaşık bir filtrasyon davranışı ortaya çıkarmaktadır. Çamur malzeme üzerinde yapılan uzun süreli filtrasyon testinin belirli sınırlamaları bulunmaktadır. Organik çamurda hesaplanan hidrolik eğim oranı (GR), gerçek tıkanma davranışını tam anlamıyla yansıtmamaktadır. Bununla birlikte, tıkanma parametrelerinden biri olan geçirimsizlik oranı (KR), tıkanma mekanizmasının daha iyi anlaşılmasına olanak sağlamaktadır ve GR'nin KR ile uyumlu olup olmadığı değerlendirmeye alınmalıdır. Sonuçlar, çamurun filtreleme performansının aynı dane dağılımına sahip olmasına rağmen siltli kumdan farklı olduğunu göstermiştir. Literatürde yapılmış uzun süreli filtrasyon deneyleri Tablo 4'te özetlenmiştir.

Tablo 4. Literatürde yapılan uzun süreli filtrasyon deneyleri

Çalışma	Agrega	Geotekstil	Geotekstilin gözenek açıklığı	Hidrolik eğim (i)	GR	KR			
Aydilek ve Edil (2002)	Çamur	W, SF,PP (A)	0.6	7.5	2.5	1			
		W, SF,PP (E)	0.6		7	2.3			
		W, SF,PP (F)	0.6		10	2.4			
	İnorganik Siltli Kum	W, SF,PP (A)	0.6	7.5	1.5	1.3			
		W, SF,PP (E)	0.6		1.1	1			
		W, SF,PP (F)	0.6		1.6	0.6			
Kutay ve Aydilek (2005)	Uçucu kül	W1	0.15	6	0.72	0.68			
		W5	0.6		1.4	0.86			
		W5/NW1	0.6/0.15		0.69	0.68			
		W5/NW2	0.6/0.21		0.86	0.85			
		3W5/NW1	0.6/0.30		0.88	0.83			
		W5/NW4	0.6/0.30		1.2	1.23			
	Deniz dibi tarama malzemesi	W1	0.15		1.35	1.26			
		W5	0.6		2.62	1.14			
		W5/NW1	0.6/0.15		2.5	1.4			
		W5/NW2	0.6/0.21		1.46	1.64			
		3W5/NW1	0.6/0.30		2.59	1.31			
		W5/NW4	0.6/0.30		1.85	1.08			
		Abbaspour vd. (2019)	Geri Kazanılmış Beton Malzeme		NW1	0.21	1	1.4	
					NW, NP		2.5	2.2	
PP	5			9.2					
Bilgen vd. (2020)	Geri Kazanılmış Beton Malzeme	W1	0.3	1	0.78	0.76			
				2.5	0.54	0.64			
		W2	0.6	1	1.54	1.05			
				2.5	1.41	1			
		W3	0.43	1	0.43	1.2			
2.5	0.21			1.35					
Sarıahmetoğlu vd. (2024)	Geri Kazanılmış Asfalt Malzeme	NW	0.08	0.33	1.90	0.89			
				0.66	3.05	1.20			
				1	4.61	1.40			
	Geri Kazanılmış Beton Malzeme			0.33	0.85	0.77			
				0.66	0.95	0.76			
				1	1.30	0.72			
	Çelik Cürufu			0.33	2.15	1.25			
				0.66	2.37	1.40			
				1	2.64	1.75			

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

Bu çalışma kapsamında, geri dönüştürülmüş beton agregası ve örgüsüz geotekstil kullanarak oluşturulan sistemin filtrasyon performans laboratuvarında yapılan deneysel yöntemlerle incelenmiştir. Geri dönüştürülmüş beton malzemenin örgüsüz geotekstiller ile kullanılmasıyla oluşturulan drenaj sistemlerinin uzun süreli filtrasyon deneyleri, yeniden tasarlanarak imalatı yaptırılan filtrasyon deney sistemi ile gerçekleştirilmiştir. Yapılan deneylerde, geri dönüştürülmüş beton agregası – örgüsüz geotekstil sisteminin zaman içerisindeki filtrasyon performansı, potansiyel tıkanma mekanizmaları, zaman ve akış yönüne bağlı dane çapındaki değişimler, geotekstil göz açıklığının filtrasyon performansına etkisi ile permeabilite verileri değerlendirilmiştir. Bu bölümde, deneysel çalışmada kullanılan malzemelerin özelliklerine ve deney sistemlerine ilişkin bilgiler yer almaktadır.

2.1. Deneysel Çalışmada Kullanılan Malzemeler

Çalışma, İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Geoteknik Laboratuvarlarında ve Karadeniz Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Geoteknik Laboratuvarlarında yapılmıştır. Deneylerde kullanılan tüm örgüsüz geotekstiller *İSTANBUL TEKNİK* firması tarafından sağlanmıştır.

Çalışma, ülkemizde ve dünyada büyük miktarlarda atıl durumda olan betonun, döngüsel ekonomi modeliyle ekonomiye kazandırılmak adına, karayolları drenaj sistemlerinde yeniden kullanılabilirliğini araştırmayı hedeflemektedir.

2.1.1. Geri Dönüştürülmüş Beton Agregası

Deneyde kullanılan geri dönüştürülmüş beton agregasının (RCA) dane özgül yoğunluğu 2.61'dir. Standart kompaksiyon deneyi (ASTM 698-12, 2021) sonucunda elde edilmiş optimum su muhtevası değeri (w_{opt}) %16.5 ve maksimum kuru birim hacim ağırlık değeri (γ_{MAX}) de 18.32 kN/m³'tür. Modifiye kompaksiyon deneyinden (ASTM 1557-12, 2021) elde edilen optimum su muhtevası değeri %12 ve maksimum kuru birim hacim ağırlık değeri 19.5 kN/m³'tür. Kaliforniya taşıma oranı deneyi sonucunda bulunan CBR değeri %47'dir. Deneyde kullanılan RCA'nın endeks özellikleri Tablo 5'te sunulmuştur.

Tablo 5. Geri dönüştürülmüş beton agregasının endeks özellikleri

Malzeme	Gs	Standart		Modifiye		CBR (%)
		W _{opt} (%)	γ_{kmax} (kN/m ³)	W _{opt} (%)	γ_{kmax} (kN/m ³)	
RCA	2.61	16.5	18.32	12	19.5	47

G_s: Dane özgül yoğunluğu, W_{opt}: optimum su muhtevası, γ_{kmax} : Maksimum kuru birim hacim ağırlık, CBR: Kaliforniya taşıma oranı

Elek analizi deneyi sonucunda, RCA'nın ağırlıkça %12'si ince dane (200 No'lu elek altı malzeme), %74'ü kum ve %14'ü çakıl boyutundadır. 40 No'lu elek altında kalan malzemeyle ASTM D4318-17 (2018) (Zeminlerin Likit Limit, Plastik Limit ve Plastisite İndeksi için Standart Test Yöntemleri) standardına uygun olarak yapılan kıvam limiti deneylerinde, malzemenin, plastik olmadığı belirlenmiştir. Derecelenme katsayısı (C_c) 1.8 ve üniformalık katsayısı (C_u) 45.5 olarak hesaplanmıştır. Birleştirilmiş zemin sınıflandırma sistemine (USCS) göre numune, iyi derecelenmiş kum – siltli kum (SW – SM) olarak sınıflandırılmıştır. Amerikan karayolları zemin sınıflandırma sistemine (AASHTO) göre ise A-1-b (taş parçacıkları çakıl kum) olarak sınıflandırılmaktadır. RCA'nın fiziksel özellikleri, Tablo 6'da sunulmuştur.

Tablo 6. Geri dönüştürülmüş beton agregasının fiziksel özellikleri

Malzeme	İDO (%)	İri Dane (%)		C _c	C _u	PI	Zemin Sınıflandırması	
		Kum (%)	Çakıl (%)				USCS	AASHTO
RCA	12	74	14	1.8	45.5	NP	SW-SM	A-1-b

İDO: İnce dane oranı, C_c: Derecelenme katsayısı, C_u: Üniformalık katsayısı, PI: Plastisite indisi, USCS: Birleştirilmiş zemin sınıflandırma sistemi, AASHTO: Amerikan karayolları zemin sınıflandırma sistemi

Alınan RCA malzemesi birçok farklı elek aralığından malzeme bulundurmaktadır (Şekil 7). KTŞ'de verilen en olumsuz koşulları temsil edecek şekilde dane çapı dağılımı reçete edilmiştir. Reçeteyi hazırlamak için, gerekli elek aralıklarında hazırlanan malzeme, uygun depolama koşullarında saklanmıştır (Şekil 7). Farklı elek aralıklarında olan numune Şekil 8'de sunulmuştur. Reçetenin dane çapı dağılımı ise Şekil 9'da sunulmuştur.



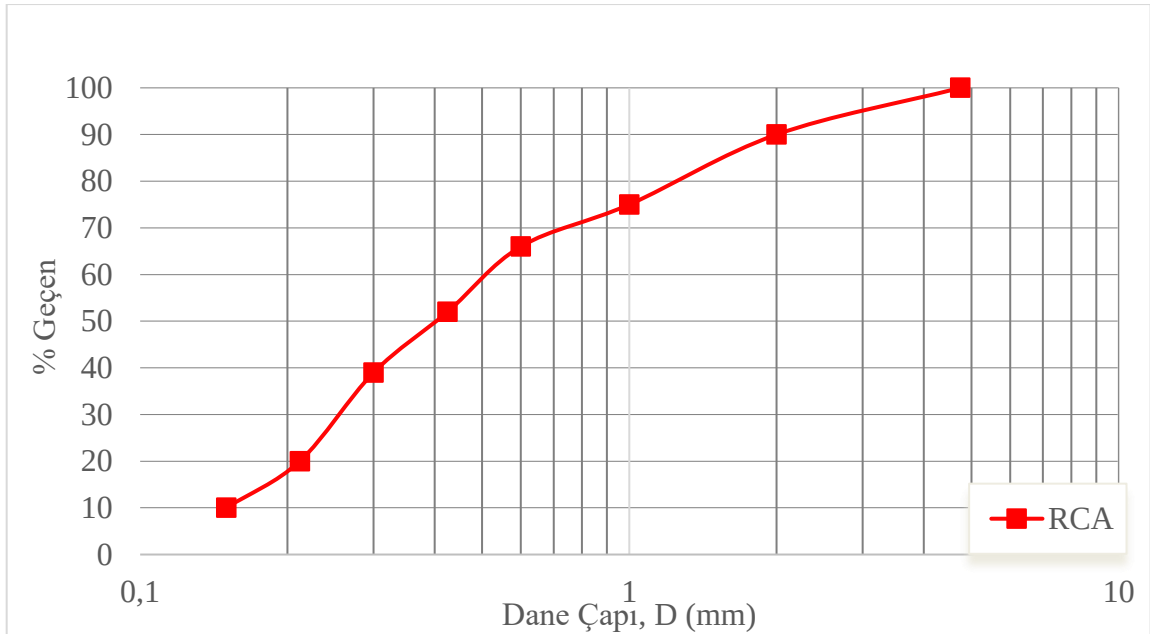
Şekil 6. Elenmemiş RCA malzemesi



Şekil 7. Depolanan RCA malzemesi



Şekil 8. Dane boyutlarına göre ayrılmış RCA malzemesi



Şekil 9. RCA malzeme reçetesinin dane çapı dağılımı

2.1.2. Örgüsüz Geotekstil

Amaca uygun geotekstilin seçilmesi, agrega-geotekstil sisteminden oluşan drenaj elemanlarının filtrasyon performansı üzerinde önemli bir rol oynamaktadır. Bu tür filtre elemanlarının amacı, sistemin stabilitesini korurken, suyun tahliyesine olanak tanıyarak ince malzeme göçünü ve dolayısıyla tıkanmayı engellemektir. Drenaj uygulamalarında kullanılacak geotekstil malzemesinden, iki zıt işlev olan drenaj ve filtrasyon davranışını başarıyla göstermesi beklenmektedir. Genelde filtrasyon uygulamaları için örgüsüz geotekstil tercih edilmektedir. Burada filtrasyon performansını belirleyen en önemli parametre ise görünür açıklık boyutu (AOS) ile düşey düzlemdeki su geçirgenliği değeridir. Araştırmalarda, agrega-geotekstil sistemlerinde görünür göz açıklığının artmasıyla birlikte tıkanma davranışının zayıfladığı görülmektedir. Drenaj sistemleri için kullanılacak geotekstilin görünür açıklık boyutunun, borulanmayı önleyecek ve tıkanıklığa yol açmayacak düzeyde olması gerekmektedir. Borulanma durumunda agrega taneciklerinin geotekstilden geçiş yapması, drenaj sistemindeki agrega tane boyutlarında küçülmeye neden olurken; tıkanmış bir geotekstil, sistemin geçirgenliğini azaltarak, agrega geçirgenliğinin agrega-geotekstil sistemi geçirgenliğinden yüksek olmasına yol açmaktadır. Deneyde kullanılan geotekstillerin üstten görünümü Şekil 10'da yandan görünümeleri ise Şekil 11'de sunulmuştur.



Şekil 10. Deneylerde kullanılan geotekstillerin üstten görünümü



Şekil 11. Çalışmada kullanılan geotekstillerin yandan görünümü

Deneysel çalışmalarda kullanılan örgüsüz geotekstiller, İSTANBUL TEKNİK firmasından temin edilmiştir. Üreticiden temin edilen verilere göre, ASTM D 5261 (2018, Geotekstillerin Birim Ağırlık Ölçümü İçin Standart Test Metodu) standardı kapsamında yapılan birim ağırlık deneyleri sonucunda, deneylerde kullanılan geotekstillerin birim ağırlıkları sırasıyla 123 g/m², 300 gr/m² ve 500 gr/m² olarak bildirilmiştir. Deneylerde kullanılan geotekstillerin nominal kalınlıkları ASTM D 5199 (2019, Geosentetik Malzemenin Nominal Kalınlığının Ölçülmesi için Standart Test Metodu) standardına uygun olarak yapılan deneyler neticesinde, sırasıyla, 1.3 mm, 2.9 mm ve 4.2 mm olarak bildirilmiştir. Geotekstillerin çekme dayanımları, ASTM D 4632 (2023, Geotekstillerin Kopma Yüğü ve Uzaması için Standart Test Metodu) standardı kapsamında, sırayla, - kN/m, 20 kN/m ve 31 kN/m olarak bildirilmiştir. Geotekstillerin kopma uzaması, ASTM D 4632 (2023, Geotekstillerin Kopma Yüğü ve Uzaması için Standart Test Metodu) standardı kapsamında, minimum %50 olduğu belirtilmiştir. Deneyde kullanılan geotekstillerin statik delinmesi, ASTM D 6241 (2022, Geotekstillerin ve Geotekstille İlgili Ürünlerin 50 mm'lik Prob Kullanılarak Statik Delinme Dayanımı için Standart Test Metodu) standardı kapsamında, 1800 N olarak belirtilmiştir. Deneyde kullanılan geotekstillerin diğer özellikleri Tablo 7’de sunulmuştur.

Tablo 7. Geotekstilin fiziksel mekanik ve hidrolik özellikleri

Özellikler		Deney Standardı	GT1	GT2	GT3
Fiziksel Özellikler	Birim ağırlık (g/m ²)	ASTM D 5261 (2018)	123	300	500
	Kalınlık (mm)	ASTM D 5199 (2019)	1.3	2.9	4.2
	Çekme Dayanımı (kN/m)	ASTM D 4632 (2023)	-	20	31
Mekanik Özellikler	Kopma Uzaması (%)	ASTM D 4632 (2023)	Min.50	Min.50	Min.50
	Statik Delinme (N)	ASTM D 6241 (2022)	1800	1800	5800
Hidrolik Özellikler	Su Geçirgenliği (l/s m ²)	ASTM D 4491 (2022)	110	95	42
	Görünür Göz Açıklığı (mm)	ASTM D 4751 (2021)	0.3	0.085	0.076

Deneyde kullanılan geotekstillerin drenaj ve filtrasyon performansını etkileyen en kritik özellikleri hidrolik parametreleridir. Drenaj performansı üzerinde su geçirgenliği önemli bir etkiye sahipken, filtrasyon performansı açısından görünür göz açıklığı belirleyici

bir rol oynamaktadır. Bu çalışmada kullanılan geotekstillerin su geçirgenlikleri, ASTM D 4491 (2022, Geotekstillerin Permittivite ile Su Geçirgenliğini Belirlemek için Standart Test Metotları) standardına uygun olarak test edilmiştir ve sırasıyla 110 l/sm², 95 l/sm² ve 42 l/sm² olarak tespit edilmiştir. Benzer şekilde, görünür göz açıklıkları ASTM D 4751 (2021, Bir Geotekstilin Görünür Açıklık Boyutunun Belirlenmesine Yönelik Standart Test Metotları) standardına uygun şekilde test edilmiş olup, sırasıyla 0.3 mm, 0.084 mm ve 0.076 mm olarak ölçülmüştür.

