

# Gerı kazanılmış asfalt malzemenin uzun süreli filtrasyon performansı Long term filtration performance of recycled asphalt pavement material

Ayşegül BAYIN SARIAHMETOĞLU<sup>1\*</sup>, Recep İYISAN<sup>2</sup>, Aşlı YALÇIN DAYIOĞLU<sup>3</sup>, Mustafa HATIPOĞLU<sup>4</sup>

<sup>1-4</sup>İnşaat Mühendisliği Bölümü, İnşaat Fakültesi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye.  
bayinaysegul@gmail.com, iyisan@itu.edu.tr, yalcinas@itu.edu.tr, hatipoglu1@itu.edu.tr

Geliş Tarihi/Received: 09.10.2020  
Kabul Tarihi/Accepted: 11.01.2021

Düzeltilme Tarihi/Revision: 22.12.2020

doi:10.5505/pajes.2021.05760  
Araştırma Makalesi/Research Article

## Öz

Bu makalede, inşaat/yıkım (C&D) atığı türlerinden biri olan asfalt atık malzemesinin (RAP) yol altı drenaj sistemlerinde filtre malzemesi olarak kullanılabilirliğinin tespiti için uzun süreli filtrasyon performansı incelenmiştir. Gerı kazanılmış asfalt ve geotekstilden oluşan drenaj sisteminin zamana bağlı permeabilite davranışının belirlenmesi için yeniden tasarlanarak, geliştirilen ve imalatı yaptırılan ASTM D 5101 deney düzeneğinde uzun süreli filtrasyon deneyleri (LFT) yapılmıştır. Geliştirilmif ASTM D 5101 deneyi ile gerı kazanılmış asfalt-geotekstil sisteminde oluşabilecek potansiyel tıkanma mekanizmaları, zaman ve akış yönüne bağlı olarak malzeme dane çapı dağılımındaki değişimler belirlenmiştir. Bu çalışmada, uzun süreli filtrasyon deneyleri ile özellikle yol altı drenaj sistemlerinin teşkilinde kullanılacak olan doğal filtre malzemeleri yerine gerı kazanılmış asfalt malzemenin kullanılabilirliğini göstermek amaçlanmaktadır. Gerı kazanılmış asfalt malzemenin tekrardan kullanımı ile depolama sorununun ortadan kalkmasına, çevre kirliliğinin önlenmesine ve geoteknik mühendisliği açısından sürdürülebilir malzeme yönetimine (SMM) katkıda bulunulmuş olunacaktır. Makalede agrega ve geotekstilden oluşan drenaj sisteminin uzun süreli filtrasyon davranışı, geliştirilmif ASTM D 5101 deney sisteminde incelenmiştir. Değişik hidrolik eğimler altında gerçekleştirilen uzun süreli filtrasyon deneylerinde agrega-geotekstil sisteminin tıkanma performansını tanımlayacak olan hidrolik eğim oranı (GR) ve geçirimlilik oranı (KR) değerleri belirlenmiştir. Çalışmada agrega olarak gerı kazanılmış asfalt ve bu malzemenin filtrasyon performansının karşılaştırılması amacı ile doğal agrega (NA) kullanılmıştır. Geotekstil olarak tıkanma açısından en olumsuz durumu sağlayacak gözenek açıklığına sahip olan bir örgüsüz geotekstil tercih edilmiştir. Geliştirilmif ASTM D 5101 deney sistemi kullanılarak yapılan deneyler sonucunda, gerı kazanılmış asfalt malzemenin performansının doğal agrega sonuçları ile yeterli seviyede karşılaştırılabilir olduğu anlaşılmıştır. Buna ek olarak, içeriğindeki bitüm malzeme oranı kontrol edildiği takdirde filtrasyon özellikleri bakımından yol altı drenaj sistemlerinde agrega olarak kullanılabilirliği düşünölmektedir. Böylece RAP'nın yeniden kullanımını ile sürdürülebilir malzeme yönetimine ve çevrenin korunmasına katkıda bulunulmuş olunacaktır.

**Anahtar kelimeler:** Gerı kazanılmış asfalt malzeme, Örgüsüz geotekstil, Filtrasyon, Geliştirilmif ASTM D 5101 filtrasyon deneyi, Sürdürülebilirlik.

## Abstract

In this article, the long-term filtration performance of recycled asphalt pavement material (RAP), one of the types of construction/demolition (C&D) waste, is investigated when used as a filter material in highway drainage systems. Long-term filtration tests (LFT) were carried out in the ASTM D 5101 experimental setup, which was redesigned and manufactured in order to determine the permeability behavior of the drainage system consisting of recycled asphalt and geotextile. With the usage of modified ASTM D 5101 test setup, potential clogging mechanisms that may occur, and the change in grain size distribution of the material with respect to time and flow direction were determined. The long-term filtration test program aims to prove that recycled asphalt material could be used instead of natural filter materials particularly in the construction of highway drainage systems. The recovery of this material by reusing it will, eliminate the storage problem, prevent environmental pollution and make a contribution in terms of sustainable material management (SMM) in geotechnical engineering applications. In the study, the long-term filtration behavior of the drainage system consisting of aggregate and geotextile was investigated in the modified ASTM D 5101 test system. The gradient ratio (GR) and the permeability ratio (KR) were determined in the long-term filtration experiments performed under different hydraulic gradients, which define the clogging performance of the aggregate/geotextile system. Recycled asphalt aggregate and natural aggregate (NA) were used to evaluate the filtration performance of aggregates. A non-woven geotextile material with a pore opening to represent the worst conditions in terms of clogging was selected considering its hydraulic and physical properties. The results of the long term filtration tests indicate that the performance of the recycled asphalt material is comparable to the natural aggregate. Additionally with controlled bitumen content, it can be used as an aggregate material in highway drainage systems in terms of filtration properties, thus contributing to sustainable material management. Therefore, with the re-use of RAP as a filter material in highway drainage systems a contribution to the protection of environment could be achieved.

**Keywords:** Recycled asphalt pavement material, Non-Woven geotextile, Filtration, Modified ASTM D 5101 filtration test, Sustainability.

## 1 Giriş

Artan nüfus, insan oğunun değişen ve büyüyen ihtiyaçları doğal kaynakların hızla tükenmesine neden olmaktadır. Küresel çapta gerçekleşen hızlı tüketime ve teknolojik gelişmelere bağlı olarak inşaat/yıkım C&D atıklarının miktarı da yıllık olarak milyon tonlarla ifade edilen miktara ulaşmaktadır [1], [2]. İnşaat/yıkım atıkları pek çok gerı kazanılabilir materyal içermektedir. Dünyada ve ölkemizde çok önemli yeri olan

inşaat/yıkım atıklarının değerlendirilmesi, hammadde olarak yeniden kullanılması ve tekrar ekonomiye kazandırılması günümüzde ihtiyaç değil zorunluluk haline gelmiştir. Bu bağlamda "sürdürülebilirlik" ilkesinin uygulamaya aktarılabilmesi büyük önem taşımaktadır [1],[3]-[6].

Çevre bilincinin artması ve sürdürülebilir uygulamalara dikkat edilmesi, siyasi düzenlemeler ve finansal faydalar, C&D atık malzemelerinin, inşaat mühendisliği uygulamalarında

\*Yazılan yazar/Corresponding author

kullanılmasına yönelik bilimsel araştırmalara konu olmasına neden olmuştur [7]-[10]. Son yıllarda geri kazanılmış asfalt gibi C&D atık malzeme türlerinin çeşitli mühendislik uygulamalarında doğal agrega yerine kullanılabilmesi ile ilgili bilimsel çalışmalara sıklıkla rastlanmaktadır [11],[12]. Ağırıklık olarak agrega içeren C&D atıklarının, ihtiva ettikleri silisyum dioksit ( $SiO_2$ ), kalsiyum oksit (CaO), magnezyum oksit (MgO), gibi çevreye zararlı kimyasalların ve baryum (Ba), mangan (Mn), krom (Cr), kalsiyum (Ca) gibi elementleri içeren metallerin miktarı kontrol altında tutulmak şartıyla doğal agrega yerine kullanılabilmesi birçok araştırmada belirtilmiştir [13]-[15]. Bu atıkların sürdürülebilir kalkınma ilkeleri çerçevesinde, insan sağlığını ve çevre kirliliğini önleyici tedbirlerin alınması için Hafriyat Toprağı, İnşaat ve Yıkıntı Atıklarının Kontrolü gibi atık yönetim planlarının uygulanması ile geri kazanımı birçok ülkede yasal düzenlemeler ile teşvik edici ve zorunlu hale getirilmektedir [16],[17].

C&D atık malzemelerden biri olan atık asfalt malzemenin geri kazanılabilir olması hem işletmeler hem de sürdürülebilir çevre açısından oldukça önemlidir. Asfalt atık malzeme yol, havaalanı pisti ve benzeri yapıların tamirata, tadilatı, yenilenmesi ve yıkımı sırasında ortaya çıkmakta ve bünyesinde asfalt, zift, doğal polimer ve benzeri malzeme bulundurmaktadır. 1993 yılında, Çevre Koruma Ajansı (EPA) ve ABD Federal Karayolu İdaresi (Federal Highway Administration), Amerika'nın bir numaralı geri dönüştürülmüş malzemesi olarak geri kazanılmış asfaltı (RAP) rapor olarak sunmuşlardır [18]. Günümüzde de geri kazanılmış asfalt Dünya'daki ve ülkemiz' deki diğer C&D atık ürünleri arasında en fazla oranda geri kazanılmaya ve yeniden kullanılmaya devam etmektedir. C&D atıkların karayolu uygulamalarında kullanımı, bu malzemelerin fiziksel ve kimyasal etkileri ile ilgili literatürde birçok çalışma mevcuttur [19]-[26]. İnşaat mühendisliğinin bir dalı olan Geoteknik mühendisliği uygulamalarında doğal agrega yerine geri kazanılmış asfalt gibi C&D malzemenin kullanımı, kullanılan malzeme sarfiyatının büyük hacimlerde olması sebebiyle özel öneme sahiptir.

