



## Düşük etkili kentleşme uygulaması: Biyotutmanın hidrolojik performansının deneysel modellerle araştırılması

### Low impact development implementation: Investigation on the hydrologic performance of bioretention via experimental models

Sezar GÜLBAZ<sup>1</sup>, Cevza Melek KAZEZYILMAZ-ALHAN<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, İstanbul Üniversitesi, İstanbul, Türkiye.  
sezarg@istanbul.edu.tr, meleka@istanbul.edu.tr

Geliş Tarihi/Received: 14.01.2017, Kabul Tarihi/Accepted: 22.09.2017  
\* Yazışılan yazar/Corresponding author

doi: 10.5505/pajes.2017.54531  
Özel Sayı Makalesi/Special Issue Article

#### Öz

Su kaynaklarının ekonomik, sosyal ve çevresel açıdan en verimli şekilde kullanılması, canlı hayatın sürdürülebilmesi için kaçınılmazdır. Özellikle kentleşme ile birlikte betonlaşma ve buna paralel olarak topraktaki geçirimsiz yüzey artmakta, toprakta meydana gelen sızma azalmakta ve yağış sonucu yüzeyde toplanan fazla su hızlı bir şekilde akışa geçerek taşkına neden olmaktadır. Kentleşme ile beraber toprağa sızamayan su, doğal arıtım olan topraktan mahrum kalmakta ve yüzeyde biriken kirliliği doğrudan su kaynaklarına taşımaktadır. Bu durum su kalitesini olumsuz yönde etkilemekte ve su kirliliğine neden olmaktadır. Bu çerçevede, çevresel sürdürülebilirliğin sağlanması, su kaynaklarının korunması ve kentleşmenin çevre ve su kaynakları üzerindeki olumsuz etkilerinin azaltılması için yeni hidrolojik yöntemlere ihtiyaç duyulmaktadır. Bu çalışma kapsamında, kentleşme sonucu arazi kullanımında meydana gelen değişimler ile artan yüzeysel akış ve su kirliliğini önlemek için Düşük Etkili Kentleşme (DEK) tipi En İyi Yönetim Uygulamaları (EİYU) incelenmiştir. Yüksek yüzeysel akış ve yayılı kirlilik kaynaklarının olumsuz etkilerini azaltmak için kullanılan bir yağmur suyu yönetimi uygulaması ve DEK çeşidi olan "biyotutma" araştırılmıştır. Bu amaçla kurulmuş olan bir deney düzeneği ile biyotutmanın hidrolojik verimliliği ve performansı gözlemlenmiştir. Yapılan deney sonuçları değerlendirilerek biyotutmanın pik debinin azalması üzerine etkisi incelenmiştir. Biyotutma kolonlarında kullanılan malzemelerin mekanik özellikleri incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde malzeme tipi ve özelliklerinin biyotutma kolonlarında suyun tutulmasında etkili olduğu görülmüştür. Kum içeriğinin fazla olması ile kolonlardaki çıkış debisinin arttığı ve ince taneli malzemelerin artması ile azaldığı gözlemlenmiştir.

**Anahtar kelimeler:** En iyi yönetim uygulamaları, Düşük etkili kentleşme, Biyotutma, Taşkın

#### Abstract

Efficient use of water is vital for economic, social and environmental sustainability of water resources. Especially, urbanization and thus high imperviousness results in a decrease in infiltration and percolation. Consequently, surface runoff generated over the surface increases tremendously and results in floods. Surface runoff also washes off the pollutants that are built up on the surface during dry days which results in poor water quality. Therefore, new methods in hydrology are necessary for environmental sustainability, protection of water resources, and mitigation of impacts of urbanization on environment and water resources. In this study, Low Impact Development (LID) Best Management Practices (BMP) are investigated in order to prevent high surface runoff and water pollution due to land use change caused by urbanization. Bioretention, which is a LID type of storm water management practice, is investigated to mitigate impacts of high surface runoff and nonpoint source pollution. For this purpose, an experimental set-up is developed to observe the hydrologic efficiency and performance of bioretention. Performance of bioretention on peak flow decrease is observed by evaluating experimental results. The mechanical properties of materials used in bioretention columns are investigated. It is observed that the material type and properties are effective in retaining water in bioretention. As the sand content increases, the outflow at the exit of the column also increases and if the fine grained material increases, the outflow at the exit of the column decreases.

**Keywords:** Best management practices, Low impact development, Bioretention, Flood

## 1 Giriş

Su kaynaklarının miktar ve kalite açısından yeterli olmaması ve artan nüfus, gelişen sanayi ve tarım faaliyetleri sonucu arazi kullanımında meydana gelen değişiklikler ile ortaya çıkan sorunlar, su kaynaklarının en iyi şekilde yönetilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır. Özellikle orman arazilerinin ve sulak alanların yok olması, tarım, yerleşim ve endüstri alanlarının kontrolsüz ve hızlı gelişimi, su kaynakları için ciddi risk oluşturmaktadır. Su kaynaklarının korunması için havza yönetiminin en iyi şekilde yapılması ve havza veriminin değerlendirilmesi gerekmektedir. Havza yönetimi ile birlikte erozyon, sel ve taşkınların önlenmesi, su kirliliğinin engellenmesi, toplumun ihtiyaçlarını karşılayacak miktar ve kalitede su üretilmesi, havzadaki doğal kaynakların

planlanması kısacası çevresel sürdürülebilirliğin sağlanması için çeşitli çalışmaların yapılması gerekmektedir.