2.2. DeneySEL Yöntem

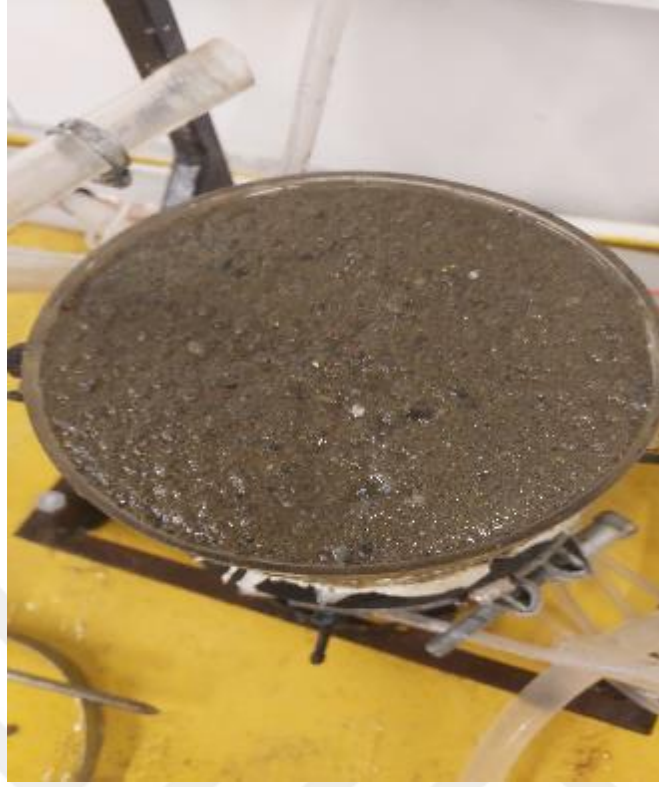
Çalışmada, karayollarında kullanılan agrega-geotekstil drenaj sistemlerinde kullanılmak üzere, geri dönüştürülmüş beton agregasının farklı geotekstil göz açıklıklarında ve farklı hidrolik eğimlerdeki filtrasyon ve drenaj performansları incelenmiştir. İlk aşamada, Karayolları Teknik Şartnamesinde verilen, tıkanma yaratabilecek, en olumsuz durum için reçete hazırlanmıştır. Ardından temin edilen beton agregaları, Karayolları Teknik Şartnamesine göre drenaj malzemesi olarak kullanılabilirdiğinden emin olunduktan sonra, reçeteye uygun şekilde, farklı dane çaplarına göre depolanmış (Şekil 12) ve ardından reçete hazırlanır (Şekil 13). Optimum su muhtevasında, 5 homojen tabakada hazırlanan numune, sıkıştırılma işlemine tabii tutulmuştur. Sistemin suya doymun hale geldiğinden emin olunmakta, bu amaçla deney başlatılmadan önce numune en az 1 hafta boyunca cazibeli bir akış olmaksızın su içinde bekletilmektedir. Hava kabarcıklarının varlığını engellemek amacıyla numunenin üst kalıbından sisteme vakum uygulanmaktadır. Hazırlanan numunenin suya doymun olduğundan ve hava kabarcığı olmadığından emin olunduktan sonra deneyler, çalışma kapsamında bulunan en küçük hidrolik eğimle başlatılmıştır. KR ve GR değerlerinin art arda %5 veya daha az değiştiği durumda, sistemin stabilize olduğu kabul edilmektedir. Sistem stabilize olduğunda hidrolik eğim arttırımına gidilmektedir. Çalışma kapsamında, 0.33, 0.66, 1, 2.5, ve 5 hidrolik eğimleri kullanılmıştır. Tüm hidrolik eğimlerde sistem dengeye geldikten sonra, numunenin kalıpları sökülümüş (Şekil 14) ve numune kalıbın içinden 5 parça olarak çıkartılmıştır. Ardından çıkan numuneye, ince dane göçü olup olmadığını belirlemek adına, tekrardan elek analizi yapılmıştır. Deneyde kullanılan örgüsüz geotekstiller ince kesit şeklinde hazırlanıp optik görüntüleme deneyi yapılmıştır. GR ve KR parametreleri, elek analizi ve optik görüntülemeden çıkan sonuçlar üzerinden, sistemin, filtrasyon ve drenaj kapasite ve performansı hakkında çıkarımlarda bulunulmuştur.



Şekil 12. Laboratuvar ortamında depolanan numuneler



Şekil 13. Reçetelerin hazırlanması



Şekil 14. Numune üst kalıbının sökülmesi

Geri dönüştürülmüş beton agregasının, karayolları yüzey altı drenaj sistemlerinde kullanılmak üzere, agrega-geotekstil çiftinde kullanılabilirliği araştırmak amacıyla, tıkanma ve filtrasyon performansının belirteçleri olan hidrolik eğim oranı ve geçirimsizlik oranlarını belirlemek için, uzun süreli filtrasyon deneyleri yapılmıştır.

Suyun geçişine izin verecek ancak malzeme geçişine izin vermeyecek göz açıklığına sahip bir örtü, silikon yardımıyla manometre girişlerinin iç tarafını örtecek şekilde yapıştırılmış ve kurumaya bırakılmıştır (Şekil 15). Reçete bilgileri Tablo 8’de verilen numuneye, optimum su içeriğine ulaşması amacıyla gerekli miktarda su verilmiş, suyun homojen olarak her noktaya ulaşabilmesi için de bir kaşık yardımıyla numune kabın içinde karıştırılmıştır. Üzerine, su muhtevasını kaybetmemesi için nemli bir bez örtülmüştür. Sıkıştırılma işleminden önce temizlenmiş bir yüzeye serilen geotekstil, kalıbın çapından küçük olacak şekilde kesilerek, numunenin bulunduğu kalıbın tabanına yerleştirilmiştir (Şekil 16). Bu deneyler sırasında kullanılan numuneler, standart kompaksiyon enerjisiyle maksimum kuru birim hacim ağırlıkta ve optimum su muhtevasında 5 tabaka halinde sıkıştırılmıştır. Numune kalıbının, üst ve alt kalıpla bağlantısı sağlandıktan sonra, su giriş-çıkış ve manometre hortumları bağlanmıştır.

Tablo 8. Reçetesi hazırlanan RCA numunesinin elek üstünde kalan ağırlıkları

Elek No	Ağırlık (g)
10 Nolu elek üstü	101.90
18 Nolu elek üstü	152.85
30 Nolu elek üstü	91.71
40 Nolu elek üstü	142.66
50 Nolu elek üstü	132.47
70 Nolu elek üstü	193.60
100 Nolu elek üstü	101.90
100 Nolu elek altı	101.90



Şekil 15. Manometre girişlerinin örtülmesi



Şekil 16. Geotekstilın sistemin tabanına yerleştirilmesi

2.2.1. Geliştirilmiş Uzun Süreli Filtrasyon Deneyi

Geri dönüştürülmüş beton agregası – geotekstil çiftinin filtrasyon performansı, ASTM D 5101 (2023) standardına uygun olarak yeniden tasarlanan uzun süreli filtrasyon deney sisteminde test edilmiştir. Deneyler 0.33, 0.66, 1, 2.5, 5 hidrolik eğimlerinde yapılmıştır. 0.33 hidrolik eğimiyle başlayan deney, sistem kararlı akış durumuna geçtiğinde bir yüksek seviyedeki eğim ile devam ettirilmiştir. Sistemin kararlı akış durumuna ulaştığı, sistemden çıkan suyun miktarına ve manometre değerlerine göre tespit edilmiştir. Standartta belirtilen deney süresi (1 gün), sistemin stabilize olması için gereken zamandan kısa olduğu için yetersiz kalmaktadır.

Geliştirilmiş filtrasyon deney sistemi, standart filtrasyon deney sistemine göre birçok farka sahiptir. Standart filtrasyon deney sisteminde, basınç ölçmek için toplamda 6 adet manometre portu bulunmaktadır. Geliştirilmiş filtrasyon deney sisteminde ise manometre portu sayısı 8'dir. Standart filtrasyon deney sisteminde numune haznesinin çapı 10 cm iken geliştirilmiş filtrasyon deney sisteminde 15 cm'dir. Numune haznesi yüksekliği standart filtrasyon deney sisteminde 10 cm'dir. Geliştirilmiş filtrasyon deney sisteminde ise numune haznesi yüksekliği 15 cm'dir. Standart deney sisteminde kullanılabilecek maksimum agrega

çapı 1 cm iken geliştirilmiş deney sisteminde 1.5 cm'dir. Böylelikle maksimum dane çapı daha büyük olan numuneler, geliştirilmiş sistemle test edilebilmektedir. Standart ve geliştirilmiş deney sistemlerinin karşılaştırması Tablo 9'da sunulmuştur.

Tablo 9. Standart ve geliştirilmiş deney sistemlerinin karşılaştırması

	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 bulunabilecek en büyük dane çapı (mm)	>10	>15

Deney sonucunda, agreganın geçirimsizlik katsayısı (kagrega), sistemin geçirimsizlik katsayısı (ksistem), geçirimsizlik oranı (KR) ve sistemin birçok noktasında hidrolik eğim oranları (GR1 GR2 GR3 GR4), tespit edilebilmektedir. GR ve KR değerlerinin stabil hale gelmesi için gereken süre, standartta belirtilenden çok daha uzundur. Bu nedenle, son 5 GR ve KR ölçümündeki değişim %5'ten daha az olana kadar, deney, aynı hidrolik eğimde devam ettirilmiştir. Sistemin stabilize olması uzun zaman aldığından dolayı çalışmada kullanılan her bir deneyin tamamlanması 4 aydan uzun sürmektedir.

Alt ve orta kalıbı PVC malzemeden, üst kalıbı pleksiglas malzemeden üretilen sistemin, yaşanan birçok problem sonrasında tamamı PVC olan yeni bir deney sistemiyle değiştirilmiştir (Şekil 17). Pleksiglastan üretilen deney sisteminde yapılan çalışmalarda, deney sürecinin hassasiyeti adına, ufak bir su kaçağı olması durumunda dahi deney elimine edilmiştir. Deney süreci boyunca sızdırmazlık için birçok ürün kullanılmıştır (Şekil 18). Ancak buna karşın yaklaşık 4 ay boyunca kurulan 15 farklı numunenin 13'ü deney başlatılamadan ya da başlatıldıktan kısa bir süre sonra, su kaçağı veya hava kabarcıklarının çıkartılamaması sebebiyle elimine edilmiştir. Bir diğer problem, farklı malzemelerin arasındaki rijitlik farkı sebebiyle, lastik veya kelepçe gibi görece esnek olmayan materyaller, kalıplar arası sızdırmazlığı sağlamak konusunda yetersiz kalmıştır (Şekil 19). Ayrıca kalıpları söktükten sonra sızıntıya önlem olarak yapıştırılan sakız bantların temizlenmesi çok uzun ve meşakkatli olmuştur (Şekil 20). Pleksiglastan imalatı yaptırılmış, geliştirilmiş filtrasyon deney sisteminin kalıpları Şekil 21'de, PVC'den imalatı yaptırılmış, geliştirilmiş filtrasyon deney sisteminin kalıpları Şekil 22'de sunulmuştur.



Şekil 17. Tamamı PVC'den imalatı yaptırılan deney sistemi



Şekil 18. Sızdırmazlık için kullanılan farklı ürünler



Şekil 19. Sızdırmazlığın sağlanması için kullanılan lastikler ve kelepçe



Şekil 20. Sakız bantla desteklenmiş kalıp



Şekil 21. Pleksiglastan imalatı yaptırılmış, geliştirilmiş filtrasyon deney sisteminin kalıpları



Şekil 22. Tamamı PVC'den imalatı yaptırılmış, geliştirilmiş filtrasyon deney sisteminin kalıpları

Sistem, şebeke suyuyla beslenmektedir. Şebeke suyu, hortumlar vasıtasıyla pleksiglas panellerin birbirine yapıştırılmasıyla oluşturulan su tankına verilmektedir (Şekil 23). Ancak su tankına ve dolayısıyla sisteme verilmeden önce, şebeke suyu filtrasyon elemanlarıyla filtre edilmektedir (Şekil 24). Bunun sebebi şebeke suyunda bulunan tortu ve diğer malzemenin sisteme karışmasının engellenmesidir. Ayrıca yosunlar ve mikroorganizmaların birikimine bağlı biyolojik tıkanmanın önüne geçilebilmesi adına, düzenli aralıklarla su tankına klor tabletleri atılmaktadır.



Şekil 23. Pleksiglas su tankı ve şamandıra



Şekil 24. Şebeke suyu filtrasyon elemanları

Tanktan gelen su, sisteme girmeden önce, hidrolik eğimin de ayarlandığı, yüksekliği değiştirilebilir pleksiglas kabı doldurmaktadır. Soldaki giriş, tanktan gelen ve sistemi besleyen hortumdur. Ortadaki çıkış, kaba giren suyun debisinin, kaptan çıkan suyun debisinden yüksek olması durumunda, kabın suyla taşmasını engellemek için önlem olarak alınmış tahliye çıkışıdır. Sağdaki çıkış ise, kaptan sisteme girecek olan suyun çıkışıdır. Yüksekliği ayarlanabilir pleksiglas kabın görüntüsü Şekil 25’te sunulmuştur.



Şekil 25. Pleksiglas sisteme giriş kabı

Sistemden çıkan su, ikinci bir pleksiglas kaba dolmaktadır. Bu pleksiglas kapta, sistemden çıkan su kabı tahliye noktasına kadar doldurmaktadır. İkinci kabın tahliye noktasına kadar suyun dolmasının ardından, sistemden belli periyotlarla zamana bağlı çıkan suyun miktarı ölçümlenmektedir. Şekil 26'da sunulan ikinci kabın, yüksekliği değiştirilmemektedir. Soldaki giriş, sistemden çıkan suyun kaba girdiği giriştir. Ortadaki çıkış ise okumanın alındığı tahliye çıkışıdır.



Şekil 26. Pleksiglas sistemden çıkış kabı

Okuma alınmadığı durumlarda, sistemden çıkan ve birinci pleksiglas kaptan artan su, diğer aktif tüm sistemlerinde dahil olduğu bir tahliye sistemine verilmektedir. Tahliye sistemine verilen sular, laboratuvarında bulunan tahliye noktasına yönlendirilerek sistemden uzaklaştırılmaktadır. İş güvenliği kapsamında, yerin kaygan durumuna bağlı olarak artacak

risklerin önlenmesi adına böyle bir çözüm uygulanmıştır. Yapılan tahliye sistemi Şekil 27’de sunulmuştur.



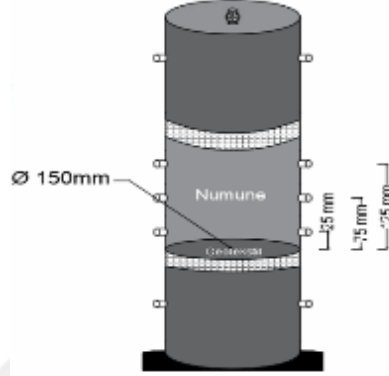
Şekil 27. Deney sisteminden çıkan fazla suyun tahliyesi

Manometrelerin sistemden çıkış aparatları, sistemi besleme ve sistemden çıkan suyu tahliye etme aparatları, suyun hareket ettiği hortumlar ve borular, tank ve suyun değdiği diğer sistemin tüm elemanları pleksiglas veya PVC malzemesinden imal ettirilmiştir. Sistemin hiçbir noktasında suya metal teması bulunmamaktadır. Böylelikle sonraki çalışmalarda metal sızıntısı ve geri dönüştürülmüş malzemelerin çevreye etkisi araştırılabilecektir. Giriş ve çıkış aparatları Şekil 28’de sunulmuştur.



Şekil 28. Giriş ve çıkış aparatları

ASTM D 5101 (2023) standardında verilen uzun süreli filtrasyon deney sisteminde, numune üzerinde yalnızca iki noktadan basınç okuması alınabilmektedir. Geliştirilmiş uzun süreli filtrasyon deney sisteminde ise numune üzerinde 3 farklı noktadan basınç okuması alınabilmektedir. Tabanına geotekstil yerleştirilen numune kalıbında, geotekstilden itibaren 25 mm, 75 mm ve 125 mm yüksekliklere manometre portları yerleştirilmiştir (Şekil 29).