Geoteknik mühendisliği uygulamalarından biri olan, yol üst yapısı ve yol tabanına çeşitli yollarla giren suyun tahliye edilmesi için inşa edilen yol altı drenaj sisteminin performansı kullanılan agreganın dane çapına ve permeabilite özelliğine bağlı olarak değişmektedir. Bu sistemin zamana bağlı filtrasyon davranışı servis ömrü boyunca karayollarının işlevlerini tam olarak yerine getirebilmeleri için kritik bir öneme sahiptir [27]. Drenaj sisteminde oluşacak problemler tüm karayolu ulaşım sistemini etkileyerek, yapının zarar görmesine neden olmaktadır. Drenaj sistemi tasarımında öncelikle fonksiyonellik ve maliyet göz önünde bulundurularak tasarım yapılması gerekmektedir. Büyük miktarda agrega kullanılan drenaj sistemlerinde doğal agrega yerine C&D atık malzemelerinin kullanılması, günümüzün en önemli problemlerinden biri olan çevre kirliliği, atık depolama sahası temini gibi problemlerin çözümüne katkıda bulunarak, doğal kaynakların korunmasına imkân sağlayarak sürdürülebilirliği ciddi oranda desteklemektedir. Ülkemizde atık malzemelerin yapay agrega olarak kullanılması "İnşaat Mühendisliği İşleri ve Yol Yapımında Kullanılan Bağlayıcısız ve Hidrolik Bağlayıcı Malzemeler İçin Yapay Agregalar" standardına uygunluk ile mümkündür [28].

İnşaat/yıkım atık malzemelerinden biri olan ve %96 oranında agrega içeren geri kazanılmış asfalt malzemenin, birçok inşaat mühendisliği uygulamalarında tekrardan kullanılması doğal kaynakların korunmasında büyük öneme sahiptir. Bu nedenle

RAP, ekonomik tasarruflar ve çevresel faydalar nedeniyle giderek daha fazla kullanılan geri kazanılmış agregadır. Drenaj sistemlerinde kullanılacak (RAP) agregasında, su hareketinden dolayı oluşacak dane yer değiştirmesinin drenaj yapılarına hasar vermemesi için, hidrolik özelliklerinin doğru bir şekilde belirlenip, drenaj sisteminin tasarımının buna uygun şekilde üretilmesi gerekmektedir [29].

Yol altı drenaj sistemi yapı elemanlarından biri olan geotekstillerin inşaat mühendisliği uygulamalarında kullanımı uzun yıllardır birçok araştırmacı tarafından incelenmektedir [27], [30]-[33]. Yol altı drenaj sistemi tasarımında kullanılacak geotekstilin seçiminde, geotekstilin geçirgenlik ve filtrasyon özellikleri dikkate alınmaktadır. Örgüsüz geotekstillerin agrega-geotekstil sistemindeki davranışını ve uyumunu değerlendirmek için *ASTM D 5101* de belirtilen uzun süreli filtrasyon deneyleri yapılmaktadır. Özellikle ince agrega göçünün önlenmesi için uygun geotekstil seçimi çok önemlidir. Geotekstillerin drenaj sistemlerinin tasarımında kullanımı, granül filtrelerden çok daha ince olmaları ve suyun geçişini sağlarken malzeme geçişini engellemeleri bakımından daha çok tercih edilmektedir [33]. Zamana ve akışa bağlı olarak ince agrega daneleri suyun akış yönünde geotekstile doğru hareket ederek zamanla geotekstilin hemen üstünde ince agrega danelerinin yoğunluğunun artmasına neden olmaktadır. Bu normal davranış biçiminden sonra ince agrega daneleri geotekstili de geçerek sistemin geçirgenliğinin artmasına hatta borulanmanın gerçekleşmesine neden olabilirler [34],[35].

*ASTM D 5101*'de tanımlanan ve tıkanma endeksleri olarak bilinen hidrolik eğim oranı (GR) ve geçirimsizlik oranı (KR), tıkanma performansının birincil göstergeleridir. *ASTM D 5101*'de hidrolik eğim oranı; agrega-geotekstil temas alanındaki hidrolik eğimin, agreganın hidrolik eğimine oranı olarak tanımlanmaktadır (Denklem 1). Bir diğer tıkanma endeksi olan geçirimsizlik oranı (Denklem 2) ise agreganın geçirimsizlik katsayısının ( $k_{agrega}$ ), agrega ve geotekstilin oluşturduğu sistemin geçirimsizlik katsayısına ( $k_{sistem}$ ) oranıdır.

$$GR = \frac{i_{agrega-geotekstil}}{i_{agrega}} \quad (1)$$

$$KR = \frac{k_{agrega}}{k_{sistem}} \quad (2)$$

*ASTM D 5101*, agrega-geoteksilden oluşan bir sistemin tıkanma sınırını  $GR = 1$  olarak verirken, ABD Ordu Mühendisleri Birliği (U.S. Army Corps of Engineers Association) GR değerlerini 3'e kadar kabul edilebilir olarak vermektedir [35]. Önceki araştırmalarda, *ASTM D 5101*'de verilen 24 saatlik zaman periyodunun, stabilize bir hidrolik eğim oranı elde etmek için yeterli olmadığı ve deney süresinin *ASTM D 5101*'de belirtilen prosedürden daha uzun tutulması önerilmiştir [33]. İnce dane miktarı fazla olan agrega-geotekstil sisteminde tıkanma derecesini değerlendirmek için hidrolik eğim oranının, deney sistemindeki nispeten küçük bir agrega-geotekstil temas bölgesinin analizinden dolayı temsili olmadığını ve tıkanma performansını değerlendirmek için alternatif oranların kullanımını tavsiye edilmektedir. Bu öneri özellikle çamur, balçık agregalar için nispeten doğrudur [35].

Temel/alt temel, asfalt, otoyol drenaj sistemleri, gürültü bariyerleri veya setler gibi karayolu uygulamalarında geri dönüştürülmüş malzeme kullanımının mekanik ve çevresel etkilerini değerlendirmek için çeşitli çalışmalar yapılmıştır

[22],[24]. Soleimanbeigi ve diğ. tarafından 2015 yılında yapılan çalışmada döküm kumu (FS), geri kazanılmış asfalt, geri kazanılmış beton (RCA) gibi çeşitli geri dönüştürülmüş malzemelerin tek boyutlu sıkıştırılabilirliği araştırılmıştır, RAP' da dahil olmak üzere bitümlü geri dönüştürülmüş malzemeler, bitümlü olmayan geri dönüştürülmüş malzemelerle karşılaştırıldığında nispeten daha yüksek sıkıştırılabilirlik sergilemişlerdir [36]. Aydılek ve Edil 2002 yılında, çamur balçık malzeme ve inorganik siltli kum agregası ile 9 farklı örgülü geotekstil kullanarak, ASTM D 5101 standardında tanımlanan deney sisteminin de uzun süreli filtrasyon deneyleri (LFT) yapmışlardır. Aynı dane çapı dağılımlarına sahip olmalarına rağmen çamur balçık malzeme-örgülü geotekstil, inorganik siltli kum-örgülü geotekstil sistemlerinin uzun süreli filtrasyon deneyi sonuçlarının farklı olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca bu çalışmada geotekstilin eşdeğer gözenek boyutunun tıkanma performansı üzerinde önemli olduğunu ifade etmişlerdir [35]. Kutay ve Aydılek 2005 yılında, uçucu kül ve deniz dibi tarama malzemesi ile farklı gözenek açıklığına sahip dört örgüsüz geotekstil, iki örgülü geotekstil kombinasyonunun, filtrasyon performansını değerlendirmek için laboratuvarında ASTM D5101 deney sisteminde uzun süreli filtrasyon deneyleri yapmışlardır. Agregası-geotekstil sisteminde farklı lokasyonlara yerleştirilmiş iki farklı geotekstil kullanmanın sistemin filtrasyon davranışını değiştirdiğini belirtmişlerdir [34]. Abbaspour ve diğ. (2019) yaşlandırılmış geri kazanılmış beton agregası-örgüsüz geotekstil kullanarak uzun süreli filtrasyon deneyleri yapmışlardır. RCA-geotekstil sisteminin filtrasyon performansının, doğal agregası-geotekstil sisteminin filtrasyon performansından farklı olduğunu belirtmişlerdir. RCA'daki yaşlanmanın filtrasyon performansını etkilediğini belirtmişlerdir [37]. Ryoo ve Aydılek (2019) üç farklı kompost malzeme ve farklı gözenek açıklıklarına sahip üç örgülü geotekstil ile iki örgüsüz geotekstilin filtrasyon performansını değerlendirmek için laboratuvarında uzun süreli filtrasyon deneyleri yapmışlardır [38]. Bilgen ve diğ. tarafından 2020 yılında yapılan çalışmada ise geri kazanılmış beton malzemenin geotekstil ile birlikte filtre tabakasında kullanılması durumunda hidrolik uyumluluğunun ve çevresel uygunluğunun belirlenmesi için ASTM D 5101 uzun süreli filtrasyon deneyi yapılmıştır [39].

Bu çalışmada ise, Geoteknik mühendisliği uygulamalarında sürdürülebilirliği desteklemek için, geri kazanılmış asfalt (RAP) malzemesinin drenaj tabakalarında kullanılabilirliği deneysel olarak araştırılmıştır. Uzun süreli filtrasyon deneyleri, geliştirilmiş ASTM D 5101 deney sisteminde yapılmıştır. Çalışmanın temel amacı; geri kazanılmış asfalt malzemenin drenaj sistemlerinde kullanılmasına yönelik incelemelerin yapılması, bu atık malzemenin geotekstil malzemeyi tıkama performansının, hâlihazırda drenaj sistemlerinde kullanılan doğal agregası ile karşılaştırılarak, drenaj sistemlerinde kullanılabilirliğini belirlemektir. Geri kazanılmış asfalt malzemenin teşkil edilecek olan drenaj sistemlerinin filtrasyon performanslarının değerlendirilmesi için, drenaj sisteminin

uzun süreli tıkanma davranışının araştırılması gerekmektedir. Bu nedenle laboratuvarında (RAP) ve geotekstilden oluşan drenaj sistemi üzerinde geliştirilmiş ASTM D 5101 deney sistemi ile uzun süreli filtrasyon deneyleri yapılmıştır. Aynı deney sisteminde, performans karşılaştırması yapabilmek için RAP agregası ile aynı dane çapı dağılımına sahip doğal agregası üzerinde de uzun süreli filtrasyon deneyleri gerçekleştirilmiştir.

Geri kazanılmış asfalt malzeme-geotekstil kullanımı ile oluşturulacak olan drenaj sistemlerinin, uzun süreli filtrasyon deneyleri, yeniden tasarlanmış ve imal ettirilmiş ASTM D 5101 uzun süreli filtrasyon deney sisteminde yapılmıştır. Yapılan deneylerde, RAP-geotekstil malzemenin zamana bağlı permeabilite davranışı, oluşabilecek potansiyel tıkanma mekanizmalarının değerlendirilmesi, zaman ve akış yönüne bağlı olarak malzeme dane çapındaki değişim, permeabilite değeri belirlenmiş ve sunulmuştur.