Şekil 29. Manometre portlarının konumları

Manometre portlarından alınan okumalar ve sistemden çıkan suyun miktarı, sistemin filtrasyon ve drenaj performansı hakkında bilgi vermektedir. Deneyden alınan okumalar sonucunda, GR1, GR2, GR3 ve GR4 parametreleri (hidrolik eğim oranları) hesaplanmaktadır. GR1 parametresi geotekstilin bulunduğu bölgedeki hidrolik eğimin, numune kalıbının orta bölgesindeki hidrolik eğime oranını göstermektedir. GR2 parametresi, numune kalıbının orta bölgesindeki hidrolik eğimin, numune kalıbının üst bölgesindeki hidrolik eğime oranını göstermektedir. GR3 parametresi, geotekstil bölgesindeki hidrolik eğimin, numune kalıbının tamamının hidrolik eğime oranını göstermektedir. GR4 ise GR 1 ve GR 3 parametrelerinin ortalamasıdır ve karşılaştırma yapmak amacıyla kullanılmaktadır. GR 1, GR 2, GR 3, GR4 parametreleri Bağıntı 1-4'te sunulmuştur.

$$GR_1 = \frac{i_{0-25}}{i_{25-75}} = 2 \times \frac{h_{25}-h_0}{h_{75}-h_{25}} \quad (1)$$

$$GR_2 = \frac{i_{25-75}}{i_{75-125}} = \frac{h_{75}-h_{25}}{h_{125}-h_{75}} \quad (2)$$

$$GR_3 = \frac{i_{0-25}}{i_{25-125}} = 4 \times \frac{h_{25}-h_0}{h_{125}-h_{25}} \quad (3)$$

$$GR_4 = \frac{GR_1 + GR_2}{2} \quad (4)$$

ASTM D 5101 (2023) Standardında verilen KR parametresi, agreganın permeabilite katsayısının sistemin permeabilite katsayısına oranı olarak verilmiştir. Bağıntı 5-7’de K değerleri sunulmuştur.

$$k_{sistem} = \frac{Q}{A \times t} \times \frac{1}{i_{sistem}} \times \frac{\mu_T}{\mu_{20}} = \frac{Q}{A \times t} \times \frac{l}{h_{150} - h_0} \times \frac{\mu_T}{\mu_{20}} \quad (5)$$

$$k_{agrega} = \frac{Q}{A \times t} \times \frac{1}{(U_{ort} - A_{ort})} \times \frac{\mu_T}{\mu_{20}} \quad (6)$$

$$KR = \frac{k_{agrega}}{k_{sistem}} \quad (7)$$

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

Q : t zamanında biriken akış miktarı, (cm³),

I : Hidrolik eğim,

A : Numune kesit alanı, (cm²),

t : Q miktar drene edilen suyun toplanması için gerekli olan zaman, (s),

μ_T : T sıcaklıkta suyun viskozitesi,

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

l : Numunenin uzunluğu,

U_{ort} : Üst manometre okumalarının ortalaması,

A_{ort} : Alt manometre okumalarının ortalaması.

Uzun süreli filtrasyon deneyinin sonlanmasının numunenin kalıp söküm işlemleri başlamaktadır. Besleme ve çıkış hücrelerinden su, ince dane hareketine neden olmayacak hızda tahliye edilmektedir. Tahliye tamamlandıktan sonra manometre portlarına bağlı hortumlar ardından da alt ve üst kalıplar sökülmemektedir. Borulanma olup olmadığını anlamak adına sistemdeki kayıp hesaplanmaktadır. Sistemdeki kayıp, kalıp içine konan numune

miktarının, deney sonunda kalan numune miktarıyla kıyaslanarak hesaplanmaktadır. Çalışmada, kaybın ihmal edilebilir düzeyde olduğu görülmüştür. Deney sırasında ince daneli malzeme göçü varlığı da araştırılmıştır. Hipotezde olduğu üzere, ince dane göçünün başladığı, deney sonrası elek analizi yapılarak anlaşılabilmektedir. Normal şartlarda homojen olarak 5 tabaka şeklinde sıkıştırılan numune, 5 tabaka şeklinde çıkartılıp tekrardan elek analizi deneyine tabii tutulmaktadır. Yerçekimi ve suyun akış yönünün etkisiyle, ince dane yoğunluğunun geotekstile yakın bölgelerde olması beklenmektedir.

KTÜ Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü tarafından desteklenmeye uygun görülen proje (FAY-2024-11267) kapsamında, uzun süreli filtrasyon deney sistemi Karadeniz Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Geoteknik Laboratuvarı Geçirimlilik Deney odasına kurulmuştur (Şekil 30).



Şekil 30. Karadeniz Teknik Üniversitesi Geoteknik laboratuvarına kurulan filtrasyon deney sistemi

2.2.2. Filtrasyon Deneyi Sonrası Numune Üzerine Elek Analizi Deneyi

Filtrasyon deneyinin sonunda, sistemdeki su, ince dane göçüne neden olmayacak şekilde drene edilmektedir. Suyun drene edilmesinin ardından numune kalıbı diğer bağlantı elemanlarından ve kalıplarından ayrılmaktadır. 15 cm'lik numune, 2.5 cm, 5 cm, 5 cm, 1.6 cm ve 0.9 cm olarak 5 aşamada kalıptan çıkartılmaktadır (Şekil 31). Numuneler 5 farklı metal tepside etüve atılarak, 24 saat bekletilmektedir. Ardından 5 tabakanın tamamı sırayla 10 No'lu, 18 No'lu, 30 No'lu, 40 No'lu, 50 No'lu, 70 No'lu ve 100 No'lu eleklerden elenmektedir.

Numunelerin dane çapı dağılımı belirlenerek, reçetede verilen dane çapı dağılımı ile kıyaslaması yapılmaktadır. Teoride beklenen, ince danelerin su akımı ve yerçekimi yönünde aşağıya doğru göç etmesinden dolayı, alt katmanlarda ince dane oranının üst katmanlara kıyasla yüksek olmasıdır. Çalışmada kullanılan geotekstilde gün ışığı almayacak bir yerde hava geçirmez kapalı bir kapta oda sıcaklığında kurumaya bırakılır (Şekil 32). Çalışmada karşılaşılan sonuç, teoriyle paralellik göstermektedir.



Şekil 31. Deney sonrası 5 tabakada çıkartılan RCA numunesi



Şekil 32. Deney sonrası kalıptan çıkarılan geotekstil

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmalar kapsamında, geri dönüştürülmüş beton malzemesi, farklı göz açıklıklarına sahip geotekstillerle birlikte, çeşitli hidrolik eğimler altında uzun süreli filtrasyon testiyle deneysel olarak incelenmiştir. Filtrasyon ve tıkanma davranışlarını değerlendirmek amacıyla hidrolik eğim oranı (GR) ve geçirimsilik oranı (KR) parametreleri hesaplanmış ve analiz edilmiştir. Literatürde, geri dönüştürülmüş malzeme-geotekstil sisteminin filtrasyon performansı, uygulamada nadir olarak kullanılan, görece yüksek hidrolik eğimlerde, $i=1-10$ arası, incelenmiştir. Bu çalışmada, RCA-geotekstil sisteminin filtrasyon performansı literatüre ek olarak, yüksek hidrolik eğimlerin yanı sıra, düşük hidrolik eğimlerde de incelenmiştir. Çalışmada kullanılan hidrolik eğimler sırasıyla, 0.33, 0.66, 1, 2.5 ve 5 olarak seçilmiştir. Çalışmada yapılan filtrasyon deneylerinde, farklı hidrolik eğimlerin yanı sıra farklı göz açıklıklı geotekstiller de kullanılmıştır.

Uzun süreli filtrasyon deneyleri (LFT) ASTM D 5101 (2023) standardında uygun olarak, gerçeğe daha yakın ve ayrıntılı sonuç verecek şekilde yeniden tasarlanmış ve imalatı yaptırılmıştır. Standartta verilen deney sisteminde numune kalıbının boyutları, çap 10 cm ve yükseklik 10 cm olarak belirlenmiş iken, standardın izin verdiği ölçülerde, numune kalıp boyutları, çap 15 cm ve yükseklik 15 cm olarak yeniden tasarlanıp imal ettirilmiştir. Bunlara ek olarak, standartta verilen filtrasyon deney sisteminde, toplamda 6 adet manometre girişi bulunurken, geliştirilmiş filtrasyon deney sisteminde ise 8 adet manometre girişi bulunmaktadır. Ayrıca geotekstil tabanından itibaren, numune kalıbının üzerinde, 25 mm, 75 mm ve 125 mm yüksekliklere yerleştirilen manometre girişleri sayesinde sistemin tıkanma durumu standarda kıyasla, gerçeğe daha yakın ve ayrıntılı sonuçların bulunmasını mümkün kılmaktadır. Hipotez edildiği üzere, sistemin geotekstile yakın bölgelerinde, tıkanmanın daha fazla olduğu, geotekstilden uzaklaştıkça bu tıkanmanın da azaldığı gözlemlenmiştir.

Standartta tanımlandığı üzere, uzun süreli filtrasyon deneyinden elde edilen veriler ışığında hesaplanan RCA-geotekstil sisteminde bir akış kısıtı yaşanmıyor ise GR değerinin 1 olması beklenmektedir. Sistemde herhangi bir ölçüde akış kısıtı bulunmuyor ve borulanma söz konusu ise GR değerinin 1'den küçük olması beklenmektedir. Sistemde borulanma mevcut ise, sistemdeki ince danelerin, numune boyunca, akış ve yerçekimi yönünde hareket ederek, geotekstili geçmesi ve buna bağlı kayda değer miktarda kütle kaybı gözlenmesi

beklenmektedir. Sistemde bir tıkanma olması durumunda, GR değerinin 1'den büyük olması beklenmektedir. GR değeri büyüdükçe, sistemdeki tıkanmanın arttığı ve sistemin hizmet kapasitenden uzaklaştığı düşünülmektedir.

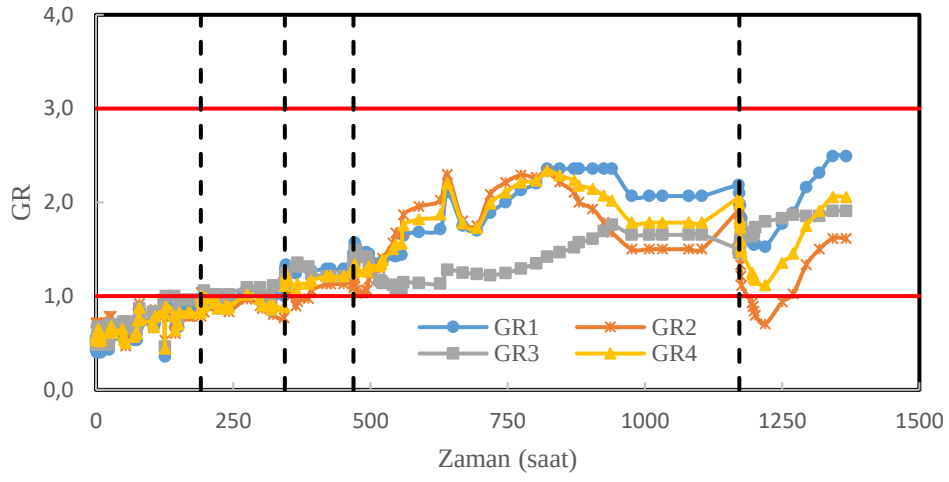
İnce danelerin hipotez edildiği şekliyle, yerçekimi ve suyun akış yönü olan yukarıdan aşağıya olacak şekilde göç ettiği, deney sonrası yapılan elek analizleriyle desteklenmiştir. Tüm numunelerde, alt tabakalara doğru gidildikçe ince dane oranının arttığı gözlemlenmiştir.

Her ne kadar GR parametreleri ile sistemin filtrasyon ve geçirimsizlik parametreleri hakkında yorum yapılabilse de KR parametresi ile bu yorumun desteklenmesi gerekmektedir. Uzun süreli filtrasyon deneyleri sonucunda elde edilen verilerin ışığında hesaplanan GR parametreleri, KR parametresiyle beraber incelenmiştir. Sonuç olarak deneye tabii tutulan tüm numunelerde kısmi tıkanma yaşandığı ve hidrolik eğimin artışına bağlı bu tıkanmanın arttığı gözlemlenmiştir.

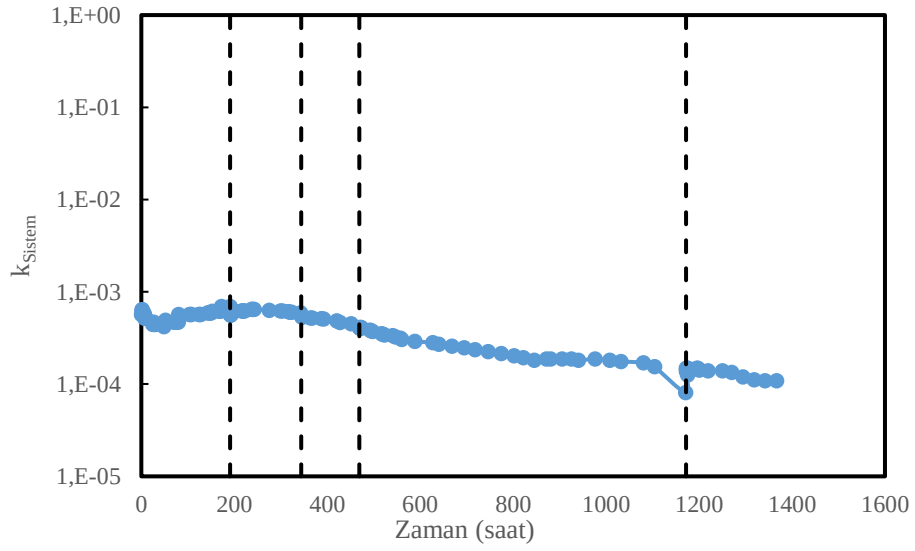
Deney sonrasında, tüm numunelerde, en alt kalıpta biriken numune miktarı, göz ardı edilebilecek seviyelerde olduğu görülmüştür. İnce daneciklerin su akış yönünde göç edip geotekstili aşması olarak nitelendirilen borulanma durumunun, en alt kalıpta biriken numunenin göz ardı edilebilir seviyelerde olması sebebiyle, yaşanmadığı düşünülmektedir.

3.1. GT1 - RCA Sistemi Filtrasyon Performansı

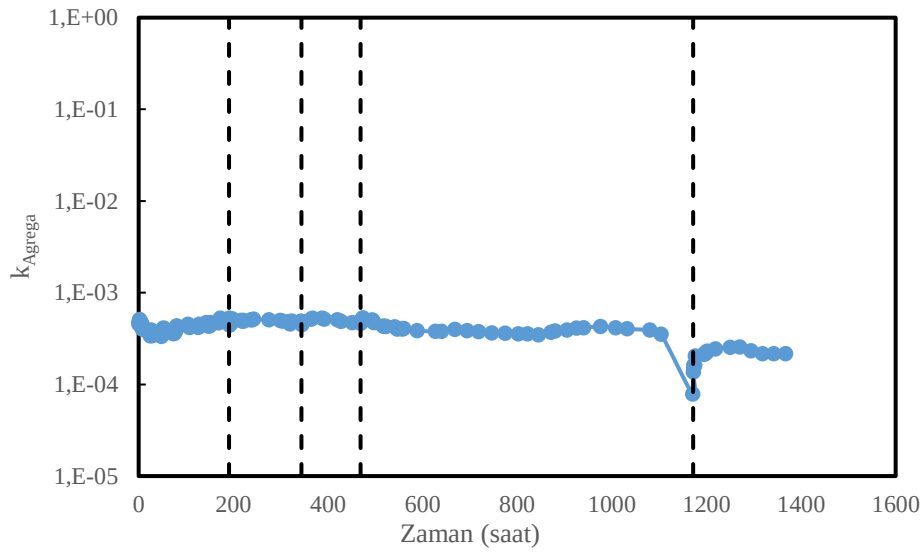
0.3 milimetre göz açıklıklı geotekstil – geri dönüştürülmüş beton malzeme (GT1 - RCA) sistemi uzun süreli filtrasyon deneyinden elde edilen veriler ışığında değerlendirilerek, KR ve GR parametreleri hesaplanmıştır. Hidrolik eğim arttıkça, GR değerlerinin de arttığı gözlemlenmiştir. En yüksek hidrolik eğim olan $i = 5.0$ değerinde dahi, GR, tıkanma sınırı olan 3'ü aşmamıştır. Sistemin tıkanmaya başladığı ($GR > 1$) ancak $GR < 3$ olduğundan çalışmaya devam ettiği söylenebilir. KR parametresinin değerleri, GR parametresinin değerleriyle paralellik göstermektedir ve zamana bağlı tıkanma durumunu destekler niteliktedir. GR parametresinin zamana bağlı değişimi Şekil 33'te, sistemin geçirimsizliğinin bir ifadesi olan k_{sistem} 'in zamana bağlı değişimi Şekil 34'te, agreganın geçirimsizliğini gösteren k_{agrega} 'nın zamana bağlı değişimi Şekil 35'te ve KR parametresinin zamana bağlı değişimi Şekil 36'da sunulmuştur.