Bu çalışmada kullanılan deney sisteminde manometre sayısı artırıldığı için, ASTM D 5101 standardında belirtilen deney sisteminde daha hassas ölçümler almaya imkân sağlamakta ve daha gerçekçi değerler elde edilmektedir. Farklı seviyelere yerleştirilen manometre ölçümleri dikkate alınarak hesaplanmış GR değerleri karşılaştırılmıştır. Daha önceki çalışmalarda kullanılan hidrolik eğim değerleri genellikle 1 ile 8 arasında değişen değerlerdir. Bu çalışmada ise geliştirilmiş deney sistemi kullanılarak yol altı drenaj yapılarında uygulamada karşılaşması muhtemel, daha gerçeğe yakın hidrolik eğimler tercih edilmiştir. Karayolları Teknik Şartnamesi yapım şartları bölümünde (Kısım 203) karayollarında dolgu taban zemini; bitkisel zemin sıyrması yapıldıktan sonra enine su deşarjına izin verecek şekilde minimum %3 çatı eğiminde verilecek şekilde hazırlanması gerektiği belirtilmektedir [40]. Bu kapsamda hidrolik eğim değerleri  $i = 0.33, 0.66, 1$  ve  $2.5$  olarak seçilmiş ve pratik açıdan eski çalışmalara kıyasla daha gerçekçi sonuçlar elde edilmiştir.

## 2 Malzeme

Geliştirilmiş ASTM D 5101 deney sisteminde, drenaj sistemi tasarımında ve uygulamasında kullanılabilinecek geri kazanılmış asfalt, doğal agregası ve örgüsüz geotekstil malzeme kullanılmıştır.

### 2.1.1 2.1 Kullanılan Agregalar

Deneysel çalışmada, geri kazanılmış asfalt malzeme ve bu malzemenin performans değerlendirmesini yapabilmek için halihazırda yol altı drenaj sistemlerinin imalatında kullanılan doğal agregası kullanılmıştır. Uzun süreli filtrasyon deneyi numunelerinin, geoteknik özelliklerini belirlemek için elek analizi ve hidrometre deneyi, dane birim hacim ağırlığı, Standart ve Modifiye Proktor, Kaliforniya Taşıma Oranı deneyleri yapılmıştır. Agregaların fiziksel özellikleri Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Kullanılan agregaların fiziksel özellikleri.

Table 1. Physical properties of the aggregates.

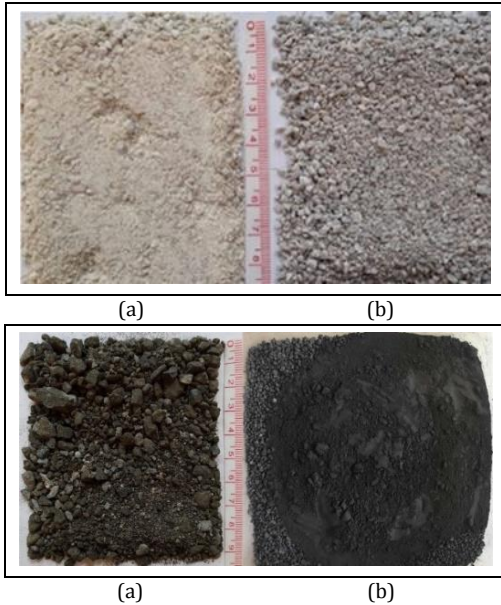
Agrega	İDO (%)	Kaba Dane		Cc	Cu	IP	Zemin Sınıflandırması	
		Kum (%)	Çakıl (%)				USCS	AASHTO
RAP	2	87	11	1.6	5.0	NP	SP	A - 1 - b
NA	13	86	1	1.8	45.5	NP	SM	A - 1 - b
DTTA	10*	90	0	0.9	4.3	NP	SP - SM	A - 1 - b

RAP: Geri kazanılmış asfalt, NA: Doğal agregası,DTTA: Deneye tabi tutulan agregası, İDO: İnce dane oranı,Cc: Derecelenme katsayısı,Cu: Üniformluk katsayısı,IP: Plastisite indisi,USCS: Birleştirilmiş zemin sınıflandırma sistemi,AASHTO: Amerika karayolları zemin sınıflandırma sistemi, \*: Karayolları Teknik Şartnamesinde #100 No.lu elek altı malzeme.

Tesislerden elde edilen agregalar Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemine (USCS) göre sınıflandırıldığında, geri kazanılmış asfalt kötü derecelenmiş kum (SP), doğal agrega da siltli kum (SM) olarak sınıflandırılmıştır [41],[42]. Filtre malzemesi olarak kullanılacak agreganın No. 40 elekten geçen malzeme örneği üzerinde ASTM D 4318 – 17’de belirtilen esaslara göre deney sonucu non-plastik özellik göstermesi istenmektedir [43]. Yapılan plastisite deneyleri ile malzemelerin non-plastik olduğu belirlenmiştir. Bu çalışmada, ülkemizde yol altı drenaj sistemlerinde kullanımına izin verilen ince filtre malzemesi alt sınırı granülometre dağılımı referans alınarak, deneye tabii tutulan numunelerdeki maksimum dane çapı, 4,75 mm olacak şekilde, minimum dane çapı ise şartnamede izin verilen 100 No.lu elek altı malzemenin tamamı da 200 No.lu elekten de geçecek şekilde bir granülometre dağılımı tasarlanmıştır.

Laboratuvara teslim edilen numuneler üzerinde yapılan elek analizleri sonucu ince dane oranının geri kazanılmış asfalt malzemede %2, doğal agregada ise %13 olduğu tespit edilmiştir.

DeneySEL çalışmalarda kullanılacak granülometre eğrisi en gayri müsait durumu modellemek amacıyla, maksimum tıkanmayı sağlayacak, Türkiye’de drenaj sistemlerinde izin verilen maksimum ince dane miktarı olan %10 ince dane miktarı içerecek şekilde oluşturulmuştur ve deneye tabii tutulan agrega (DTTA) olarak adlandırılmıştır [40]. Çalışmada kullanılacak dane dağılımını elde edebilmek için tesislerden gönderilen malzemeler çeneli kırıcı ile kırılmış ve deneye tabii tutulacak agrega (DTTA) dane çapı dağılımına uygun olarak hazırlanmıştır. Tesislerden temin edilen geri kazanılmış asfalt agrega, doğal agrega (NA) ve deneye tabii tutulacak geri kazanılmış asfalt agregasının görüntüleri Şekil 1’de görülmektedir.



Şekil 1. Tesisten getirilen. (a): Doğal agrega-ince. (b): Doğal agrega-kaba. (c): Tesisten gelen geri kazanılmış asfalt malzeme (RAP). (d): Deneye tabii tutulacak RAP.

Figure 1. Quarry sample. (a): Natural aggregate-fine, (b): Natural aggregate-course. (c): Recycled asphalt pavement material (RAP), (d): RAP Material to be tested.

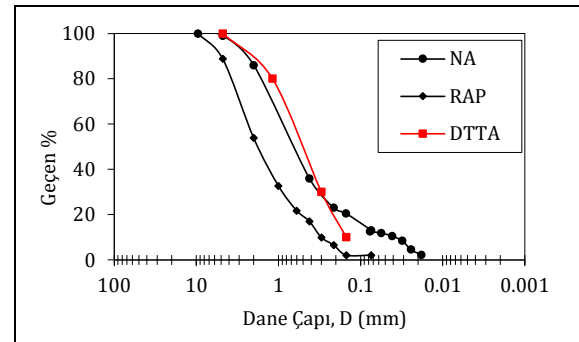
DeneySEL çalışmada kullanılan agregaların mekanik özelliklerini belirlemek ve deney numunesi hazırlanmasında kullanılacak olan maksimum kuru birim hacim ağırlığı ve optimum su muhtevasının tayini için ASTM D 698 – 12 ve ASTM D 1557 – 12 Standartlarında tanımlanan Method B yöntemi kullanılmıştır. Proktor deneyleri sonucunda elde edilen, agregaların optimum su muhtevaları ve maksimum kuru birim hacim ağırlıkları Tablo 2’de verilmiştir [44],[45]. Optimum su muhtevasında ve maksimum kuru birim hacim ağırlığında hazırlanan numune üzerinde CBR deneyi yapılmış, deney sonuçları Tablo 2’de verilmiştir [46].

Tablo 2. Kullanılan agregaların endeks özellikleri.

Malzeme	Gs	Proktor Deney Sonuçları				CBR (%)
		Standart		Modifiye		
		W <sub>opt</sub> (%)	γ <sub>kmaks</sub> (kN/m <sup>3</sup> )	W <sub>opt</sub> (%)	γ <sub>kmaks</sub> (kN/m <sup>3</sup> )	
RAP	2.25	12	17.85	8.7	19.60	26
NA	2.71	9.4	18.93	8.7	19.65	75

Gs: Özgül ağırlık, w<sub>opt</sub>: Optimum su muhtevası, γ<sub>kmaks</sub>: Maksimum kuru birim hacim ağırlık, CBR: Kalifornia taşıma oranı.

Bir zeminin geçirimliliğini etkileyen en önemli unsur numune içerisindeki en küçük dane çaplı olan daneciklerin miktarıdır. Zemin içerisinde ince dane oranı arttıkça zeminin geçirimliliği de bununla birlikte azalacaktır. Bu nedenle uzun süreli filtrasyon deneyinde de kullanılan agreganın dane çapı dağılımı tıkanma performansını önemli ölçüde etkilemektedir. Çalışmada, agrega-geotekstil sisteminin tıkanmasına neden olacak ince dane miktarı, Karayolları Teknik Şartnamesinde, Yol altı drenaj sistemlerinde kullanımına müsaade edilen en büyük ince dane oranına sahip olacak şekilde tasarlanmıştır. Karayolu Teknik Şartnamesinde drenaj tabakasında kullanılacak filtre malzemesinde 100 No.lu elek altı malzeme miktarının maksimum %10 olacak şekilde tasarlanması gerektiği belirtilmektedir. DeneySEL çalışmada kullanılacak numunelerin bakır granülometre eğrisi ve deneye tabii tutulan granülometre eğrisi Şekil 2’de verilmiştir.



Şekil 2. Numunelerin dane çapı dağılımları.

Figure 2. Grain size distribution of the materials.

Fiziksel açıdan bakıldığında bu malzemelerin içindeki ince dane boyutundaki (< 74µm) danelerin suyun akış yönüyle beraber hareket edip geotekstil malzemeyi tıkayıp tıkamayacağını belirlemek için drenaj sisteminin performans açısından son derece önemlidir. Bu, yer değiştiren parçacıklar geotekstil eyafların üzerinde veya içinde birikerek geotekstilin körleşmesine ve/veya tıkanmasına yol açacaktır.

## 2.2 Geotekstil

Agrega ve geotekstilden oluşan drenaj sisteminin performansını etkileyen bir diğer faktörde geotekstil seçimidir. Sistemin efektif çalışabilmesi için uygun geotekstil seçimi çok önemlidir. Geotekstil malzemenin amaca uygun seçimi, tatmin edici filtrasyon performansının elde edilmesinde önemli bir rol oynamaktadır [31],[47]. Geotekstil filtre malzemesinin amacı, göçü engelleyerek sistemin stabilitesini korurken, suyun sistem dışına çıkmasına izin vermektir. Genellikle filtrasyon uygulamalarında örgüsüz geotekstil tercih edilmektedir [32], [48]-[50]. Örgüsüz geotekstillerde filtrelemeyi tanımlayan en önemli parametre eşdeğer gözenek boyutu ve düşey düzlemdeki geçirgenliği (permitivite) değeridir. Yapılan araştırmalarda agrega-geotekstil sistemlerinde, artan gözenek genişliği ile daha az tıkanma ve daha fazla borulanma gözlemlenmiştir.

Drenaj sistemlerinde kullanılacak olan geotekstilin eşdeğer gözenek boyutu borulanmayı ve dane hareketlerini engelleyecek boyutta olması gerekmektedir. Tıkanmış bir geotekstil, sistem geçirgenliğinde bir azalmaya neden olur ve bu da agrega geçirgenliğinin, agrega-geotekstil sisteminin geçirgenliğinden daha fazla olması anlamına gelir [27],[30], [49]-[51].

Agrega ve geotekstil' den oluşan drenaj sisteminde, filtre uygulamalarında tıkanmanın maksimum yaşanacağı ve Türkiye' de drenaj sistemlerinde kullanımına izin verilen 0.08 eşdeğer göz açıklığına sahip örgüsüz, polipropilen geotekstil seçilmiştir. Daha önceki çalışmalarda 0.08 gözenek açıklığına sahip örgüsüz geotekstil kullanılmamıştır. Deneysel çalışmada kullanılan geotekstilin fiziksel ve hidrolik özellikleri Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 3. Örgüsüz geotekstilin teknik özellikleri.

Table 3. Technical properties of nonwoven geotextile.

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

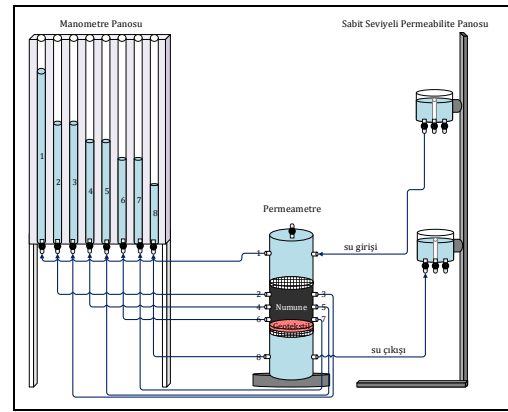
NW: Örgüsüz geotekstil. NP: İğne delikli dokuma. PP: Polipropilen. B: Boyuna. E: Enine.

## 3 Yöntem

Non-plastik agrega ( $IP < 5$ ) ve geotekstilden oluşan drenaj tabakasının geçirimsizlik davranışını belirlemek için ASTM D 5101 standardında verilen deney sistemi geliştirilerek yeniden tasarlanmış ve imalatı yaptırılmıştır. ASTM D 5101 standardında tanımlanan deney sisteminin, numunelerin uzun süreli filtrasyon performansını belirlemek konusunda eksik kalan noktalarının geliştirilmesi amacıyla numune haznesinin boyutu, manometre sayıları artırılmış ve deney sisteminden daha gerçekçi veriler alınması sağlanmıştır. Geliştirilmiş deney sistemi Şekil 3'te görülmektedir.

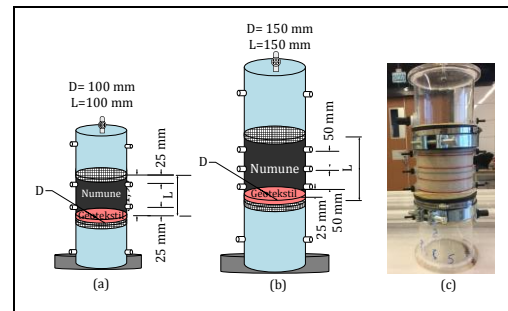
ASTM D 5101 Standardında deneyde kullanılacak en büyük agrega çapına göre 100 veya 150 mm çapında silindirik numuneler kullanılması gerektiği belirtilmektedir. Önceki çalışmalarda 100 mm çapında silindirik numuneler kullanılmış

ve deney sisteminde ölçüm alabilmek için numune tabanından itibaren 25 mm ve 75 mm yüksekliklere manometre portları yerleştirilmiştir. Bu çalışmada kullanılan, geliştirilmiş ASTM D 5101 deney sisteminde 150 mm çapında 150 mm yüksekliğinde silindirik numuneler kullanılmıştır. Şekil 4'te standart ASTM D 5101 deney sistemi permeametri ve geliştirilmiş ASTM D 5101 deney sistemi permeametri verilmiştir. Ayrıca, Şekil 4'te görüldüğü gibi geotekstil tabanından itibaren 25 mm, 75 mm ve 125 mm seviyelere manometre portları yerleştirilmiş, böylelikle daha hassas ölçümler elde edilmiştir. ASTM D 5101 standardında belirtilen geçirimsizlik deneyi ile doygun agrega-geotekstil sistemlerinin tek yönlü akış koşullarında filtrasyon performansının değerlendirilmesi yapılabilmektedir. Elde edilen sonuçlar, hem parçacık tutma ve akış kapasitesi hem de ilgili agrega-geotekstil sisteminin uyumluluk davranışının bir göstergesi olarak kabul edilmektedir.



Şekil 3. Geliştirilmiş ASTM D 5101 Uzun Süreli Filtrasyon Deneyi sistemi.

Figure 3. Overview of the Modified ASTM D 5101 Long filtration test setup.



Şekil 4(a): Standart ASTM D 5101 deney sistemi permeametrinin şematik görüntüsü. (b): Geliştirilmiş ASTM D5101 deney sistemi permeametri şematik görüntüsü. (c): Geliştirilmiş ASTM D5101 uzun süreli filtrasyon deney sistemi permeametri fotoğrafı.

Figure 4(a): Schematic drawing of the rigid-wall permeameter for ASTM D 5101 setup. (b): Schematic drawing of the rigid-wall permeameter for Modified ASTM D 5101 setup. (c): Photo of the rigid-wall permeameter for Modified ASTM D 5101 setup.

Bu çalışmada da geotekstil ve farklı agrega türlerinden teşkil edilecek drenaj sisteminin tıkanma davranışının deneysel olarak belirlenmesinde, Şekil 5'te görülen geliştirilmiş ASTM D 5101 filtrasyon deney sistemi kullanılarak uzun süreli filtrasyon deneyleri yapılmıştır.



Şekil 5. İTÜ zemin mekaniği laboratuvarı uzun süreli filtrasyon deney sistemi.

Figure 5. Overview of ITU Soil mechanics laboratory long filtration test setup.

Bu deney değişik hidrolik eğimler altında hem yalnızca kullanılan agreganın geçirimsizlik katsayısını ( $k_{agrega}$ ) hem de agrega ve geotekstilin oluşturduğu sistemin geçirimsizlik katsayısını ( $k_{sistem}$ ) ölçmeye, hidrolik eğim oranının ( $GR$ ) ve geçirimsizlik oranının ( $KR$ ) belirlenmesine olanak vermektedir. ASTM D 5101' de belirtilen 24 sa.'lik prosedürün aksine, bu çalışmadaki deneyler, uzun süreli tıkanma performansını anlamak için 6 aydan uzun bir süre devam ettirilmiştir. 24 sa.'lik zaman periyodu ince dane miktarı fazla olan agregalarda genellikle sabit bir hidrolik eğim ve geçirimsizlik oranları elde etmek için yeterince uzun bir zaman dilimi olmadığından 24 sa. elde edilen değerler yanıltıcı olabilir [33]. Bu nedenle, deneyler stabil hidrolik eğim oranı ve geçirimsizlik oranı elde edilene kadar yürütülmüştür. Kabul edilen stabilizasyon kriteri bu oranların son beş değerlerindeki değişimin %10'dan daha az olduğu durum olarak kabul edilmiştir.

Deneylerde 0.33, 0.66, 1, 2.5 olan hidrolik eğimler kullanılmıştır. Deney sisteminde tam otomatik bir su temini sistemi kullanarak deney için gerekli suyun sürekliliği sağlanmıştır. Suyun çözünmüş oksijen içeriği düzenli olarak kontrol edilmiştir. Daha önce yapılan araştırmalarda, musluk suyundaki mikroorganizmaların varlığına bağlı olarak biyolojik büyümenin meydana geldiği, bununla hidrolik iletkenlikleri azalttığı ve hatalı ölçümlere neden olduğu belirtilmiştir. Deney sistemine su pompalayan su tankına yosun vb. biyolojik büyümenin önüne geçebilmek için düzenli aralıklar ile klor tabletleri eklenmiştir.

Sıkıştırma, geçirgenlik ve filtrasyon deneyleri arasındaki tutarlılığı sağlamak ve numune hazırlanmasındaki heterojenlikten kaçınmak için numunelerin hazırlanması ve deneyler aynı operatör tarafından yapılmıştır. D = 150 mm, L = 150 mm ebatlarına sahip numune hücreesine agregalar standart 5 tabaka şeklinde yerleştirilmiştir. Numunelerde doygunluk alt hücreden çok yavaş su verilerek, üst haznedeki de mevcut hava kabarcıkların çıkışını

kolaylaştırmak için vakum uygulanarak sağlanmıştır. Manometrelerin tıkanıp tıkanmadığının kontrolü aynı seviyede bulunan iki manometre okuması arasındaki fark dikkate alınarak gözlemlenmiştir.

Numunelerde doygunluk işlemi tamamlandıktan sonra, olası herhangi bir sıkışmış hava kabarcığının numuneden çıkışının sağlanması için en az 24 sa. boyunca doygun durumda bekletilmiştir. Uzun süreli filtrasyon deneyleri bu süreçten sonra başlatılmıştır. Deney süresince, manometre okumaları ve deşarj miktarı ile giriş ve çıkış sıcaklığı düzenli aralıklarla (en az 24 sa. bir) kaydedilmiştir. Agrega-geotekstil sisteminin ( $k_{sistem}$ ) geçirgenliği Darcy yasası kullanılarak, hidrolik eğim oranı ve geçirimsizlik oranı değerleri ise ASTM D5101'de açıklandığı şekilde hesaplanmıştır. Hidrolik eğim oranı ve geçirimsizlik oranının stabilizasyonu için gerekli zaman, ASTM D 5101 deney prosedüründe belirtilen süreden (24 ve 48 sa.'lik döngülerdir) çok daha uzun olduğundan, bir agrega/geotekstil sisteminde  $i = 0.33, 0.66, 1, 2.5$  hidrolik eğimlerinde deneylerin tamamlanması 6 aydan daha fazla sürmüştür. Hidrolik eğimler, numuneyi kesintisiz su girişi sağlayan hazne ile, numuneden çıkan suyun transferini sağlayan hazne arasındaki kot farkı  $i = 0.33, 0.33, 0.66, 1, 2.5$  sağlayacak şekilde ayarlanmıştır. Her bir hidrolik eğimden diğerine geçiş için sağlanması gereken stabilizasyon şartı, birbirini takip eden beş  $GR$  ve  $KR$  sistemi okumasının mutlak farkın %10'u aşmadığı durum kabul edilmiştir [34].