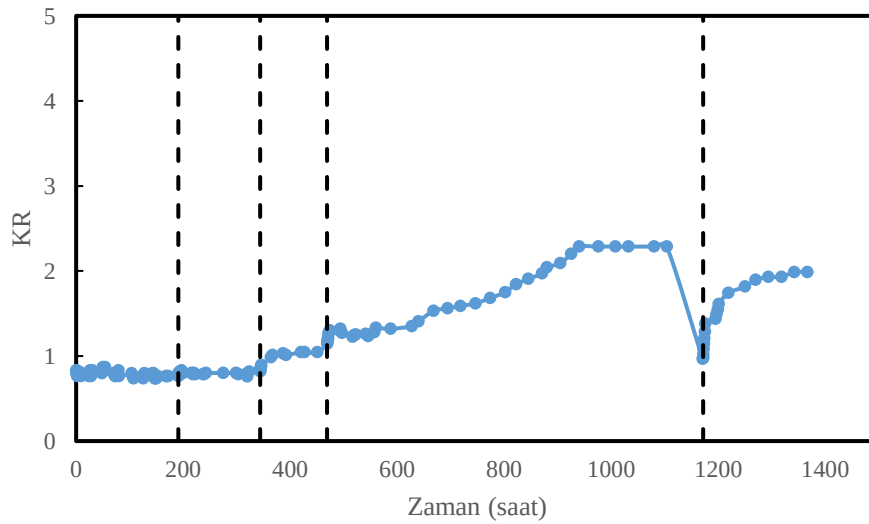
Şekil 33. GR parametresinin GT1 - RCA sistemi için zamana bağlı değişim grafiği



Şekil 34. k_{sistem} parametresinin GT1 - RCA sistemi için zamana bağlı değişim grafiği



Şekil 35. k_{Agrega} parametresinin GT1 - RCA sistemi için zamana bağlı değişim grafiği



Şekil 36. KR parametresinin GT1 - RCA sistemi için zamana bağlı değişim grafiği

Uzun süreli filtrasyon deneyinde, minimum 24 saat aralıklarla alınan, son 5 okumadan alınan değerler ışığında hesaplanan GR ve K parametrelerinin değişimi, %5'ten az olması durumunda sistemin söz konusu hidrolik eğim için denge noktasına ulaşmış olduğu söylenebilmektedir. Tüm hidrolik eğimler için, dengeye ulaşmış sistemdeki, GR değerleri Tablo 10'da K değerleri ise Tablo 11'de sunulmuştur. Hidrolik eğimin artmasına bağlı olarak, sistemdeki tıkanmanın arttığı yöndeki hipotezi destekleyici yönde, tüm GR ve KR değerlerinde artış gözlemlenmiştir.

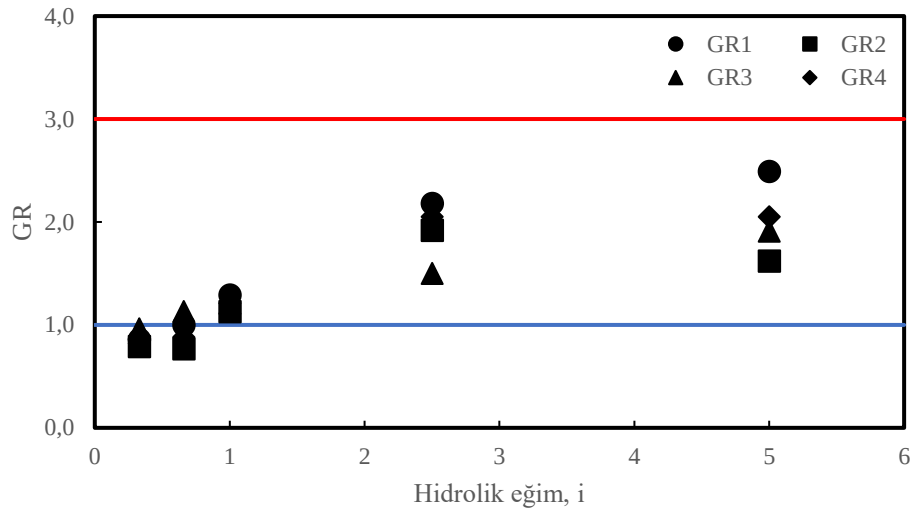
Tablo 10. GR parametrelerinin GT1 - RCA sistemi için hidrolik eğime bağlı değişim tablosu

Geotekstil Göz Açıklığı	Malzeme	Hidrolik eğim (i)	GR1	GR2	GR3	GR4 =(GR1+GR2)/2
0,3 mm	RCA	0,33	0,86	0,79	0,96	0,82
		0,66	1,00	0,77	1,13	0,88
		1	1,29	1,13	1,21	1,21
		2,5	2,18	1,92	1,50	2,05
		5	2,49	1,62	1,91	2,05

Tablo 11. K parametrelerinin GT1 - RCA sistemi için hidrolik eğime bağlı değişim tablosu

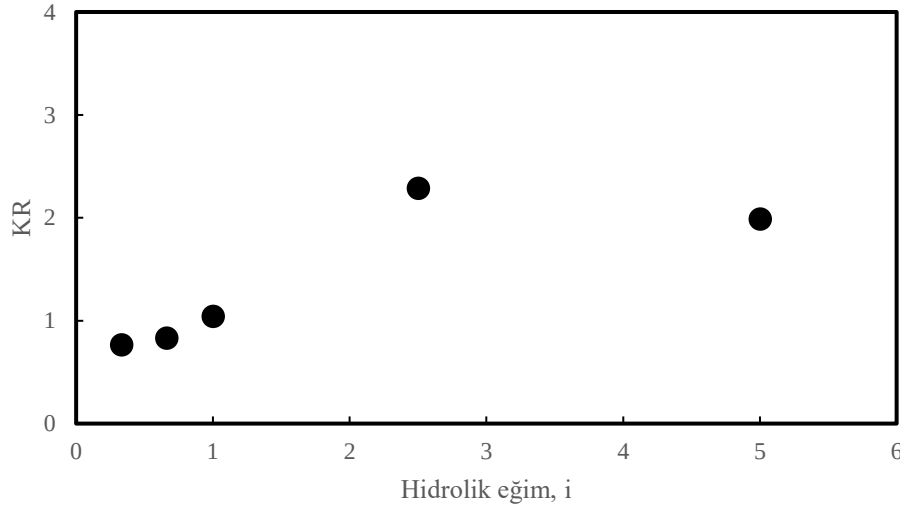
Geotekstil Göz Açıklığı	Malzeme	Hidrolik eğim (i)	k _{agrega} (cm/s)	k _{sistem} (cm/s)	KR
0,3 mm	RCA	0,33	5,28E-04	6,91E-04	0,76
		0,66	4,89E-04	5,89E-04	0,83
		1	4,72E-04	4,52E-04	1,04
		2,5	3,52E-04	1,54E-04	2,29
		5	2,16E-04	1,09E-04	1,99

i=1 hidrolik eğimine kadar, sistemin GR değerleri 1 civarındayken, hidrolik eğimin 2,5 mertebesi ve üstüne çıkartılmasıyla, sistemin GR değerlerinin de 1'in üzerine çıktığı görülmektedir. Sistemde ince dane göçüne bağlı tıkanma durumu görülmeye başlamıştır. İnce dane göçünün henüz başlamadığı düşük hidrolik eğimlerde, hipoteze edilen, geotekstile yaklaştıkça tıkanmanın artması durumu ($GR1 > GR3 > GR2$) gözlemlenmemiştir. Hidrolik eğimin mertebesi arttıkça, geotekstile yakın bölgelerdeki GR değerlerinin arttığı bu sebeple de ince dane göçünün başladığı söylenebilmektedir. Dengeye ulaşmış sistemlerdeki hidrolik eğime bağlı GR değerlerinin değişimi Şekil 37'de sunulmuştur.



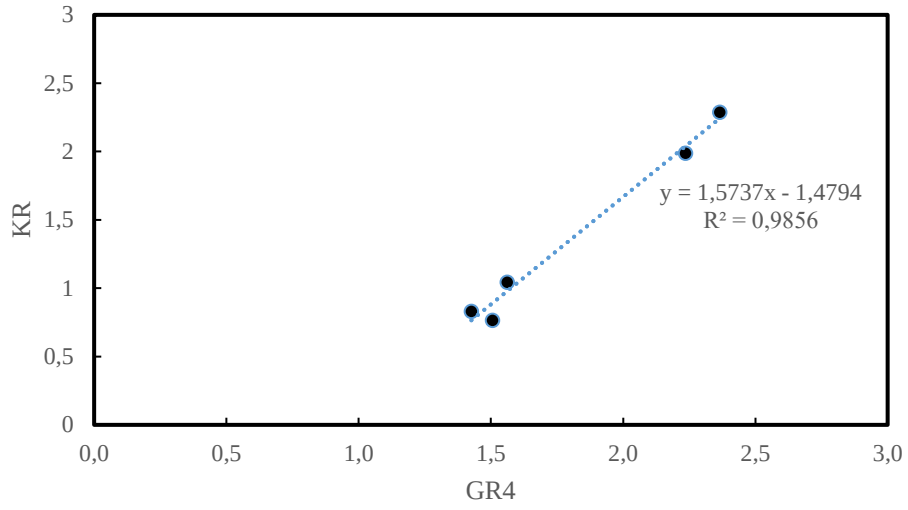
Şekil 37. GT1 - RCA sistemi için hidrolik eğime bağlı GR parametrelerinin değişimi

Hidrolik eğime bağlı GR değerlerindeki artışı ve geotekstile yakın bölgelerdeki GR değerlerinin görece yüksek olmasından kaynaklı, sistemin tıkanmaya başladığı yorumu, KR parametresinin değerinin, hidrolik eğime bağlı olarak artmasıyla da desteklenmektedir. KR parametresinin hidrolik eğime bağlı olarak değişimi Şekil 38’de sunulmuştur.



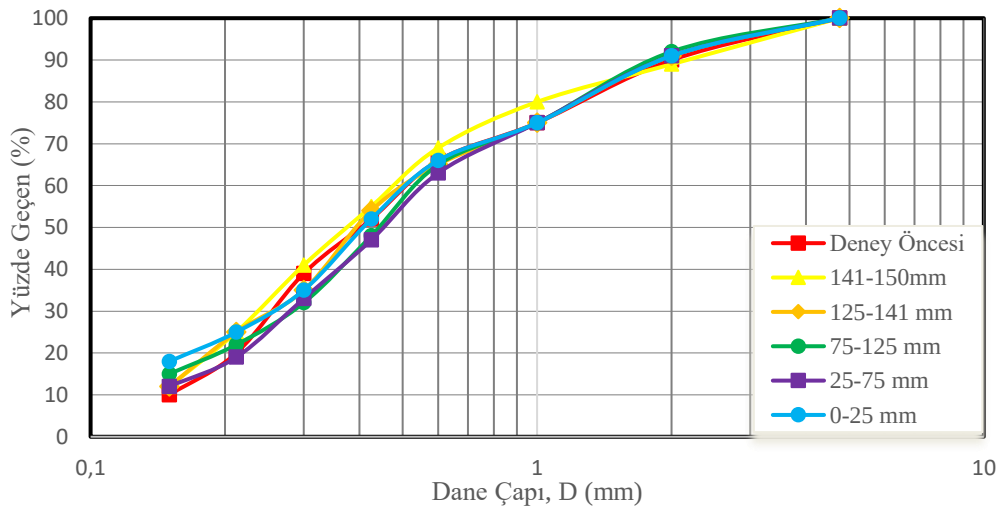
Şekil 38. GT1 - RCA sistemi için hidrolik eğime bağlı KR parametrelerinin değişimi

KR parametresinin GR parametrelerinin ortalaması olan GR4 parametresine bağlı değişimi Şekil 39’da sunulmuştur. Regresyon analizi sonucu, parametrelere uygun olarak çizilen doğrusal regresyon çizgisinin eğimi yaklaşık 1,57 olduğu görülmüştür.



Şekil 39. GT1 - RCA sistemi için GR4 parametresine bağlı KR parametresinin değişimi

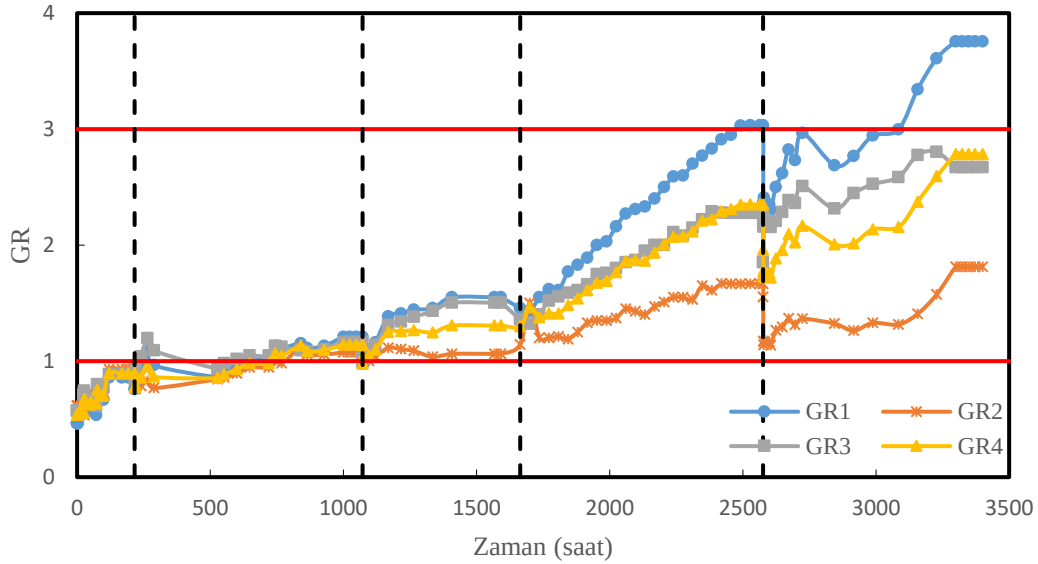
Uzun süreli filtrasyon deneyi sonrasında yapılan elek analizde, hipoteze edildiği üzere, ince dane göçü yaşandığı görülmüştür. Alt katmanlardaki ince dane oranının üst katmanlara ve deney öncesi duruma kıyasla daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. 0.3 mm göz açıklıklı geotekstil sisteminin granülometre eğrileri Şekil 40’da sunulmuştur.