Stabil hidrolik eğim oranı ve geçirimsizlik oranı elde edildikten sonra uzun süreli filtrasyon deneyleri sonlandırılmıştır. Numunenin hücreden çıkartılmasından önce; üst, numune ve alt hücrelerdeki sular alt porttan boşaltılmıştır. Deney sonrası, yer değiştiren ince dane miktarını belirlemek için deney numunesi dikkatlice beş tabaka halinde hücreden çıkarılmış, atmosfer koşullarında havayla kurutulmuş ve tekrardan elektrik analizi yapılmıştır. Agrega-geotekstil sisteminden geçen agrega miktarını belirlemek için alt haznedeki toplanan agrega miktarı belirlenmiştir.

Farklı seviyelere yerleştirilmiş manometre portlarındaki değerler dikkate alınarak Denklem 3, 4, 5 ve 6'da verilen  $GR$  değerleri hesaplanmış ve karşılaştırılmıştır.

$$GR_1 = \frac{i_{0-25}}{i_{25-75}} = 2 \times \frac{h_{25} - h_0}{h_{75} - h_{25}} \quad (3)$$

$$GR_2 = \frac{i_{25-75}}{i_{75-125}} = \frac{h_{75} - h_{25}}{h_{125} - h_{75}} \quad (4)$$

$$GR_3 = \frac{i_{0-25}}{i_{25-125}} = 4 \times \frac{h_{75} - h_{25}}{h_{125} - h_{75}} \quad (5)$$

$$GR_4 = \frac{GR_1 + GR_2}{2} \quad (6)$$

Burada;

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

$i$ : Hidrolik eğimdir.

ASTM D 5101 de geçirimsizlik oranı agreganın stabilize permeabilite katsayısının (Denklem 8) sistemin permeabilite katsayısına (Denklem 7) oranı olarak tanımlanmaktadır.

$$k_{sistem} = \frac{Q}{A \times t} \times \frac{1}{i_{sistem}} \times \frac{\mu T}{\mu_{20}} = \frac{Q}{A \times t} \times \frac{l}{h_{150} - h_0} \times \frac{\mu T}{\mu_{20}} \quad (7)$$

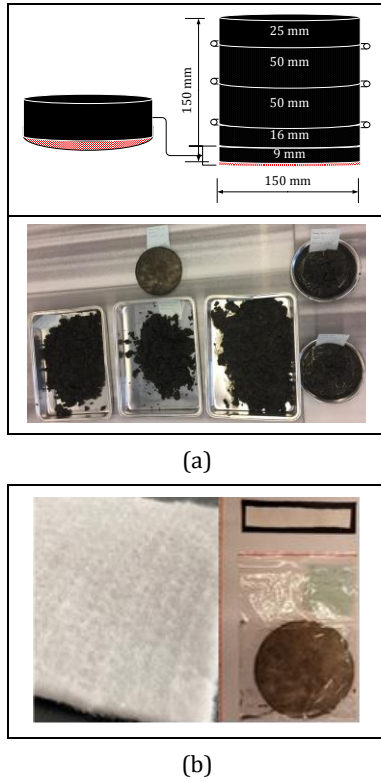
$$k_{agrega} = \frac{Q}{A \times t} \times \frac{1}{(U_{ort} - A_{ort})} \times \frac{\mu_T}{\mu_{20}} \quad (8)$$

Burada;

- $k_{sistem}$  : Sistemin 20 °C sıcaklıktaki permeabilite değeri, cm/s,  
 $Q$  : t zamanında biriken akış miktarı, cm<sup>3</sup>,  
 $i$  : Hidrolik eğim,  
 $A$  : Numune kesit alanı, cm<sup>2</sup>,  
 $t$  : Q miktar drene edilen suyun toplanması için gerekli olan zaman, s,  
 $\mu_T$  : T sıcaklıkta suyun viskozitesi,  
 $\mu_{20}$  : 20 °C sıcaklıkta suyun viskozitesi,  
 $l$  : Numune uzunluğu,  
 $U_{ort}$  : Üst manometre okumalarının ortalaması,  
 $A_{ort}$  : Alt manometre okumalarının ortalaması,

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

Drenaj sistemlerinde malzeme olarak doğal agrega yerine geri kazanılmış asfalt agreganın kullanılması durumunda sistemde oluşabilecek fiziksel tıkanma, bu atıkların içindeki ince dane boyutundaki (< 74µm) danelerin suyun akış yönüyle beraber hareket edip geotekstil malzemeyi tıkadığında veya geotekstilin üzerinde bir filtre tabakası oluştuğunda gerçekleşmektedir. Agregada içerisindeki fiziksel göçün tayini için, deneye tabii tutulan numune geotekstilden itibaren 9, 16, 50, 50, 25 mm yüksekliğinde 5 tabakaya ayrılarak deney sonrası tekrardan elek analizi yapılmıştır (Şekil 6).



Şekil 6(a): Deney sonrası RAP numunesi ve geotekstil.  
(b): Deney öncesi ve sonrası geotekstil görüntüsü.  
Figure 6(a): RAP sample and geotextile after the test.  
(b): Geotextile before and after the test.

Özellikle geotekstilin hemen üzerindeki ilk 9 mm'lik tabakada ince danelerin birikmesinin tıkanmaya neden olacağı ve burada biriken ince danelerin filtre keki oluşturabileceği düşünülebilir [47]. Ayrıca deney sonunda agrega-geotekstil sisteminden geçen ince dane miktarını belirlemek ve borulanma performansını değerlendirmek için alt haznede biriken agregalar toplanmıştır. Yapılan deney sonuçlarına göre alt haznede toplanan agrega miktarının önemsiz sayılacak kadar küçük olduğu tespit edilmiştir.

#### 4 Deney sonuçları ve tartışma

Laboratuvarıda geri kazanılmış asfalt agregası ve doğal agrega üzerinde, farklı hidrolik eğimlerde, geliştirilmiş ASTM D 5101 deney sistemi ile yapılan uzun süreli filtrasyon deneyi sonuçlarının analizi için standartta belirtilen hidrolik eğim oranı ve geçirgenlik oranı kullanılmıştır. Geliştirilmiş deney sisteminde daha hassas ölçümler yapılabilmesi için numune boyutu ve manometre sayıları artırılmış farklı seviyelerdeki manometre okumaları göz önünde bulundurularak hesaplanan GR oranları karşılaştırılmıştır.

ASTM D 5101 uzun süreli filtrasyon deneyi verilerine göre agrega/geotekstil sisteminde herhangi bir akış kısıtlanması yaşanmıyor ve geotekstilde herhangi bir tıkanma oluşmadı ise  $GR = 1$  olmalıdır. Tıkanmaya başlamış bir geotekstil veya herhangi bir akış kısıtlaması yaşayan agrega-geotekstil sistemi için, hidrolik eğim oranının,  $GR > 1$  olması beklenmektedir.  $GR > 1$  olması, fiziksel olarak partiküllerin hareket ettiğini ve  $GR$  değeri arttıkça tıkanma derecesinin ve akış kısıtlamasının arttığını göstermektedir.  $GR < 1$  ise agrega-geotekstil sisteminde borulanma meydana geldiği, yani ince danelerin geotekstilden geçtiği düşünülmektedir.  $GR$  değeri uygulanan hidrolik eğim ile değişmektedir. Ayrıca agrega-geotekstil sisteminin tıkanma performansının doğru değerlendirilebilmesi için  $GR$  ve  $KR$  değerlerinin birlikte kullanılması gerekmektedir. Bu yoruma dayanarak, mevcut çalışmada test edilen RAP agrega-geotekstil sisteminde parçacık hareketi yaşanmış ve akışta azalma gerçekleşmiştir. Bu durum geotekstilde fiziksel tıkanmanın yaşandığını göstermektedir. Doğal agrega numunesinde hidrolik eğimin artması ile borulanmanın gerçekleştiği de tespit edilmiştir.

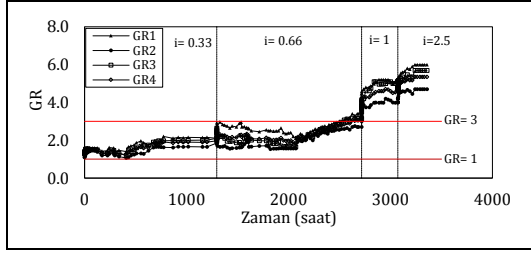
Agrega-geotekstil sisteminde zamana bağlı olarak agrega danelerinin göçünün tespiti için, deney öncesi ve sonrası numunelerin elek analizi sonucu elde edilen granülometre dağılımları karşılaştırılmıştır. Deneye tabii tutulan agrega-geotekstil sistemlerinde, deney sonrası geotekstilden geçip alt haznede biriken ince malzeme miktarı çok sınırlı kalmıştır.

Standart ASTM D 5101 deney sistemine kıyasla, deneylerde 150 mm×150 mm ebatlarında silindirik numune kullanılmış, daha hassas ölçüm yapabilmek için 0-25 mm, 25-75 mm ve 75-125 mm yerleştirilmiş manometrelerdeki okumalar dikkate alınarak  $GR$  hesaplamaları yapılmıştır. Geotekstilden uzaklaştıkça tıkanmanın azaldığı tespit edilmiştir ( $GR1 > GR2 > GR3$ ). Agregada-geotekstilden oluşan sistemin tıkanma üst sınır değeri olarak hidrolik eğim oranının 3 olduğu değer kabul edilmiştir.

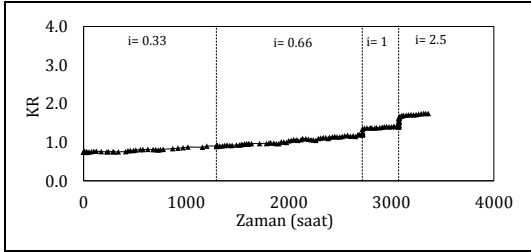
Önceki çalışmalarda düşük hidrolik eğim altında deneyler gerçekleştirilmediği için bu çalışmada deney sisteminin geliştirilmesi, yol tasarımında daha gerçekçi yaklaşımı yansıtması açısından  $i = 0.33, i = 0.66$  hidrolik eğimleri altında uzun süreli filtrasyon deneyinin yapılması çalışmayı diğer benzer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

#### 4.1 Geri kazanılmış asfalt-geotekstil sisteminin uzun süreli filtrasyon deney sonuçları

İnşaat/yıkım atığı türlerinden biri olan geri kazanılmış asfalt agregasının yol altı drenaj sistemlerinde kullanılabilirliğinin değerlendirilmesi için geri kazanılmış asfalt agregası-geotekstil sisteminin uzun süreli filtrasyon deneyleri gerçekleştirilerek deney verileri değerlendirilip  $GR$  ve  $KR$  değerlerinin zamana bağlı değişim grafikleri Şekil 7(a) ve Şekil 7(b)'de verilmiştir. Deney verilerinin güvenilirliğini test etmek için geri kazanılmış asfalt numunesi üzerinde deney tekrarlanmış, sonuçların örtüştüğü görülmüştür.



(a)



(b)

Şekil 7. RAP agregasının uzun süreli filtrasyon deney sonuçları. (a): Hidrolik eğim oranı ( $GR$ ). (b): Permeabilite oranı ( $KR$ ).

Figure 7. LFT results for RAP. (a): Gradient ratio ( $GR$ ). (b): Permeability ratio ( $KR$ ).

Şekil 7a'dan görüldüğü üzere uzun süreli filtrasyon deneylerinin sonunda RAP numunelerinde hidrolik eğim arttıkça ince daneli malzemelerin hareketinden dolayı tıkanmanın ( $GR > 3$ ) yaşandığı anlaşılabilir. Bu, numunenin üst kısmında (geotekstilin 25 mm ila 150 mm yukarısındaki) önemli miktarda dane göçünün veya bitümlü malzemenin hareketini göstermektedir. Geri kazanılmış asfalt ihtiva ettiği bitüm bağlayıcı malzemenin hareketi geotekstil üzerinde geçirimsiz bir tabaka oluşturduğu da düşünülebilir.

Tablo 4 ve Tablo 5'teki veriler gözden geçirildiğinde geri kazanılmış asfalt-geotekstil sisteminin tüm hidrolik eğimlerde  $GR > 1$  olduğu için kısmi olarak tıkanmış düşünülebilir. Ek olarak, geotekstil-agrega temas bölgesinde ince danelerin birikmesi ve RAP bünyesindeki bitüm malzemenin hareketi nedeni ile (geotekstilin 0 ila 25 mm üzerinde) çok düşük geçirgenlik ve geçirgenlik oranında önemli azalma meydana gelmiştir. Bu nedenle, RAP-geotekstil sisteminde körlük veya tıkanma olmuştur.

Uzun süreli filtrasyon deneyi süresince tıkanma potansiyelini değerlendirmek için, filtrasyon sonrası deney numunelerinin dane boyutu dağılımındaki değişiklikler analiz edilmiştir. Geri kazanılmış asfalt agregasının deney sonu granülometre eğrileri Şekil 8'de verilmiştir.

Tablo 4. RAP agregasının uzun süreli filtrasyon deneylerinden elde edilen hidrolik eğim oranı ( $GR$ ) değerleri.

Table 4. Gradient ratio ( $GR$ ) values of the long term filtration tests for RAP.

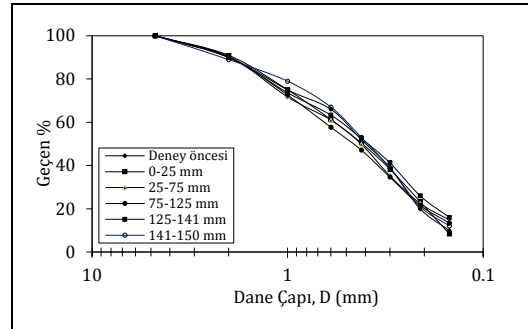
Malzeme	Hidrolik eğim, $i$	$GR1$	$GR2$	$GR3$	$GR4$
RAP	0.33	2.15	1.65	2.01	1.90
	0.66	3.40	2.70	3.15	3.05
	1.00	5.20	4.01	5.10	4.61
	2.50	6.00	4.70	5.70	5.35

Tablo 5. RAP agregasının uzun süreli filtrasyon deneylerinden elde edilen geçirimsizlik oranı ( $KR$ ) değerleri.

Table 5. Permeability ratio ( $KR$ ) values of the long term filtration tests for RAP.

Malzeme	Hidrolik eğim, $i$	$k_{agrega}$ (cm/s) @20°C	$k_{sistem}$ (cm/s) @20°C	$KR$	$GR4$
RAP	0.33	0.0018	0.0020	0.90	1.90
	0.66	0.0011	0.0009	1.22	3.05
	1.00	0.0036	0.0025	1.44	4.61
	2.50	0.0042	0.0024	1.75	5.35

Şekil 8'deki grafikten anlaşılacağı üzere su akış yönüne doğru parçacık hareketi olmuş geotekstile yakın bölgede ince dane oranında artış meydana gelmiştir. Bu da  $GR$  değerinin geotekstile yakın bölgelerde yüksek çıkmasının bir diğer kanıtıdır.



Şekil 8. RAP agregasının uzun süreli filtrasyon deneyi sonrası dane çapı dağılımı.

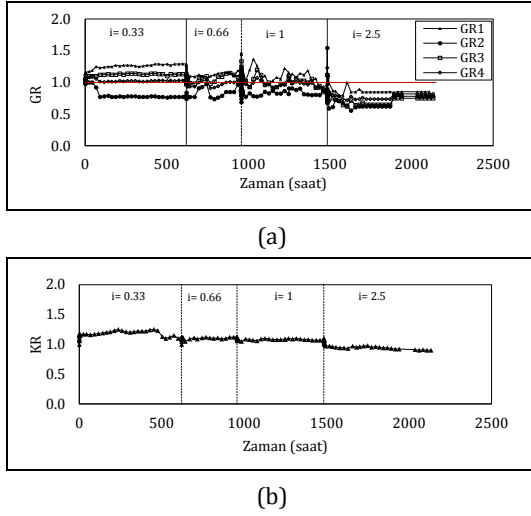
Figure 8. Post LFT grain size distribution of the RAP sample.

#### 4.2 Doğal agrega-geotekstil sisteminin uzun süreli filtrasyon deney sonuçları

Geri kazanılmış asfalt numunesinin performans karşılaştırmasını yapabilmek için yol altı drenaj sistemlerinde halihazırda kullanılan bir doğal agrega üzerinde de uzun süreli filtrasyon deneyleri yapılmıştır. Deney sonuçları grafik olarak Şekil 9(a) ve Şekil 9(b)'de sunulmuştur. NA numunesinde  $i = 2.5$  hidrolik eğimde borulanma gerçekleştiği görülmektedir ( $GR < 1$ ).

$GR$  ve  $KR$  grafikleri benzer değişim göstermektedir.  $i = 0.33, 0.66$  ve  $1$  hidrolik eğimlerinde  $GR1$  değeri yaklaşık 1 olarak elde edilmiştir.  $i = 2.5$  hidrolik eğimde ise  $GR1 = 0.85$ 'dir. Uzun süreli filtrasyon deneyi sonrası alt haznede yaklaşık 25 g agrega biriktiği tespit edilmiştir. Alt haznede biriken malzeme miktarı önemsenecek miktarda olmasa da sistemde borulanmanın başladığının göstergesidir.





Şekil 9. Doğal agreganın uzun süreli filtrasyon deney sonuçları. (a): Hidrolik eğim oranı (GR). (b): Permeabilite oranı (KR).

Figure 9. LFT results for natural aggregate. (a): Gradient ratio (GR). (b): Permeability ratio (KR).

Tablo 6 ve Tablo 7'deki GR ve KR değerleri doğal agrega-geotekstil sisteminin  $i = 0.33$  ve  $i = 0.66$  hidrolik eğimlerde  $GR1 \cong 1$  olduğu için sistemde tıkanma olmadığı,  $i = 1$  ve  $i = 2.5$  hidrolik eğimlerde  $GR1 \leq 1$  olduğu için sistemde borulanmanın başladığı söylenebilir.

Tablo 6. Doğal agreganın uzun süreli filtrasyon deneylerinden elde edilen hidrolik eğim oranı (GR) değerleri.

Table 6. Gradient ratio values of the long term filtration tests for the natural aggregate.

Malzeme	Hidrolik Eğim, $i$	GR1	GR2	GR3	GR4
NA	0.33	1.29	0.77	1.13	1.03
	0.66	1.19	0.96	1.16	1.08
	1.00	0.93	0.86	0.87	0.90
	2.50	0.85	0.78	0.75	0.82

Tablo 7. Doğal agreganın uzun süreli filtrasyon deneylerinden elde edilen geçirimsizlik oranı (KR) değerleri.

Table 7. Permeability ratio values of the long term filtration tests for the natural aggregate.

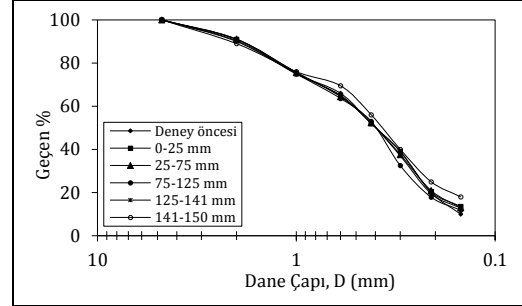
Malzeme	Hidrolik Eğim, $i$	$k_{agrega}$ (cm/s) @20°C	$k_{sistem}$ (cm/s) @20°C	KR	GR4
NA	0.33	0.031	0.0260	1.18	1.03
	0.66	0.012	0.0110	1.12	1.08
	1.00	0.011	0.0100	1.07	0.90
	2.50	0.007	0.0077	0.90	0.82

Uzun süreli filtrasyon deneyi süresince agrega danelerinin hareketini değerlendirmek için, filtrasyon sonrası deney numunelerinin dane boyutu dağılımındaki değişiklikler analiz edilmiştir. NA numunesinin deney sonu granülometre eğrileri Şekil 10'da verilmiştir. Şekil 10'da özellikle geotekstil temas bölgesindeki (141-150 mm) ince dane miktarındaki artış gözlemlenebilmektedir.

#### 4.3 Deney sonuçlarının karşılaştırılması

ASTM D5101 standardında tanımlanan uzun süreli filtrasyon deney sisteminde, Aydılek ve Edil (2002), Kutay ve Aydılek (2005), Abbaspour ve diğ. (2019), Bilgen ve diğ. (2020) farklı agrega türü-geotekstil kombinasyonlarının filtrasyon performansını değerlendirmek için uzun süreli filtrasyon

deneyleri yapmışlardır [34], [35], [39], [52]. Yukarıda adı geçen araştırmacıların deneysel çalışmalarında kullandıkları agrega türleri, hidrolik eğim, geotekstil görünüş göz açıklığı, ASTM D 5101 uzun süreli filtrasyon deneyi sonucu elde ettikleri GR ve KR değerleri Tablo 8'de verilmiştir.