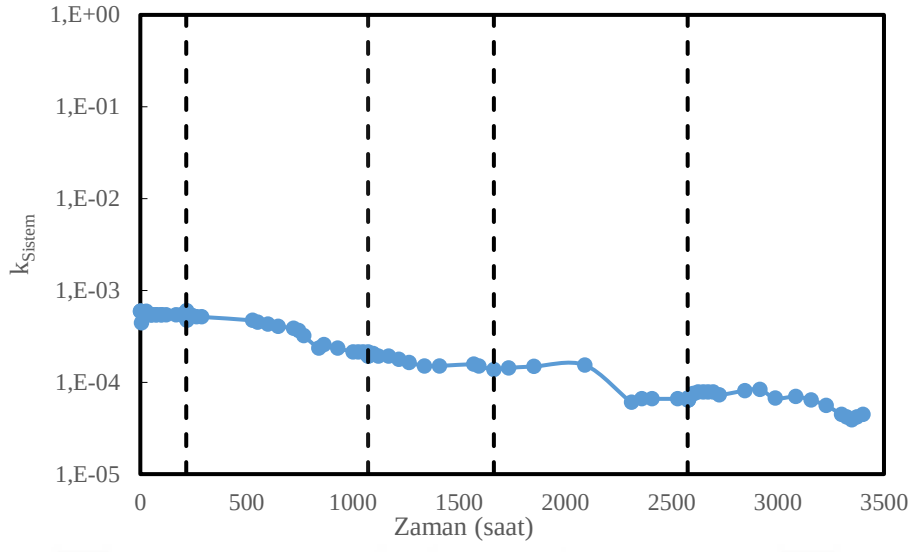
Şekil 40. GT1 - RCA sistemin granülometre eğrileri

3.2. GT2 - RCA Sistemi Filtrasyon Performansı

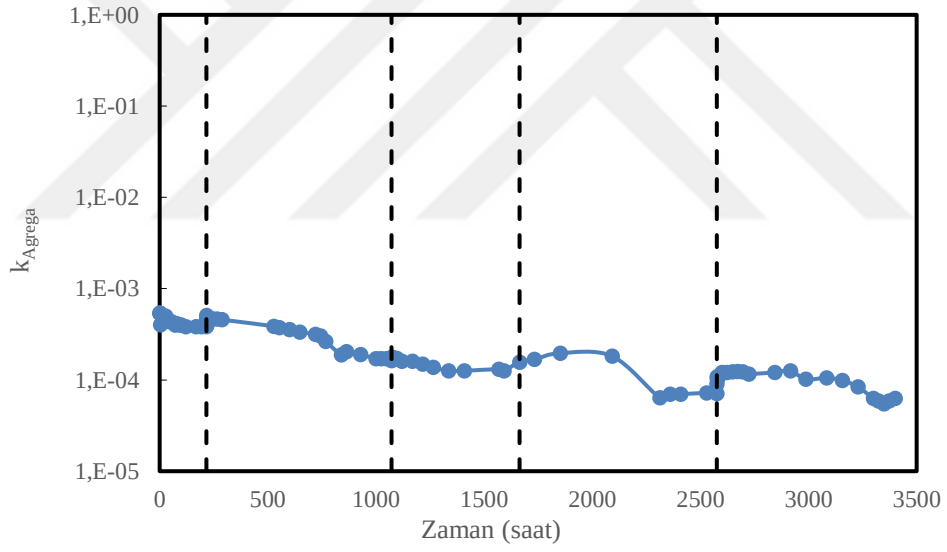
0.084 milimetre göz açıklıklı geotekstil – geri dönüştürülmüş beton malzeme (GT2 - RCA) sistemi uzun süreli filtrasyon deneyinden elde edilen veriler ışığında değerlendirilerek, KR ve GR parametreleri hesaplanmıştır. Hidrolik eğim arttıkça, GR değerlerinin de arttığı gözlemlenmiştir. $i=5$ hidrolik eğimine kadar, GR değerlerinin 1 ila 3 arasında olduğu görülmektedir. Sistem kısmi tıkanmalar yaşamakla birlikte, işlevini yerine getirebilmektedir. Sistemin hidrolik eğiminin $i=5$ seviyesine çıkarılmasıyla birlikte, GR değerlerinde belirgin bir artış gözlemlenmiş ve özellikle geotekstil bölgesinin geçirimsizliği açısından kritik öneme sahip olan GR 1 parametresinin, tıkanma sınırı olarak kabul edilen 3 değerini aştığı tespit edilmiştir. KR parametresinin değerleri, GR parametresinin değerleriyle paralellik göstermektedir ve zamana bağlı tıkanma durumunu destekler niteliktedir. GR parametresinin zamana bağlı değişimi Şekil 41’de, sistemin geçirimsizliğinin bir ifadesi olan k_{sistem} ’in zamana bağlı değişimi Şekil 42’de, agreganın geçirimsizliğini gösteren k_{agrega} ’nın zamana bağlı değişimi Şekil 43’de ve KR parametresinin zamana bağlı değişimi Şekil 44’de sunulmuştur.



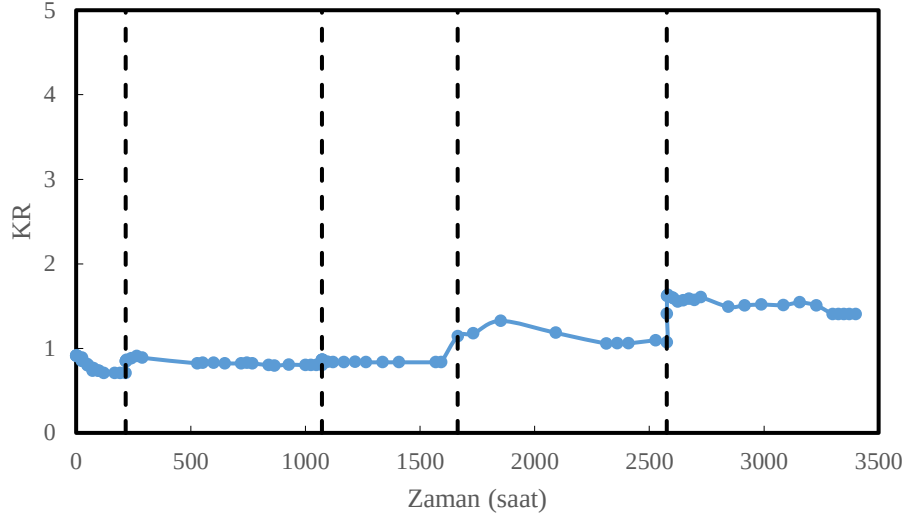
Şekil 41. GR parametresinin GT2 - RCA sistemi için zamana bağlı değişim grafiği



Şekil 42. k_{Sistem} parametresinin GT2 - RCA sistemi için zamana bağlı değişim grafiği



Şekil 43. k_{Agrega} parametresinin GT2 - RCA sistemi için zamana bağlı değişim grafiği



Şekil 44. KR parametresinin GT2 - RCA sistemi için zamana bağlı değişim grafiği

Uzun süreli filtrasyon deneyinde, minimum 24 saat aralıklarla alınan, son 5 okumadan alınan değerler ışığında hesaplanan GR ve K parametrelerinin değişimi, %5'ten az olması durumunda sistemin söz konusu hidrolik eğim için denge noktasına ulaşmış olduğu söylenebilmektedir. Tüm hidrolik eğimler için, dengeye ulaşmış sistemdeki, GR değerleri Tablo 12'da K değerleri ise Tablo 13'te sunulmuştur. Hidrolik eğimin artmasına bağlı olarak, sistemdeki tıkanmanın arttığı yöndeki hipotezi destekleyici yönde, tüm GR ve KR değerlerinde artış gözlemlenmiştir.

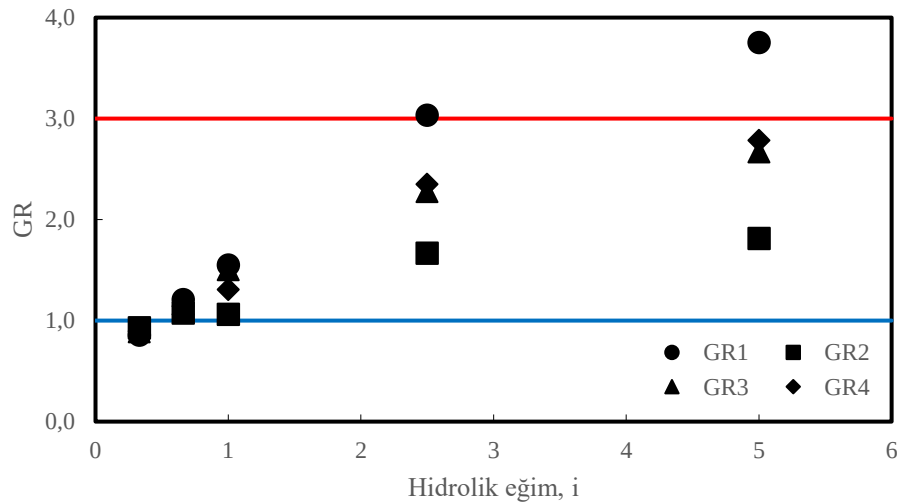
Tablo 12. GR parametrelerinin GT2 - RCA sistemi için hidrolik eğime bağlı değişim tablosu

Malzeme	Hidrolik eğim (i)	GR1	GR2	GR3	GR4 =(GR1+GR2)/2
RCA	0,33	0,86	0,93	0,89	0,90
	0,66	1,21	1,08	1,16	1,15
	1	1,55	1,06	1,50	1,31
	2,5	3,03	1,67	2,28	2,35
	5	3,75	1,81	2,67	2,78

Tablo 13. K parametrelerinin GT2 - RCA sistemi için hidrolik eğime bağlı değişim tablosu

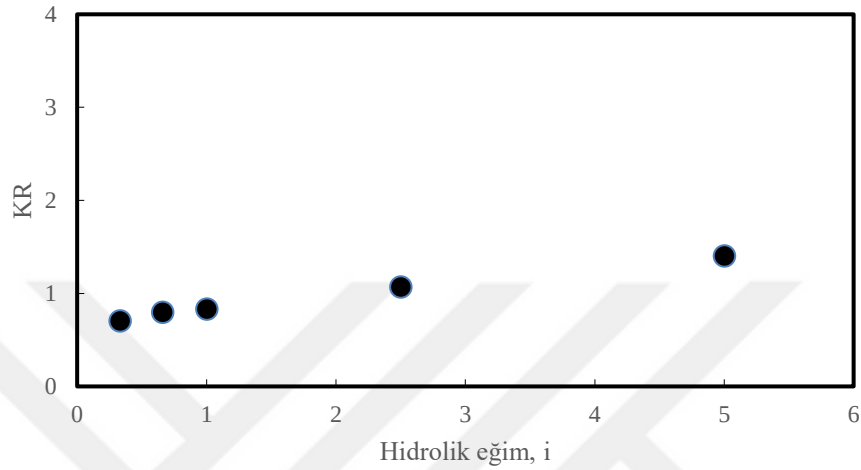
Malzeme	Hidrolik eğim (i)	k_{agrega} (cm/s)	k_{sistem} (cm/s)	KR
RCA	0,33	3,84E-04	5,43E-04	0,71
	0,66	1,71E-04	2,14E-04	0,80
	1	1,26E-04	1,51E-04	0,84
	2,5	7,07E-05	6,60E-05	1,07
	5	6,27E-05	4,47E-05	1,40

$i=0.66$ hidrolik eğimine kadar, sistemin GR değerleri 1 civarındayken, hidrolik eğimin 1 mertebesine çıkartılmasıyla, sistemin GR değerlerinin de 1'in üzerine çıktığı görülmektedir. Sistemde ince dane göçüne bağlı tıkanma durumu görülmeye başlamıştır. İnce dane göçünün henüz başlamadığı düşük hidrolik eğimlerde, hipoteze edilen, geotekstile yaklaştıkça tıkanmanın artması durumu ($GR1 > GR3 > GR2$) gözlemlenmemiştir. Hidrolik eğimin mertebesi arttıkça, geotekstile yakın bölgelerdeki GR değerlerinin arttığı bu sebeple de ince dane göçünün başladığı söylenebilmektedir. Sistemin hidrolik eğimi 2.5 ve daha üst mertebelere yükseltildiğinde, GR parametrelerinin tıkanma sınırı olan 3 değerine oldukça yaklaştığı hatta GR 1 parametresinin değerinin 3 değerini geçtiği görülmüştür. Dengeye ulaşmış sistemlerdeki hidrolik eğime bağlı GR değerlerinin değişimi Şekil 45'te sunulmuştur.



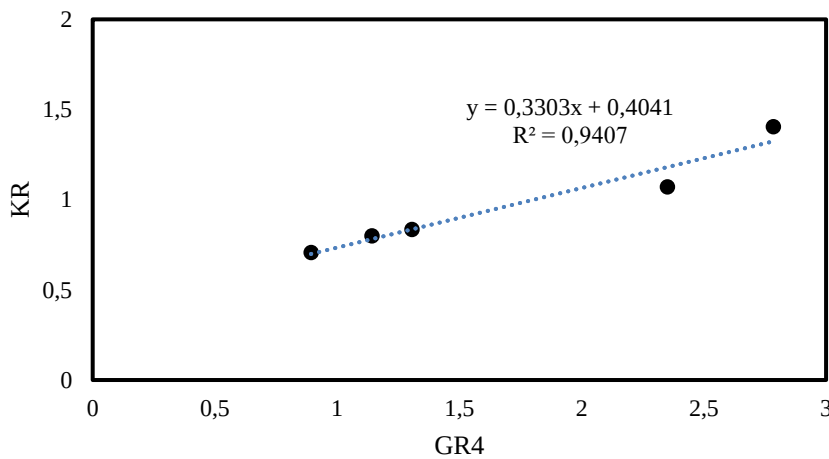
Şekil 45. GT2 - RCA sistemi için hidrolik eğime bağlı GR parametrelerinin değişimi

Hidrolik eğime bağlı GR değerlerindeki artışı ve geotekstile yakın bölgelerdeki GR değerlerinin görece yüksek olmasından kaynaklı, sistemin tıkanmaya başladığı yorumu, KR parametresinin değerinin, hidrolik eğime bağlı olarak artmasıyla da desteklenmektedir. KR parametresinin hidrolik eğime bağlı olarak değişimi Şekil 46’da sunulmuştur.



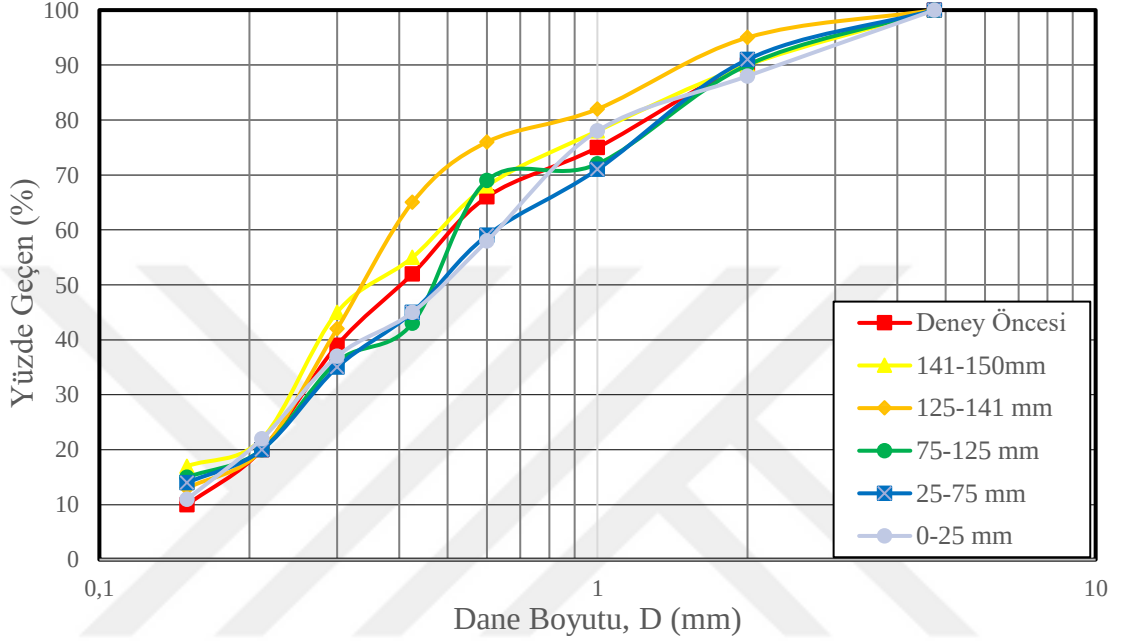
Şekil 46. GT2 - RCA sistemi için hidrolik eğime bağlı KR parametrelerinin değişimi

KR parametresinin GR parametrelerinin ortalaması olan GR4 parametresine bağlı değişimi Şekil 47’de sunulmuştur. Regresyon analizi sonucu, parametrelere uygun olarak çizilen doğrusal regresyon çizgisinin eğimi yaklaşık 0.33 olduğu görülmüştür.



Şekil 47. GT2 - RCA sistemi için KR parametresinin GR4 parametresine bağlı değişimi

Uzun süreli filtrasyon deneyi sonrasında yapılan elek analizde, hipoteze edildiği üzere, ince dane göçü yaşandığı görülmüştür. Alt katmanlardaki ince dane oranının üst katmanlara ve deney öncesi duruma kıyasla daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. 0.84 mm göz açıklıklı geotekstil sisteminin granülometre eğrileri Şekil 48’de sunulmuştur.