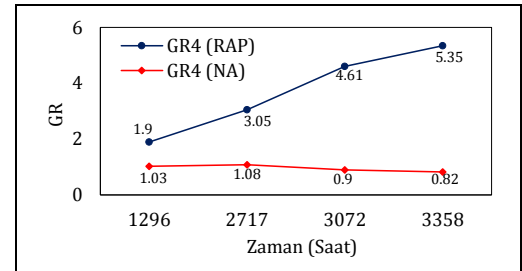


Şekil 10. Doğal agreganın uzun süreli filtrasyon deneyi sonrası dane çapı dağılımı.

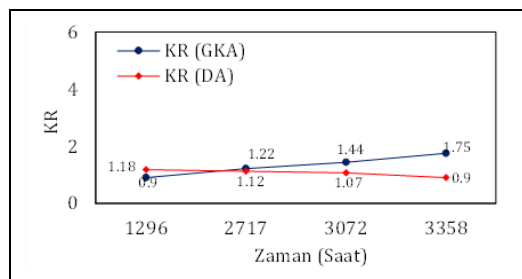
Figure 10. Post LFT Grain size distribution of the natural aggregate sample.

Tablo 8'den de anlaşılacağı gibi daha önce bu konuda yapılmış çalışmalarda geri kazanılmış asfalt agrega ve 0.08 görünür göz açıklığına sahip örgüzsüz geotekstil kullanılmamıştır. Ayrıca daha önceki çalışmalarda hidrolik eğim ( $i$ ) değeri olarak 0.33 ve 0.66 değerleri kullanılmamıştır.

Geliştirilmiş ASTM D 5101 deney sisteminde geri kazanılmış asfalt-geotekstil, doğal agrega-geotekstil numuneleri üzerinde yapılan uzun süreli filtrasyon deneyleri sonucu elde edilen GR4 ve KR değerlerinin kıyaslamasının yapılabilmesi için Şekil 10'da grafik olarak verilmiştir. Şekil 11(a)'da numunelerin hidrolik eğim oranları kıyaslandığında geri kazanılmış asfalt malzemede içeriğindeki bitüm malzemeden dolayı zamana ve hidrolik eğimdeki artışa bağlı olarak tıkanma yaşandığı düşünülebilir.



(a)



(b)

Şekil 11. RAP ve NA numunelerinin uzun süreli filtrasyon deney sonuçlarının karşılaştırılması. (a): GR4 değerlerinin değişimi. (b): KR değerlerinin değişimi

Figure 11. Comparison of long term filtration test results of samples. (a): Change of GR4 values. (b): Change of KR values.

Tablo 8. Literatürde verilen ASTM D 5101 standardında yapılan uzun süreli filtrasyon deney sonuçları.

Table 8. ASTM D 5101 Long term filtration test results given in the literature.

Çalışma	Agrega	Geotekstil	Geotekstilin gözenek açıklığı	Hidrolik eğim (i)	GR	KR
Aydilek ve Edil (2002)	Çamur	<i>W, SF, PP (A)</i>	0.6	7.5	2.5	1
		<i>W, SF, PP (E)</i>	0.6		7	2.3
	İnorganik Siltli Kum	<i>W, SF, PP (F)</i>	0.6	7.5	10	2.4
		<i>W, SF, PP (A)</i>	0.6		1.5	1.3
		<i>W, SF, PP (E)</i>	0.6		1.1	1
		<i>W, SF, PP (F)</i>	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
	Deniz dibi tarama malzemesi	W5/NW3	0.6/0.3	6	0.88	0.83
		W5/NW4	0.6/0.3		1.2	1.23
		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
		W5/NW3	0.6/0.3		2.59	1.31
		W5/NW4	0.6/0.3		1.85	1.08
Abbaspour ve diğ. (2019)	Geri Kazanılmış Beton Malzeme	NW1	0.212	1	1.4	
		NW, NP, PP		2.5	2.2	
				5	9.2	
Bilgen ve diğ. (2020)	Geri Kazanılmış Beton Malzeme	W1	0.3	1.0	0.78	0.76
				2.5	0.54	0.64
		W2	0.6	1.0	1.54	1.05
				2.5	1.41	1
		W3	0.425	1.0	0.43	1.2
				2.5	0.21	1.35

Doğal agregada ise artan zaman ve hidrolik eğim ile hidrolik eğim oranı değeri düşüş göstermiştir. Ayrıca  $i = 2.5$  hidrolik eğimde kısmi borulanmanın başladığı görülmüştür. RAP-geotekstil, NA-geotekstil numunelerinin geçirimsizlik oranı değerleri kıyaslandığında hidrolik eğim oranı değerindeki değişime göre daha az bir fark gözlemlenmektedir.

## 5 Sonuçlar

Geri kazanılmış asfalt agregası ve geotekstilden oluşan drenaj sistemlerinin filtrasyon performansını değerlendirmek için laboratuvarında geliştirilmiş ASTM D 5101 uzun süreli filtrasyon deney sisteminde deneyler yapılmış ve sonuçlar değerlendirilmiştir. Geri kazanılmış asfalt agregasının filtrasyon performansını kıyaslayabilmek için drenaj sistemlerinde halihazırda kullanılan doğal agrega üzerinde de uzun süreli filtrasyon deneyi gerçekleştirilmiştir.

Uzun süreli filtrasyon deneyleri sonrasında göç eden agrega danelerini tespit edebilmek için tekrar elek analizi yapılmıştır. Laboratuvar deneyleri sonucunda aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir [36].

- 1 Geliştirilmiş ASTM D 5101 deneyinde farklı seviyelerdeki manometre okumaları dikkate alınarak hesaplanan  $GR1, GR2, GR3$  hidrolik eğim oranları kıyaslandığında, geotekstilden uzaklaştıkça  $GR$  değerinin azaldığı ve geliştirilmiş ASTM D 5101 deneylerinde elde edilen veriler değerlendirildiğinde  $GR1 > GR3 > GR2$  olduğu tespit edilmiştir,
- 2 Uzun süreli filtrasyon deneyinde  $GR > 1$  olduğunda sistemde agrega göçünün başladığının göstergesi olarak kabul edilir.  $GR$  değeri arttıkça tıkanma şiddeti

ve akış kısıtlamasının arttığı düşünülür. Bu yoruma dayanarak, mevcut çalışmada deneye tabi tutulan geri kazanılmış asfalt malzeme parçacık hareketi yaşanmış, geotekstil kısmi ile yoğun tıkanma ve akış azalması yaşanmıştır,

- 3 Uzun süreli filtrasyon deneylerinden elde edilen  $GR$ 'nin, ince dane miktarı fazla olan agregalarda tıkanma performansının değerlendirilmesinde tek başına dikkate alınmaması,  $KR$  ile birlikte değerlendirilmesi daha doğru bir yaklaşımdır,
- 4 İnşaat ve yıkım atıklarından geri kazanılmış asfaltın agrega olarak kullanıldığı uzun süreli filtrasyon deneylerinden elde edilen hidrolik eğim oranı ( $GR$ ) göz önünde bulundurulduğunda içeriğindeki bitümlü malzeme nedeni ile tıkanma açısından doğal agregaya kıyasla daha zayıf bir performans sergilediği düşünülebilir. Fakat tıkanma performansının değerlendirilmesinde kullanılan bir diğer oran olan  $KR$  değeri dikkate alındığında, RAP agregası hidrolik özellikleri bakımından, bitüm içeriği kontrol edilmek şartıyla drenaj sistemlerinde agrega olarak kullanımı tavsiye edilebilir,
- 5 Laboratuvar deney sonuçlarına göre yol altı drenaj sistemlerinin yapımında geri kazanılmış asfalt agregası çevresel faktörler ve tıkanma performansları göz önünde bulundurularak doğal agrega yerine kullanılabilir. Bu sayede sürdürülebilir malzeme yönetimi geoteknik mühendisliği uygulamalarında desteklenmiş, aynı zamanda atıkların depolama probleminin çözümünde ülkelerin ekonomisine ve çevrenin korunmasına katkıda bulunmuş olunur.

## 6 Conclusions

A series of laboratory experiments were conducted to assess the filtration performance of drainage systems consisting of Recycled asphalt aggregate and geotextile using the modified ASTM D5101 Long Term Filtration Test setup and the experimental results were evaluated. In order to compare the filtration performance of RAP, filtration tests were also performed on natural aggregate, a commonly used drainage system material. Post-test sieve analyses were performed to determine the amount of migrating particles throughout the soil sample during the long term filtration tests. Following results were concluded from the laboratory experiments:

- 1 When the hydraulic gradient ratios  $GR_1, GR_2, GR_3$  calculated by using manometer readings at different levels in modified ASTM D 5101 test are distance from the compared, the results show that the  $GR$  values decrease by increasing distance from the geotextile and  $GR_1 > GR_3 > GR_2$ ,
- 2 In the long term filtration tests,  $GR > 1$  is accepted as the indicator for initiation of particle migration within the system. Increasing  $GR$  values are assumed to point out increasing clogging severity and flow constraints. Therefore, it can be concluded that particle migration was observed in the RAP used in this study, while partial to intensive clogging and flow reduction was detected in the geotextile,
- 3 It can also be concluded that in case of using aggregates with large fine contents in long term filtration tests, it might be a more accurate approach to evaluate the gradient ratio  $GR$  and permeability ratio  $KR$  instead of taking solely  $GR$  into account,
- 4 The results of long term filtrations tests performed on RAP, a construction and demolition waste material, show that due to its bituminous content, a poorer performance in terms of clogging was observed when the  $GR$  values were compared to those of natural aggregate. However, when  $KR$ , another parameter used to evaluate the clogging performance of aggregates is taken into account instead, use of RAP in drainage systems as an aggregate material under bitumen content restrictions can be recommended,
- 5 The laboratory experiment results indicate that RAP can be used as an alternative to natural aggregate in highway drainage systems by taking potential environmental impacts and clogging performances into account, supporting sustainable material management (SMM) in geotechnical engineering applications. Furthermore, due to developing a solution to stockpiling problem of waste materials, a contribution to countries' economies and protection of environment could be achieved.

## 7 Yazar katkı beyanı

Gerçekleştirilen çalışmada Ayşegül BAYIN SARIAHMETOĞLU literatür taraması, kullanılan malzemelerin temin edilmesi, deney aletinin yapımı ve kurulumu, deneylerin yapılması, elde edilen sonuçların değerlendirilmesi, ve sonuçların incelenmesi başlıklarında; Recep İYISAN yazım denetimi ve içerik açısından makalenin kontrol edilmesi başlıklarında; Aslı YALÇIN DAYIOĞLU ve Mustafa HATİPOĞLU deney aletinin tasarımı, yapımı, kurulumu, malzeme temini, ekipman eksikliklerinin

giderilmesi yazım denetimi ve içerik açısından makalenin kontrol edilmesi başlıklarında katkı sunmuşlardır.