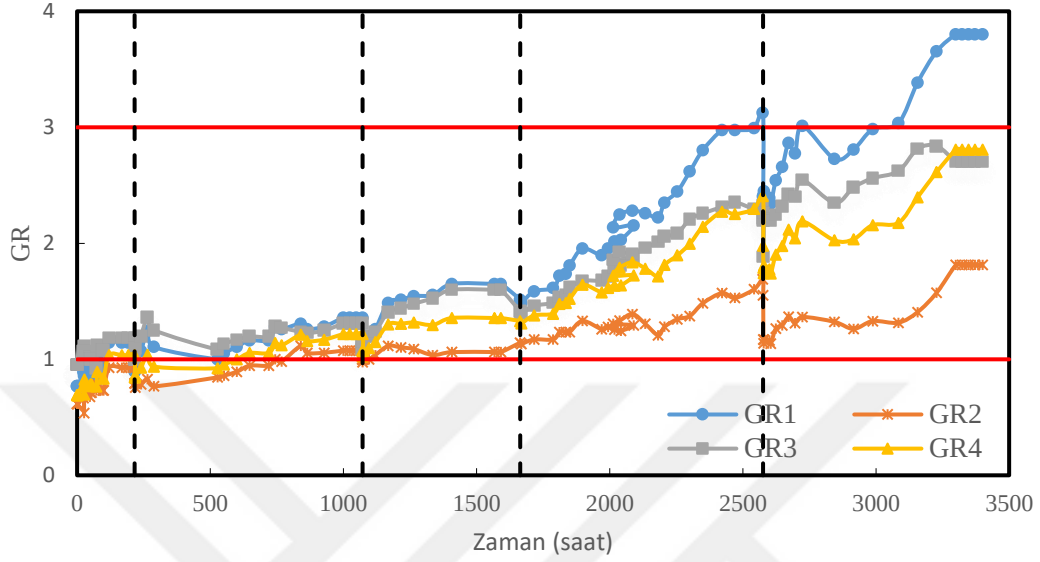


Şekil 48. GT2 - RCA sisteminin granülometre eğrileri

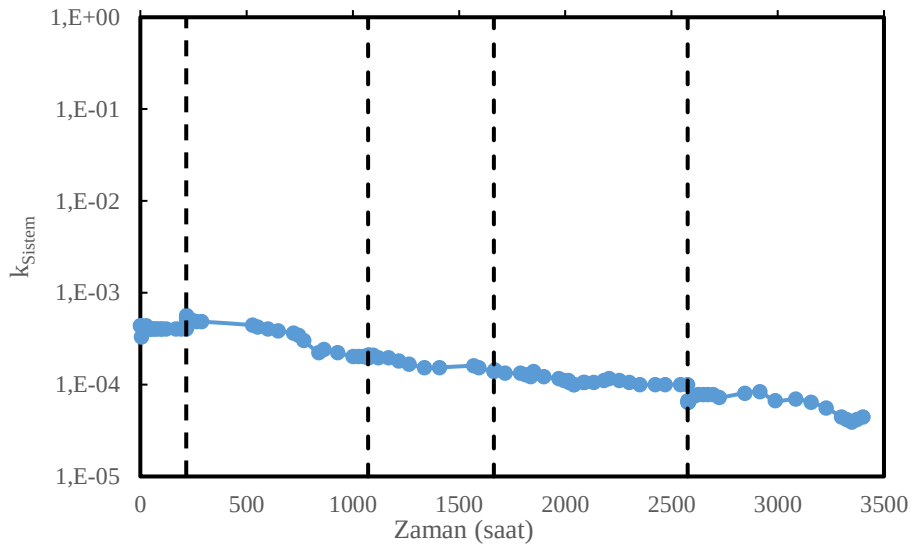
3.3. GT3 - RCA Sistemi Filtrasyon Performansı

0.076 milimetre göz açıklıklı geotekstil – geri dönüştürülmüş beton malzeme (GT3 - RCA) sistemi uzun süreli filtrasyon deneyinden elde edilen veriler ışığında değerlendirilerek, KR ve GR parametreleri hesaplanmıştır. Hidrolik eğim arttıkça, GR değerlerinin de arttığı gözlemlenmiştir. $i=5$ hidrolik eğimine kadar, GR değerlerinin 1 ila 3 arasında olduğu görülmektedir. Sistem kısmi tıkanmalar yaşamakla birlikte, işlevini yerine getirebilmektedir. Sistemin hidrolik eğiminin $i=5$ seviyesine çıkarılmasıyla birlikte, GR değerlerinde belirgin bir artış gözlemlenmiş ve özellikle geotekstil bölgesinin geçirimsizliği açısından kritik öneme sahip olan GR 1 parametresinin, tıkanma sınırı olarak kabul edilen 3 değerini aştığı tespit edilmiştir. KR parametresinin değerleri, GR parametresinin değerleriyle paralellik göstermektedir ve zamana bağlı tıkanma durumunu destekler niteliktedir. GR parametresinin zamana bağlı değişimi Şekil 49’da, sistemin geçirimsizliğinin bir ifadesi olan k_{sistem} ’in zamana bağlı değişimi Şekil 50’de, agreganın geçirimsizliğini

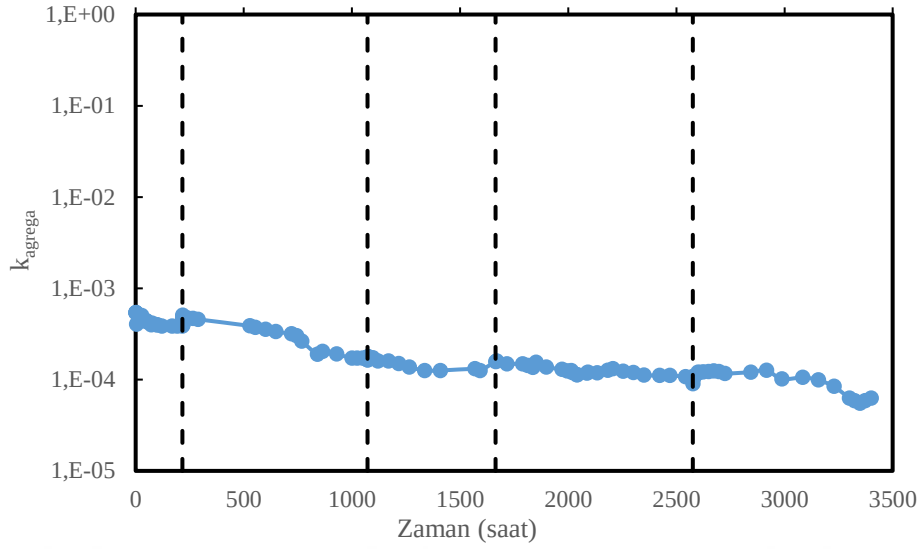
gösteren k_{agrega} 'nın zamana bağlı değişimi Şekil 51'de ve KR parametresinin zamana bağlı değişimi Şekil 52'de sunulmuştur.



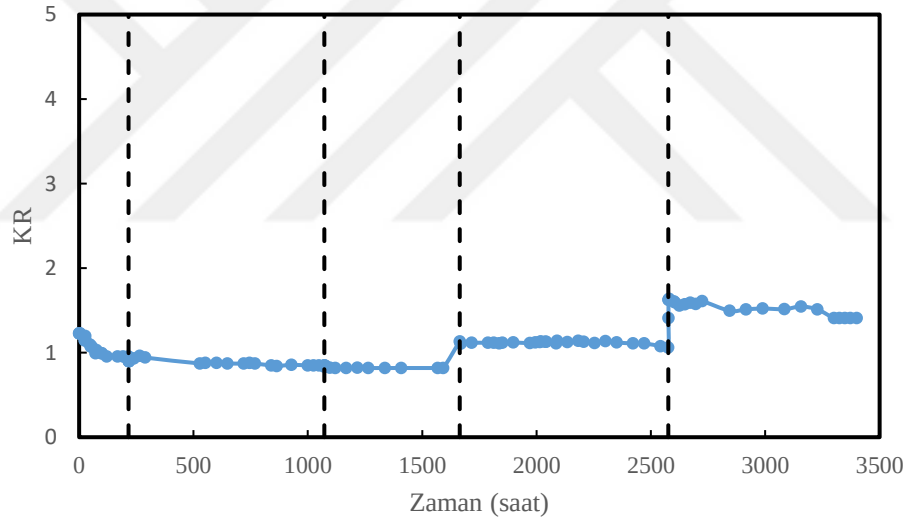
Şekil 49. GR parametresinin GT3 - RCA sistemi için zamana bağlı değişim grafiği



Şekil 50. k_{sistem} parametresinin GT3 - RCA sistemi için zamana bağlı değişim grafiği



Şekil 51. k_{agrega} parametresinin GT3 - RCA sistemi için zamana bağlı değişim grafiği



Şekil 52. KR parametresinin GT3 - RCA sistemi için zamana bağlı değişim grafiği

Uzun süreli filtrasyon deneyinde, minimum 24 saat aralıklarla alınan, son 5 okumadan alınan değerler ışığında hesaplanan GR ve K parametrelerinin değişimi, %5'ten az olması durumunda sistemin söz konusu hidrolik eğim için denge noktasına ulaşmış olduğu söylenebilmektedir. Tüm hidrolik eğimler için, dengeye ulaşmış sistemdeki, GR değerleri Tablo 14'te K değerleri ise Tablo 15'te sunulmuştur. Hidrolik eğimin artmasına bağlı olarak, sistemdeki tıkanmanın arttığı yöndeki hipotezi destekleyici yönde, tüm GR ve KR değerlerinde artış gözlemlenmiştir.

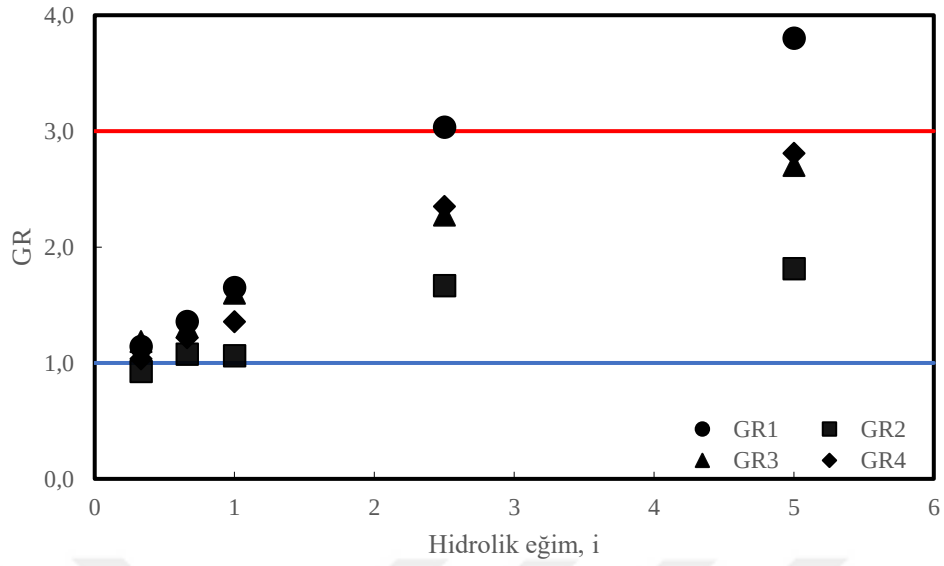
Tablo 14. GR parametrelerinin GT3 - RCA sistemi için hidrolik eğime bağlı değişim tablosu

Malzeme	Hidrolik eğim (i)	GR1	GR2	GR3	GR4=(GR1+GR2)/2
RCA	0,33	1,14	0,93	1,19	1,04
	0,66	1,36	1,08	1,31	1,22
	1	1,65	1,06	1,60	1,36
	2,5	3,03	1,67	2,28	2,35
	5	3,80	1,81	2,70	2,81

Tablo 15. K parametrelerinin GT3 - RCA sistemi için hidrolik eğime bağlı değişim tablosu

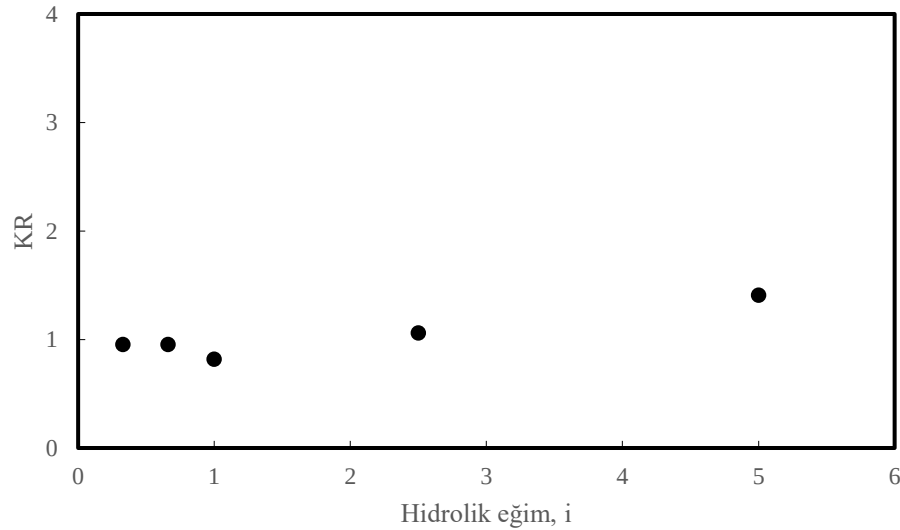
Malzeme	Hidrolik eğim, (i)	k_{agrega} (cm/s)	k_{sistem} (cm/s)	KR
RCA	0,33	3,84E-04	4,02E-04	0,95
	0,66	1,71E-04	2,02E-04	0,95
	1	1,26E-04	1,54E-04	0,82
	2,5	1,06E-04	1,00E-04	1,06
	5	6,27E-05	4,46E-05	1,41

Sistemin GR değerleri, en küçük hidrolik eğim olan $i=0.33$ 'te dahi tıkanma başlangıcı olarak kabul edilen 1 değerinin üzerine çıktığı gözlemlenmiştir. Buna bağlı olarak ince dane göçüne bağlı tıkanma durumunun başladığı görülmektedir. En düşük hidrolik eğimden en yüksek hidrolik eğime kadar, her hidrolik eğimde, dane göçüne bağlı geotekstile yakın bölgelerde oluşan tıkanmanın bir göstergesi olan, $GR1 > GR3 > GR2$ durumu gözlemlenmiştir. Hidrolik eğiminin artışına bağlı GR değerlerinin de arttığı gözlemlenmiştir. Sistemin hidrolik eğimi 2.5 ve daha üst mertebelere yükseltildiğinde, GR parametrelerinin tıkanma sınırı olan 3 değerine oldukça yaklaştığı hatta GR 1 parametresinin değerinin 3 değerini geçtiği görülmüştür. Dengeye ulaşmış sistemlerdeki hidrolik eğime bağlı GR değerlerinin değişimi Şekil 53'te sunulmuştur.



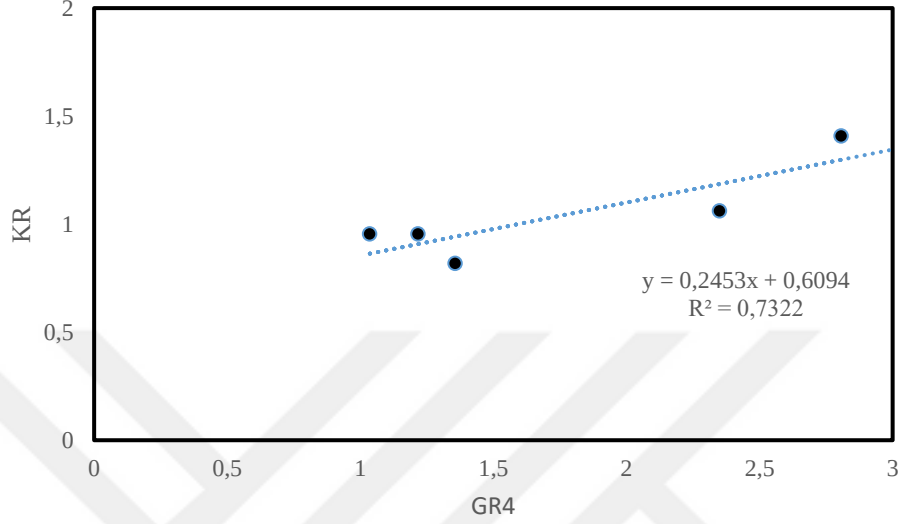
Şekil 53. GT3 - RCA sistemi için hidrolik eğime bağlı GR parametrelerinin değişimi

Hidrolik eğime bağlı GR değerlerindeki artışı ve geotekstile yakın bölgelerdeki GR değerlerinin görece yüksek olmasından kaynaklı, sistemin tıkanmaya başladığı yorumu, KR parametresinin değerinin, hidrolik eğime bağlı olarak artmasıyla da desteklenmektedir. KR parametresinin hidrolik eğime bağlı olarak değişimi Şekil 54’te sunulmuştur.



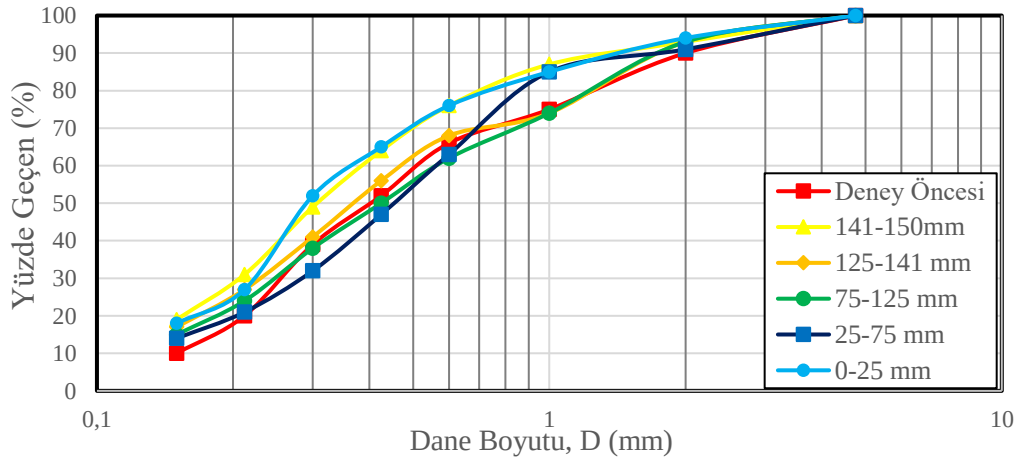
Şekil 54. GT3 - RCA sistemi için hidrolik eğime bağlı KR parametrelerinin değişimi

KR parametresinin GR parametrelerinin ortalaması olan GR4 parametresine bağlı değişimi Şekil 55'te sunulmuştur. Regresyon analizi sonucu, parametrelere uygun olarak çizilen doğrusal regresyon çizgisinin eğimi yaklaşık 0.25 olduğu görülmüştür.



Şekil 55. GT3 - RCA sistemi için GR4 değerine bağlı KR parametrelerinin değişimi

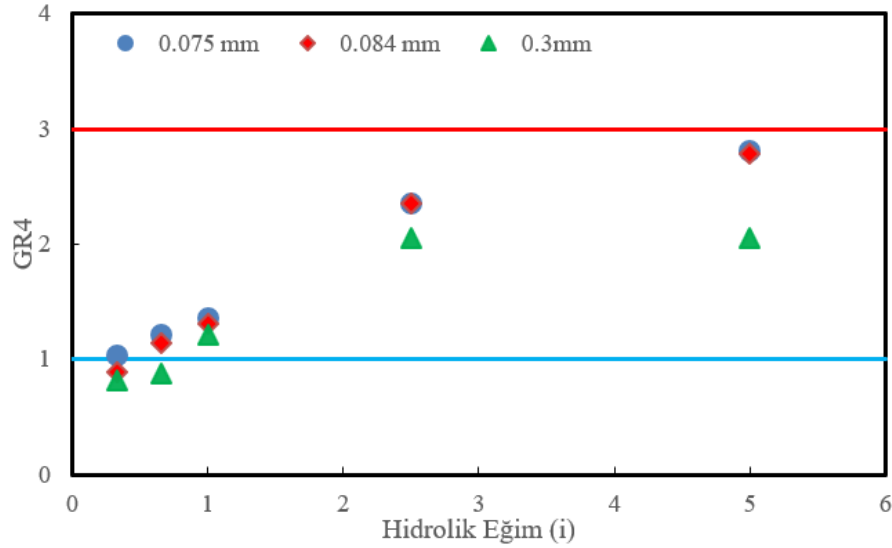
Uzun süreli filtrasyon deneyi sonrasında yapılan elek analizde, hipoteze edildiği üzere, ince dane göçü yaşandığı görülmüştür. Alt katmanlardaki ince dane oranının üst katmanlara ve deney öncesi duruma kıyasla daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. 0.076 mm göz açıklıklı geotekstil sisteminin granülometre eğrileri Şekil 56'da sunulmuştur.



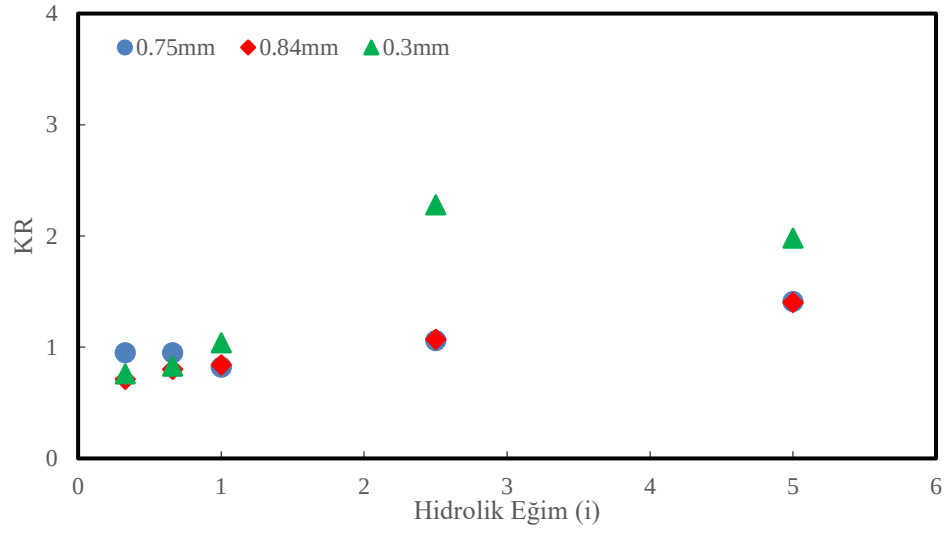
Şekil 56. GT3 - RCA sisteminin granülometre eğrileri

3.4. Geotekstil Göz Açıklığının Filtrasyon Performansı Üzerindeki Etkisi

Örgüsüz geotekstillerin geçirimsizliği, hidrolik özellikleriyle doğrudan bağlantılıdır. Bu hidrolik özelliklerin başlıcaları, hidrolik iletkenlik ve görünür göz açıklığıdır. Görünür göz açıklığı parametresi değeri düştükçe, geotekstilin hem hidrolik iletkenliğinde hem de filtrasyon performansında bir düşüş beklenmektedir. Bu hipoteze bağlı olarak, geotekstilin göz açıklığının değeri düştükçe, GR parametreleri de bu duruma paralel olarak yükselmesi beklenmektedir. Yapılan deneylerden elde edilen veriler ışığında, hesaplanan GR değerleri, sistemde kullanılan geotekstillerin göz açıklığı azaldıkça, artış göstermektedir. En yüksek GR değerleri, en düşük geotekstil göz açıklığına sahip olan numunelerde görülmüştür. Tüm geotekstil göz açıklıklarında GR4 ve KR değerlerinin hidrolik eğime bağlı değişimi sırasıyla Şekil 57’de ve Şekil 58’de sunulmuştur.



Şekil 57. Farklı göz açıklıklarına sahip geotekstil sistemlerinin hidrolik eğime bağlı GR4 parametresindeki değişimi



Şekil 58. Farklı göz açıklıklarına sahip geotekstil sistemlerinin hidrolik eğime bağlı KR parametresindeki değişimi

4. SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında, geri dönüştürülmüş beton malzemenin, farklı göz açıklıklarına sahip geotekstillerle birlikte, drenaj sistemlerindeki filtrasyon performansı deneysel yöntemlerle incelenmiştir. Filtrasyon performansı ve tıkanma davranışının deneysel olarak incelenebilmesi için geri dönüşmüş beton malzeme-örgüsüz geotekstil sistemi ASTM D 5101 (2023) standardına bağlı olarak geliştirilmiş ve yeniden imal ettirilmiş, uzun süreli filtrasyon deneyine tabii tutulmuştur.

Deney sisteminde, numunenin yerleştirildiği kalıbın boyutları, ASTM D 5101 (2023) standardında tanımlanan çap 10 cm, yükseklik 10 cm boyutlarından, çap 15 cm, yükseklik 15 cm boyutlarına çıkartılmıştır.

Standartta belirtilen deney sisteminde, geotekstil tabanından itibaren 25 mm ve 75 mm yüksekliğinde 4 adet olmak üzere toplam 6 adet manometre girişi bulunmaktadır. Geliştirilmiş uzun süreli filtrasyon deney sisteminde ise geotekstil tabanından itibaren, 25 mm, 75 mm ve 125 mm yüksekliğinde 6 adet olmak üzere toplam 8 adet manometre girişi bulunmaktadır.

Yapılan bu geliştirmeler sayesinde, standartta belirtilen deney sistemine kıyasla, gerçeğe daha yakın ve daha hassas sonuçlar elde edilmiştir.

Standartta belirtilen deneyden elde edilen GR ve KR değerlerinin stabilize olması için gerekli süre olan 24 saatin, ince dane içerikli numunelerde yeterli olmadığı görülmüştür. Toplamda 3 deney için 12 ay kadar bir süre deneyler devam ettirilmiştir.

Yapılan deneyler neticesinde, sistemin filtrasyon performansı ve tıkanma durumu, zamana, hidrolik eğime ve kullanılan geotekstilin göz açıklığına bağlı olarak değişmektedir.

Geliştirilerek yeniden tasarlanan ve imalatı yaptırılan uzun süreli filtrasyon deney sisteminde farklı yükseklikte bulunan manometre girişleri sayesinde sistemin birçok bölgesinin tıkanma durumu ve filtrasyon performansı incelenebilmektedir.

Hipotez edildiği gibi, ince dane göçü görülen deney numunelerinde, geotekstile yakın bölgelerde ince dane birikimi gerçekleşmiştir. Bu sebeple hidrolik eğim oranları, $GR1 > GR3 > GR2$ olarak, değer almaktadır.

$GR < 1$ değeri görülen sistemlerde borulanma olduğu söylenebilir. Ancak tez kapsamında yapılan deneylerde, geotekstil seviyesinde borulanmaya rastlanılmamıştır. Deney sonrası kalıp sökümü esnasında, varsa borulanma sonrasında ince dane birikimi

beklenen en alt kalıpta kayda değer miktarda zemin kalıntısına rastlanılmamıştır. Bu durumda tez kapsamında yapılan deneylerde borulanma yaşanmadığını destekler niteliktedir.

$1 > GR > 3$ değeri görülen sistemlerde ince dane göçünün, su akışı ve yerçekimi yönüne bağlı olarak, yukarı katmanlardan aşağı katmanlara doğru gerçekleşmesi beklenmektedir. Tüm geotekstillerde, bazı hidrolik eğimlerde, bu durum gerçekleşmiştir. Uzun süreli filtrasyon deneyi sonrasında numune üzerinde elek analizi deneyleri yapılmıştır. Üstten alta 5 katmanda yapılan bu deneyler neticesinde, üst katmanlardan alt katmanlara gidildikçe ince dane oranının arttığı görülmektedir.

Numunelerde, hidrolik eğim değerleri arttıkça GR değerlerinin arttığı görülmektedir. Hidrolik eğim artışına bağlı sistemde tıkanma seviyesi artışı gözlemlenmektedir. Düşük göz açıklıklı geotekstil kullanılan numunelerde, bu duruma ek olarak, GR değeri, tıkanma kritik durumu olarak değerlendirilen 3 değerini geride bıraktığı gözlemlenmiştir.

5. ÖNERİLER

Yüksek lisans tezi olarak sunulan bu çalışmada, geri dönüştürülmüş beton malzemenin farklı hidrolik eğimler ve geotekstil göz açıklıkları altında uzun süreli filtrasyon davranışı incelenmiştir. Bu çalışmayı temel alarak araştırma yapmak isteyen bilim insanları ve geri dönüştürülmüş beton malzemeyi kullanacak uygulamacılara yönelik öneriler aşağıda sıralanmıştır:

- RCA malzemesi drenaj sistemlerinde kullanıldığında, ince dane göçüne bağlı olarak tıkanmalar meydana gelebilse de sistem tam tıkanma durumuna yalnızca çok yüksek hidrolik eğimlerde veya düşük göz açıklıklı geotekstillerle kullanım durumunda geçmektedir. Bu nedenle, doğal malzemelerin yerine, çevre ve doğal kaynakların korunması, enerji tasarrufu sağlanması ve atık depolama ile doğal kaynakların tükenmesi gibi problemlerin çözümüne katkıda bulunmak amacıyla drenaj sistemlerinde RCA'nın kullanımı tercih edilebilir.
- Endüstriyel ve inşaat sektörlerinden kaynaklanan yan ürünler veya atık malzemeler, drenaj sistemlerinde doğal malzemelere alternatif olarak kullanılabilirliklerinin araştırılması amacıyla filtrasyon deneyine tabi tutulabilir.
- Literatürdeki çalışmalar, yüksek hidrolik eğimlerde doğal agregalar kullanılarak üretilen drenaj sistemlerinin tıkanma sorunu yaşamaksızın etkin bir şekilde kullanılabildiğini göstermektedir. Yüksek hidrolik eğimlerde RCA malzemesinin, tıkanma sınırına oldukça yakın veya tıkanma sınırının üzerinde olduğu tespit edilmiştir. RCA-geotekstil sisteminin tıkanma durumu, doğal agregaya içerisine farklı oranlarda ikame edilerek iyileştirilebilir.

6. KAYNAKLAR

- Abbaspour, A., & Tanyu, B. F. (2019). Tufa precipitation from Recycled Concrete Aggregate (RCA) over geotextile: Mechanism, composition, and affecting parameters. *Construction and Building Materials*, 196, 317-329.
- Aboginije, A., Aigbavboa, C., Thwala, W., & Samuel, S. (2020). Determining the impact of construction and demolition waste reduction practices on green building projects in Gauteng province, South Africa. *Proceedings of international engineering & operations management, Dubai, UAE*, 10-12.
- Agalit, H., Zari, N., & Maaroufi, M. (2017). Thermophysical and chemical characterization of induction furnace slags for high temperature thermal energy storage in solar tower plants. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 172, 168-176.
- Alam, M. H., Mondal, T., Dev, T., Banerji, A. K., & Das, C. (2024). Use of Construction and Demolition Waste Material for Soil Stabilization. *Research Transcripts in Materials*, 2, 01-14.
- American Society for Testing and Materials, (2018), "Standard Test Method for Measuring Mass per Unit Area of Geotextiles", USA, ASTM Standard D 5261.
- American Society for Testing and Materials, (2019), "Standard Test Method for Measuring the Nominal Thickness of Geosynthetics", USA, ASTM Standard D 5199.
- American Society for Testing and Materials, (2021), "Standard Test Methods for Determining Apparent Opening Size of a Geotextile", USA, ASTM Standard D 4751.
- American Society for Testing and Materials, (2022), "Standard Test Method for Static Puncture Strength of Geotextiles and Geotextile-Related Products Using a 50-mm Probe", USA, ASTM Standard D 6241.
- American Society for Testing and Materials, (2022), "Standard Test Methods for Water Permeability of Geotextiles by Permittivity", USA, ASTM Standard D 4491.
- American Society for Testing and Materials, (2023), "Standard Test Method for Grab Breaking Load and Elongation of Geotextiles", USA, ASTM Standard D 4632
- American Society for Testing and Materials, (2023), "Standard Test Method for Measuring the Filtration Compatibility of Soil-Geotextile Systems", USA, ASTM Standard D5101.
- Andeobu, L.; Wibowo, S.; Grandhi, S. Artificial intelligence applications for sustainable solid waste management practices in Australia: a systematic review, *Sci. Total Environ.*, 834 (2022) 155389

- Arulrajah, A., Jegatheesan, P. & 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.
- Association, W. (2016). Fact sheet: Steel industry by-products
- 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., 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.
- Bayin Sariahmetoglu, A., Hatipoglu, M., & Dayioglu, A. Y. (2024). Comparative evaluation of the long-term filtration performance of recycled materials in highway drainage systems. *Geotechnical Testing Journal*, 47(1), 45-64.
- 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, O. J., Hatipoglu, M., Cetin, B. & Aydilek, A. H. (2016). Mechanical and Environmental Suitability of Recycled Concrete Aggregate as a Highway Base Material, *J. Mater. Civ. Eng.*, 28(9), 1-13
- 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*, 10(2), 112-124.
- Biswas, N., Puppala, Anand, J., Khan, A., Chandra, S. S., Banerjee, A. & Chakraborty, S. (2021). Evaluating the Performance of Wicking Geotextile in Providing Drainage for Flexible Pavements Built over Expansive Soils, *Journal Of The Transportation Research Board*, 2675(9), 208-221
- Braga, A. M., Silvestre, J. D. & Brito, J. D. (2017). Compared environmental and economic impact from cradle to gate of concrete with natural and recycled coarse aggregates, *Journal of Cleaner Production*, 162, 529-543
- Cardoso, R., Silva, R. V., Brito, J. D. & Dhir, R. (2015). Use of recycled aggregates from construction and demolition waste in geotechnical applications: A literature review, *Waste Management*, 49, 131-145
- Chakraborty, A., Sengupta, A., Bhadu, M. K., Pandey, A., & Mondal, A. (2014). Efficient removal of arsenic (V) from water using steel-making slag. *Water Environment Research*, 86(6), 524-531.