## 8 Etik kurul onayı ve çıkar çatışması beyanı

Hazırlanan makalede etik kurul izni alınmasına gerek yoktur

Hazırlanan makalede herhangi bir kişi/kurum ile çıkar çatışması bulunmamaktadır.

## 9 Kaynaklar

- [1] Environmental Protection Agency. "Construction and Demolition Debris Management in the United States, 2015". US. Environmental Protection Agency, Office of Resource Conservation and Recovery, US, 2020.
- [2] Buzkan C, Erman O. "Yapısal atıkların geri dönüşüm sorunu ve Türkiye'deki durumun mevzuat bakımından değerlendirilmesi". *Doğal Afetler ve Çevre Dergisi*, 6(1), 76-89, 2020.
- [3] Kabirifar K, Mojtahedi M, Wang C, Tam VWX. "Construction and demolition waste management contributing factors coupled with reduce, reuse, and recycle strategies for effective waste management: A review". *Journal of Cleaner Production*, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121265>
- [4] Gonzalez R, Chini A. "Using the circular economy to manage construction waste". *Associated Schools of Construction Proceedings of the 56th Annual International Conference*, Liverpool, United Kingdom, 15-18 April 2020.
- [5] Kisku N, Rajhans P, Panda SK, Nayak S, Pandey V. "Development of durable concrete from C&D waste by adopting identical mortar volume method in conjunction with two-stage mixing procedure". *Construction and Buildin Materials*, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119361>
- [6] Aslam MS, Huang B, Cui L. "Review of construction and demolition waste management in China and USA". *Journal of Environmental Management*, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110445>
- [7] Wang QZ, Zhao YF, Tseng ML, Lim MK. "Performance analysis and reuse of construction and demolition waste stone using fractal and gradation theory". *Journal of Cleaner Production*, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122208>
- [8] Guerra BC, Leite F, Faust KM. "4D-BIM to enhance construction waste reuse and recycle planning: Case studies on concrete and drywall waste streams". *Waste Management*, 116, 79-90, 2020.
- [9] Mehrjardi GT, Azizi A, Haji-Azizi A, Asdollafardi G. "Evaluating and improving the construction and demolition waste technical properties to use in road construction". *Transportation Geotechnics*, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2020.100349>
- [10] Li L, Qin L, Xiao H, Hu Z, Xu G, Ma Q. "The triaxial test of construction and demolition (C&D) materials with different particle sizes and sand contents". *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 2020. <https://doi.org/10.1080/19648189.2020.1820908>
- [11] Sahu D, Nirmal P, Sahu KK, Sahu TK, Dewangan B, Kuldeep S, Urvasha B. "Study of surface and sub surface highway drainage system". *International Journal of Innovations in Engineering and Science*, 4(3), 945-949, 2016.

- [12] Ok B, Sarici T, Talaslioglu T, Yildiz A. "Geotechnical properties of recycled construction and demolition materials for filling applications". *Transportation Geotechnics*, 2020.  
<https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2020.100380>
- [13] Townsend TG, Ingwersen WW, Niblick B, Jain P, Wally J. "CDDPath: A method for quantifying the loss and recovery of construction and demolition debris in the United States". *Waste Management*, 84, 302-309, 2019.
- [14] Mahedi M, Cetin B, Dayioglu AY. "Effect of cement incorporation on the leaching characteristics of elements from fly ash and slag treated soils". *Journal of Environmental Management*, 2019.  
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109720>
- [15] Dayioglu AY, Aydilek AH, Cimen O, Cimen M. "Trace metal leaching from steel slag used in structural fills". *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2018.  
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0001980](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001980)
- [16] U.S. Environmental Protection Agency. "Historical Recycled Commodity Values". Office of Resource Conservation and Recovery, USA, 2020.
- [17] T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı. "Çevre Kanunu".  
<https://www.mevzuat.gov.tr/MevzuatMetin/1.5.2872.pdf> (19.10.2020).
- [18] American Society for Testing and Materials. "Standard Test Method for Measuring the Filtration Compatibility of Soil-Geotextile Systems". USA, ASTM Standard D5101-12, 2012.
- [19] Yildirim IZ, Prezzi M. "Chemical, mineralogical, and morphological properties of steel slag". *Advances in Civil Engineering*, 2011, 1-13, 2011.
- [20] Hoy M, Horpibulsuk S, Rachan R, Chinkulkijniwat A, Arulrajah A. "Recycled asphalt pavement-fly ash geopolymers as a sustainable pavement base material: Strength and toxic leaching investigations". *Science of the Total Environment*, 573, 19-26, 2016.
- [21] Arulrajah A, Piratheepan J, Ali MMY, Bo MW. "Geotechnical properties of recycled concrete aggregate in pavement sub-base applications". *Geotechnical Testing Journal*, 35(5), 743-751, 2012.
- [22] Cardoso R, Silva RV, Brito de J, Dhir R. "Use of recycled aggregates from construction and demolition waste in geotechnical applications: A literature review". *Waste Management*, 49, 131-145, 2016.
- [23] Karadağ H, Fırat S, Işık NS. "Çelikhane Cürufunun Yol Temel ve Alttemel Malzemesi Olarak Kullanılması". *Journal of Polytechnic*, 23(3), 799-812, 2020.
- [24] Amarasiri S, Muhunthan B. "Pore Structure Models to Predict Hydraulic Conductivity of Recycled Asphalt Pavements". *Journal of Materials in Civil Engineering*, 31(8), 2019.  
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0002778](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002778)
- [25] Mijic Z, Dayioglu AY, Hatipoğlu M, Aydilek AH. "Hydraulic and environmental impacts of using recycled asphalt pavement on highway shoulders" *Construction and Building Materials*, 2020.  
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117226>
- [26] Çakır Ö, Dilbas H. "A comparative analysis of elasticity modulus of recycled aggregate concrete with silica fume" *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences*, 24(6), 1069-1078, 2018.
- [27] Faure YH, Baudoin A, Pierson P, Plé O. "A contribution for predicting geotextile clogging during filtration of suspended solids" *Geotextiles and Geomembranes*, 24(1), 11-20, 2006.
- [28] Türk Standartları Enstitüsü. "İnşaat Mühendisliği İşleri ve Yol Yapımında Kullanılan Bağlayıcısız ve Hidrolik Bağlayıcı Malzemeler İçin Agregalar". Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, Türkiye, TS EN 13242 + A1, 2009.
- [29] Environmental Protection Agency. "A Study of the Use of Recycled Paving Material". U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, USA, 1993.
- [30] Korner RM. *Geotextiles from Design to Application*. Duxford, United States, Elsevier, 2016.
- [31] Korner RM. *Geosynthetics in Filtration, Drainage and Erosion Control*. Pennsylvania, USA, Elsevier, 1992.
- [32] Fischer GR, Maré AD, and Holtz RD. "Influence of Procedural Variables on the Gradient Ratio Test". *Geotechnical Testing Journal*, 22(1), 22-31, 1999.
- [33] Holtz RD. *Geosynthetics R&D-The 'Early' Days (1960s to Circa 1985)*. Holtz University of Washington, Seattle, WA, USA, 1985.
- [34] Kutay ME, Aydilek AH. "Filtration performance of two-layer geotextile systems". *Geotechnical Testing Journal*, 28(1), 79-91, 2005.
- [35] Aydilek AH, Edil TB. "Filtration performance of woven geotextiles with wastewater treatment sludge". *Geosynthetics International*, 9(1), 41-69, 2002.
- [36] Soleimanbeigi A, Edil TB. "Compressibility of recycled materials for use as highway embankment fill." *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2015.  
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0001285](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001285)
- [37] Abbaspour A, Tanyu BF, Aydilek AH, Dayioglu AY. "Methodology to evaluate hydraulic compatibility of geotextile and RCA in underdrain systems". *Geosynthetics International*, 25(1), 67-84, 2018.
- [38] Ryoo SC, Aydilek AH. "Hydraulic compatibility of geotextile-compost systems in landfill covers". *Geosynthetics International*, 27(1), 48-64, 2020.
- [39] Bilgen G, Houlihan M, Ryoo S, Wang Y, Aydilek AH. "Hydraulic and environmental compatibility of RCA with filters and subgrades in highways". *Environmental Geotechnics*, 2020.  
<https://doi.org/10.1680/jenge.20.00040>
- [40] T.C. Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı "Karayolu Teknik Şartnamesi". Karayolları Genel Müdürlüğü, Ankara, Türkiye, 2013.
- [41] American Society for Testing and Materials. "Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregate". Pensilvanya, United States, ASTM C 136-06, 2006.
- [42] American Society for Testing and Materials. "Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System)". Pensilvanya, United States, ASTM D5521-05, 2006.
- [43] American Society for Testing and Materials. "Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils". Pensilvanya, United States, ASTM D 4318-10, 2005.

- [44] American Society for Testing and Materials. "Test Method for Laboratory Compaction Characteristics of Soils Using Standard Effort (12.400 ft-lbf/ft<sup>3</sup> (600 kN-m / m<sup>3</sup>))". Pensilvanya, United States, ASTM D698-12, 2012.
- [45] American Society for Testing and Materials. "Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort (56,000ft-lbf/ft<sup>3</sup> (2,700 kN-m/m<sup>3</sup>))". Pensilvanya, United States, ASTM D1557, 2012.
- [46] American Society for Testing and Materials. "Standard Test Method for California Bearing Ratio test of Lab Compacted Soil". Pensilvanya, United States, ASTM D1883-16, 2016.
- [47] Aydilek AH, Oguz SH, Edil TB. "Digital image analysis to determine pore opening size distribution of nonwoven geotextiles". *Journal of Computing in Civil Engineering*, 16(4), 280-290, 2002.
- [48] Joseph E, Fluet J. *Geotextile Testing and the Design Engineer*. Los Angles, USA, ASTM, 1985.
- [49] Sabiri NE, Caylet A, Montillet A, Coq L, Durkheim Y. "Performance of nonwoven geotextiles on soil drainage and filtration". *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 24(5), 670-688, 2020.
- [50] Bhatia SK, Suits D. "Recent Developments in Geotextile Filters and Prefabricated Drainage Geocomposites: ASTM Special Technical Publication N0. 1281". Industrial Fabrics Association International, 1996.
- [51] Dolez PI, Blond E. "Evaluation of geotextile performance for the filtration of fine-grained tailings". *Geotechnical Frontiers 2017*, Orlando, Florid, USA, 12-15 March 2017.
- [52] Abbaspour A, Tanyu BF, Cetin B. "Impact of aging on leaching characteristics of recycled concrete aggregate". *Environmental Science and Pollution Research*, 23(20), 20835-20852, 2016.