- Chang, Y.; Li, X.; Masanet, E.; Zhang, L.; Huang, Z.; Ries, R. Unlocking the green opportunity for prefabricated buildings and construction in China, *Resour. Conserv. Recycl.*, 139 (2018) 259–261.
- Choi, J. H. (2019). Strategy for reducing carbon dioxide emissions from maintenance and rehabilitation of highway pavement. *Journal of cleaner production*, 209, 88-100.
- Costa, J. O., Borges, P. H., dos Santos, F. A., Bezerra, A. C. S., & Blom, J. (2020). Cementitious binders and reclaimed asphalt aggregates for sustainable pavement base layers: Potential, challenges and research needs. *Construction and Building Materials*, 265, 120325.
- ÇALIM, M. H., SARIAHMETOĞLU, A. B., DAYIOĞLU, A. Y., HATİOPĞLU, M., & İKİZLER, S. B. GERİ DÖNÜŞTÜRÜLMÜŞ BETON MALZEME-GEOTEKSTİL SİSTEMİNİN GEÇİRİMLİLİK PERFORMANSININ İNCELENMESİ.
- Dayioglu, A. Y. (2024). pH-Dependent Leaching Characteristics of Steel Slag Mitigated with Water Treatment Residual. *Geotechnical Testing Journal*, 47(1).
- de Magalhães, R. F., Danilevich, Â. D. M. F., & Saurin, T. A. (2017). Reducing construction waste: A study of urban infrastructure projects. *Waste management*, 67, 265-277.
- DEFRA. UK Statistics on Waste (2023)
- Dolez, I. P. & Blond, E. (2017). Evaluation of Geotextile Performance for the Filtration of Fine-Grained Tailings, *Geotechnical Frontiers*, 269 – 277
- Dolez, P. I., & Blond, E. (2017). Evaluation of geotextile performance for the filtration of fine-grained tailings. In *Geotechnical Frontiers 2017* (pp. 269-277).
- Emin Kutay, M., & Aydılek, A. H. (2005). Filtration performance of two-layer geotextile systems. *Geotechnical Testing Journal*, 28(1), 79-91.
- EPA. (2010). Federal Environmental Requirements for Construction.
- Faraone, N., Tonello, G., Furlani, E., & Maschio, S. (2009). Steelmaking slag as aggregate for mortars: effects of particle dimension on compression strength. *Chemosphere*, 77(8), 1152-1156.
- Fatemi, S., & Imaninasab, R. (2016). Performance evaluation of recycled asphalt mixtures by construction and demolition waste materials. *Construction and building materials*, 120, 450-456.
- Faure, Y. H., Baudoin, A., Pierson, P. & Plé, O. (2004). Use of recycled aggregates from construction and demolition waste in geotechnical applications: A literature review, *Geotextile and Geomembranes*, 11-20
- 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.

- Ferreira, F. B., Pereira, P., Vieira, C. S. & Lopes, M. L. (2022). Long-Term Tensile Behavior of a High-Strength Geotextile after Exposure to Recycled Construction and Demolition Materials, *J. Mater. Civ. Eng.*, 34(5), 1-13
- Ferronato, N.; Torretta, V.; Ragazzi, M.; Rada, E.C. Waste Mismanagement in Developing Countries: A Case Study of Environmental Contamination, *UPB Sci. Bull. Ser. D*, 79 (2017) 185–196.
- Fletcher, T. D., Shuster, W., Hunt, W. F., Ashley, R., Butler, D., Arthur, S., ... & Viklander, M. (2015). SUDS, LID, BMPs, WSUD and more—The evolution and application of terminology surrounding urban drainage. *Urban water journal*, 12(7), 525-542.
- Gonzalez, R., & Chini, A. (2020, April). Using the circular economy to manage construction waste. In *Associated Schools of Construction Proceedings of the 56th Annual International Conference*.
- Grady, B. P. (2021). Waste plastics in asphalt concrete: A review. *SPE Polymers*, 2(1), 4-18.
- Gruber, M. R., & Hofko, B. (2023). Life cycle assessment of greenhouse gas emissions from recycled asphalt pavement production. *Sustainability*, 15(5), 4629.
- Guo, X., & Pan, X. (2018). Mechanical properties and mechanisms of fiber reinforced fly ash–steel slag based geopolymer mortar. *Construction and Building Materials*, 179, 633-641.
- Haider, I., Cetin, B., Kaya, Z., Hatipoglu, M., Cetin, A. & Aydilek, A. H. (2014). Evaluation of the Mechanical Performance of Recycled Concrete Aggregates Used in Highway Base Layers, *Geo-Congress 2014 Technical Papers*, 3686-3694
- Hajdukiewicz, A., & Pera, B. (2020). Education for sustainable development—the case of massive open online courses. *Sustainability*, 12(20), 8542.
- Han, F., Yun, S., Zhang, C., Xu, H., & Wang, Z. (2019). Steel slag as accelerant in anaerobic digestion for nonhazardous treatment and digestate fertilizer utilization. *Bioresource technology*, 282, 331-338.
- Han, J. & Thakur, K. J. (2014). Sustainable roadway construction using recycled aggregates with geosynthetics, *Sustainable Cities and Society*, 14, 342-350
- Hao, J.; Yuan, H.; Liu, J.; Chin, C.S.; Lu, W. A model for assessing the economic performance of construction waste reduction, *J. Clean. Prod.*, 232 (2019) 427–440.
- Hatipoglu, M., Mijic, Z., Dayioglu, A. Y., Aydilek, A. H., & Cetin, B. (2016). Hydraulic Behavior of Maryland RAP Materials Used in Highway Shoulders. In *Geo-Chicago 2016* (pp. 969-977).
- Hossain, M. U., Poon, C. S., Lo, I. M., & Cheng, J. C. (2016). Comparative environmental evaluation of aggregate production from recycled waste materials and virgin sources by LCA. *Resources, Conservation and Recycling*, 109, 67-77.

- Huang, Y. H., & Liu, C. J. (2008). Analysis on comprehensive utilization of electric furnace slag. *Ind Heat (in Chinese)*, 37(5), 4-6.
- 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, 31-36, Singapore
- Huo, Binbin, et al. "Hydration and soundness properties of phosphoric acid modified steel slag powder." *Construction and Building Materials* 254 (2020): 119319.
- Ignjatović, I. S., Marinković, S. B., & Tošić, N. (2017). Shear behaviour of recycled aggregate concrete beams with and without shear reinforcement. *Engineering Structures*, 141, 386-401.
- Ilıcalı, M. (1988). *Karayolu üstyapısında Erdemir cürufunun kullanılabilirliğinin araştırılması* (Doctoral dissertation, Yıldız Teknik Üniversitesi).
- International Energy Agency and the United Nations Environment Programme – IEA/UNEP (2018): 2018 Global Status Report: towards a zero-emission, efficient and resilient buildings and construction sector, Global Alliance for Buildings and Construction, December
- ISWA. 2015 ISWA Annual Report. Available online: <https://www.iswa.org/annual-reports> (accessed on 28 July 2023).
- Ittyeipe, A. V., Thomas, A. V., & Ramaswamy, K. P. (2020, November). Comparison of the energy consumption in the production of natural and recycled concrete aggregate: A case study in Kerala, India. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 989, No. 1, p. 012011). IOP Publishing.
- Jaramillo, H. Y., Gómez Camperos, J. A., & Afanador García, N. (2024). Development of a Non-Structural Prefabricated Panel Based on Construction and Demolition Waste for Sustainable Construction. *Infrastructures*, 9(8), 135.
- Kaarthik, M., & Maruthachalam, D. (2021). A sustainable approach of characteristic strength of concrete using recycled fine aggregate. *Materials Today: Proceedings*, 45, 6377-6380.
- Kabirifar, K., Mojtahedi, M., Wang, C., & Tam, V. W. (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, 121265.
- Karadağ, H., Fırat, S., & Işık, N. S. (2020). Çelikhane cürufunun yol temel ve alttemel malzemesi olarak kullanılması. *Politeknik Dergisi*, 23(3), 799-812.
- Kermani, B., 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.

- Khalaf, M. A., Ban, C. C., Ramli, M., Ahmed, N. M., Sern, L. J., & Khaleel, H. A. (2020). Physicomechanical and gamma-ray shielding properties of high-strength heavyweight concrete containing steel furnace slag aggregate. *Journal of Building Engineering*, 30, 101306.
- Khan, Z. A., Balunaini, U., & Costa, S. (2024). Environmental feasibility and implications in using recycled construction and demolition waste aggregates in road construction based on leaching and life cycle assessment—A state-of-the-art review. *Cleaner Materials*, 100239.
- Koerner, R. M. (2012). *Designing with geosynthetics-Vol. 1* (Vol. 1). Xlibris Corporation.
- Lee, J. Y., Choi, J. S., Yuan, T. F., Yoon, Y. S., & Mitchell, D. (2019). Comparing properties of concrete containing electric arc furnace slag and granulated blast furnace slag. *Materials*, 12(9), 1371.
- Li, J., Wu, B., Zhou, T., & Chai, X. (2018). Preferential removal of phosphorus using modified steel slag and cement combination for its implications in engineering applications. *Environmental Technology & Innovation*, 10, 264-274.
- Liang, Z., Hu, Z., Zhou, Y., Wu, Y., Zhou, X., Hu, B., & Guo, M. (2022). Improving recycled aggregate concrete by compression casting and nano-silica. *Nanotechnology Reviews*, 11(1), 1273-1290.
- Liu, B., Feng, C., & Deng, Z. (2019). Shear behavior of three types of recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 217, 557-572.
- Liu, J., & Guo, R. (2018). Applications of Steel Slag Powder and Steel Slag Aggregate in Ultra-High Performance Concrete. *Advances in Civil Engineering*, 2018(1), 1426037.
- Liu, M., Liu, X., Wang, W., & Guo, J. (2022). Phosphorus removal from wastewater using electric arc furnace slag aggregate. *Environmental Technology*, 43(1), 34-41.
- Luo, L., Jia, M., & Cheng, X. (2024). Experimental study and analytical modeling of tensile performance of ultra-high-performance concrete incorporating modified recycled aggregates. *Journal of Cleaner Production*, 468, 143123.
- Manso, J. M., Gonzalez, J. J., & Polanco, J. A. (2004). Electric arc furnace slag in concrete. *Journal of materials in civil engineering*, 16(6), 639-645.
- Manzoor, T. & Singh, S. (2022). Impact Of Geotextile On Thickness Of Road Layers, *International Journal of Engineering Technology and Management Sciences*, 5(6), 183-187
- 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), 04017015.
- Mehrjardi, G. T., 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, 100349.

- Miskowaska, A., Lenart, S. & Koda, E. (2017). Changes of Permeability of Nonwoven Geotextiles due to Clogging and Cyclic Water Flow in Laboratory Conditions, *Water*, 260(9), 1-15
- Morata, M. & Saborido, C. (2016). Recycled Aggregates with Enhanced Performance for Railways Track Bed and Form Layers, *J. Sustain. Metall.*, 3, 322-335
- Motz, H., & Geiseler, J. (2001). Products of steel slags an opportunity to save natural resources. *Waste management*, 21(3), 285-293.
- Müller, W. W., & Saathoff, F. (2015). Geosynthetics in geoenvironmental engineering. *Science and Technology of Advanced Materials*, 16(3).
- Nadeem, M., & Pofale, A. D. (2012). Experimental investigation of using slag as an alternative to normal aggregates (coarse and fine) in concrete. *International Journal of Civil & Structural Engineering*, 3(1), 117-127.
- Nasiri, A., Eslami, A., & Fahimifar, A. (2024). Assessment of Construction and Demolition Waste Depot Materials for Filling. *Transportation Infrastructure Geotechnology*, 11(1), 236-262.
- Ok, B., Sarici, T., Talaslioglu, T. & Yildiz, A. (2020) Geotechnical properties of recycled construction and demolition materials for filling applications, *Transportation Geotechnics*, 24, 1-9
- Osmani, M. Construction Waste. In *Waste*, Academic Press: Cambridge, MA, USA, 2011; pp. 207–218.
- Ouda, O. K. M., Peterson, H. P., Rehan, M., Sadeh, Y., Alghazo, J. M., & Nizami, A. S. (2018). A case study of sustainable construction waste management in Saudi Arabia. *Waste and biomass valorization*, 9, 2541-2555.
- Palankar, N., Shankar, A. R., & Mithun, B. M. (2016). Durability studies on eco-friendly concrete mixes incorporating steel slag as coarse aggregates. *Journal of cleaner production*, 129, 437-448.
- Plati, C., & Tsakoumaki, M. (2023). Life cycle assessment (LCA) of alternative pavement rehabilitation solutions: a case study. *Sustainability*, 15(3), 2129.
- Prateek, G., Zheng, K., Gong, C., Wei, S., Zhou, X., & Yuan, Q. (2023). Preparing high strength cementitious materials with high proportion of steel slag through reverse filling approach. *Construction and Building Materials*, 368, 130474.
- Purchase, C. K., Al Zulayq, D. M., O'Brien, B. T., Kowalewski, M. J., Berenjian, A., Tarighaleslami, A. H., & Seifan, M. (2021). Circular economy of construction and demolition waste: A literature review on lessons, challenges, and benefits. *Materials*, 15(1), 76.
- Reuter, M., Xiao, Y., & Boin, U. (2004, January). Recycling and environmental issues of metallurgical slags and salt fluxes. In *VII International conference on molten slags*

fluxes and salts, The South African Institute of Mining and Metallurgy (Vol. 2004, pp. 349-356).

- Sajan, K. C., Adhikari, R., Mandal, B., & Gautam, D. (2022). Mechanical characterization of recycled concrete under various aggregate replacement scenarios. *Cleaner Engineering and Technology*, 7, 100428.
- Sañudo-Fontaneda, L. A., Rodriguez-Hernandez, J., Calzada-Pérez, M. A., & Castro-Fresno, D. (2014). Infiltration Behaviour of Polymer-Modified Porous Concrete and Porous Asphalt Surfaces used in SUDS Techniques. *CLEAN-Soil, Air, Water*, 42(2), 139-145.
- Sarıahmetoğlu, A. B., İyisan, R., Dayıoğlu, A. Y., & Hatipoğlu, M. (2021). Geri kazanılmış asfalt malzemenin uzun süreli filtrasyon performansı. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 27(6), 683-695.
- Sarıahmetoğlu, A. B., İyisan, R., Dayıoğlu, A. Y., & Hatipoğlu, M. (2021). Geri kazanılmış asfalt malzemenin uzun süreli filtrasyon performansı. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 27(6), 683-695.
- Stumpe, B., Engel, T., Steinweg, B., & Marschner, B. (2012). Application of PCA and SIMCA statistical analysis of FT-IR spectra for the classification and identification of different slag types with environmental origin. *Environmental science & technology*, 46(7), 3964-3972.
- T.C. Çevre Ve Şehircilik Bakanlığı. (2020). Sıfır Atık Yönetim Sistemi Uygulama Kılavuzu. 1-24.
- Vidal, R., Moliner, E., Martínez, G., & Rubio, M. C. (2013). Life cycle assessment of hot mix asphalt and zeolite-based warm mix asphalt with reclaimed asphalt pavement. *Resources, Conservation and Recycling*, 74, 101-114.
- Wang, B., Yan, L., Fu, Q., & Kasal, B. (2021). A comprehensive review on recycled aggregate and recycled aggregate concrete. *Resources, Conservation and Recycling*, 171, 105565.
- Wang, S.; Wang, J.; Yang, S.; Li, J.; Zhou, K. From intention to behavior: Comprehending residents' waste sorting intention and behavior formation process, *Waste Manage.*, 113 (2020) 41-50.
- Wang, Y., Chen, J., & Geng, Y. (2015). Testing and analysis of axially loaded normal-strength recycled aggregate concrete filled steel tubular stub columns. *Engineering Structures*, 86, 192-212.
- World Bank. What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050, 2018.
- Wu, J. T. (2006). *Design and construction guidelines for geosynthetic-reinforced soil bridge abutments with a flexible facing* (Vol. 556). Transportation Research Board.

- Zhang, J., Zhang, W., Zhang, L., & Gu, S. (2015). Mechanism of vanadium slag roasting with calcium oxide. *International Journal of Mineral Processing*, 138, 20-29.
- Zhang, Q.; Zhang, X.; Mu, X.; Wang, Z.; Tian, R.; Wang, X.; Liu, X. Recyclable waste image recognition based on deep learning, *Resour. Conserv. Recycl.*, 171 (2021) 105636.
- Zhou, C., & Chen, Z. (2017). Mechanical properties of recycled concrete made with different types of coarse aggregate. *Construction and Building Materials*, 134, 497-506.



ÖZGEÇMİŞ

İlköğrenimini Bedii Sabuncu İlköğretim Okulu'nda bitirdikten sonra, lise eğitiminin ilk yarısını alacağı İstiklal Makzume Anadolu Lisesi'ni kazandı. Lise eğitiminin ikinci yarısını ise Piri Reis Anadolu Lisesi'nde tamamladı. Üniversite eğitime 2018-2019 öğretim yılında İstanbul Üniversitesi Cerrahpaşa İnşaat Mühendisliği Bölümü'nde başladı. 2019-2020 döneminde, kurumlar arası yatay geçişle, Yıldız Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümüne yatay geçiş yaptı. 2022 senesinin haziran ayında, lisans eğitimini tamamladı. 2022-2023 döneminde, Çukurova Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nde yüksek lisans eğitime başladı. 2023 yılının nisan ayından bu yana Karadeniz Teknik Üniversitesi'nde Araştırma görevlisi olarak kariyer hayatına devam etmektedir. İyi derece İngilizce ve orta seviye Japonca bilmektedir.