Yağmur suyu yönetimine yönelik uygulamalar 1940'lerden beri dünyada yapılmaktadır. Fakat yapılan bu çalışmalar, genellikle büyük havzalarda ve çoğunlukla taşkın kontrolüne yönelik yönetim çalışmalarıdır. Bununla birlikte özellikle son 20 yıllık dönemde dünyada, kentleşme sonucu kuru havada yüzeyde biriken ve yağış sonucu oluşan yüzeysel akış ile birlikte yıkanıp su kaynaklarına karışan kirliliğin küçük ölçekli bölgelerde önlenmesi için çeşitli çalışmalar başlatılmıştır. Bu çalışmalar ile su miktarının kontrol altına alınarak taşkın gibi olumsuz etkilerinin azaltılması ve su kirliliğinin önlenmesi hedeflenmiştir. Çevre, ekoloji ve mühendislik bilimlerini bir araya getiren ve EİYU arasında olan bu çalışmalar ülkemizde de önem kazanmakta olan çalışmalardır. Doğal ve yapay sulak alanlar, bekletme, dinlendirme ve süzme havuzları,

biyotutmalar, geçirgen kaldırımlar, yağmur suyu depolama hazneleri gibi mühendislik çalışmaları, su kaynaklarının korunması ve sürdürülebilir olması için büyük fayda sağlamaktadır [1]-[4].

Yapılan kapsamlı literatür çalışmasında ülkemizde biyotutma ile ilgili çalışmaya rastlanmamıştır. Dolayısıyla, bu çalışmada bir DEK çeşidi olan biyotutma ile ilgili uluslararası çalışmalar ayrıntılı olarak incelenmiş ve biyotutma ulusal literatüre kazandırılmıştır. Biyotutmanın yerel olarak uygulanabilmesi için kurulmuş olan bir deney düzeneği ile hidrolojik verimliliği araştırılmıştır. Deney düzeneğinde farklı zemin içeriğine sahip 4 adet biyotutma kolonu kullanılarak yerel zemin türünün biyotutmanın hidrolojik performansı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Ayrıca yapılan deneyler ile biyotutmanın verimliliği, farklı yağışlar altında test edilmiştir.

## 2 Düşük etkili kentleşme

DEK, hidrolojik çevrimi korumak, yağmur suyu akışının taşkın ve sel gibi olumsuz etkilerini azaltmak ve yayılı kirlilik kaynaklarının olumsuz etkilerini hafifletmek için tasarlanmış küçük ölçekli yağmur suyu yönetimi uygulamalarıdır [5]-[12]. Biyotutma, bitkisel kanal, geçirgen kaldırım, yeşil çatı ve yağmur tankı gibi uygulamalar DEK teknikleri arasında yer almaktadır. DEK uygulamaları, temelde kentleşme ile birlikte artan geçirimsiz alanların azaltılmasını esas almaktadır. Kentleşme ile beraber yüzeysel akış artmakta ve sızma azalmaktadır. Bu durum sel ve taşkınların artmasına neden olmakta ve dolayısıyla su kalitesini olumsuz etkilemektedir. DEK uygulamaları bu anlamda yüzeysel akış hacmine, pik debiye, akış frekansı ve süresiyle su kalitesine etki etmektedir.

### 2.1 Biyotutma

Biyotutma DEK uygulaması tekniklerinin en önemlilerinden biridir [13]. Bu kapsamda uluslararası literatürde çeşitli deneysel çalışmalar bulunmaktadır [14]-[19]. İlk biyotutma alanı, eğitim amacı ile Maryland'de Fairland Regional Park'ta yapılmıştır. Daha sonra Davis [20] tarafından özellikle ciddi kirlilik birikimi oluşan alışveriş merkezi ve üniversite gibi geniş alana sahip otoparkların çıkışlarında biyotutma kullanılmaya ve test edilmeye başlanmıştır. Biyotutma, esas itibarı ile son yıllarda önemi anlaşılan sulak alanlar gibi su kalitesini arttıran ve suyu tutabilen lokal tasarımı yapılar olması ve estetik açıdan da güzel görünmesi itibarıyla tercih sebebi olmaktadır. Biyotutma bünyesinde fiziksel, kimyasal ve biyolojik arıtım süreçleri bulunmaktadır. Bu süreçler, sedimentasyon, adsorpsiyon, sızma, buharlaşma, terleme, iyon değişimi, biyolojik çürüme, nütrient döngüsü, fitoremediasyon ve biyoremediasyondan oluşmaktadır [21]. Bütün bu mekanizmalar sayesinde biyotutma uygulaması yağmur suyunun tutulmasında ve arıtılmasında büyük fayda sağlamaktadır.

### 2.2 Düşük etkili kentleşmenin taşkın üzerindeki etkisi

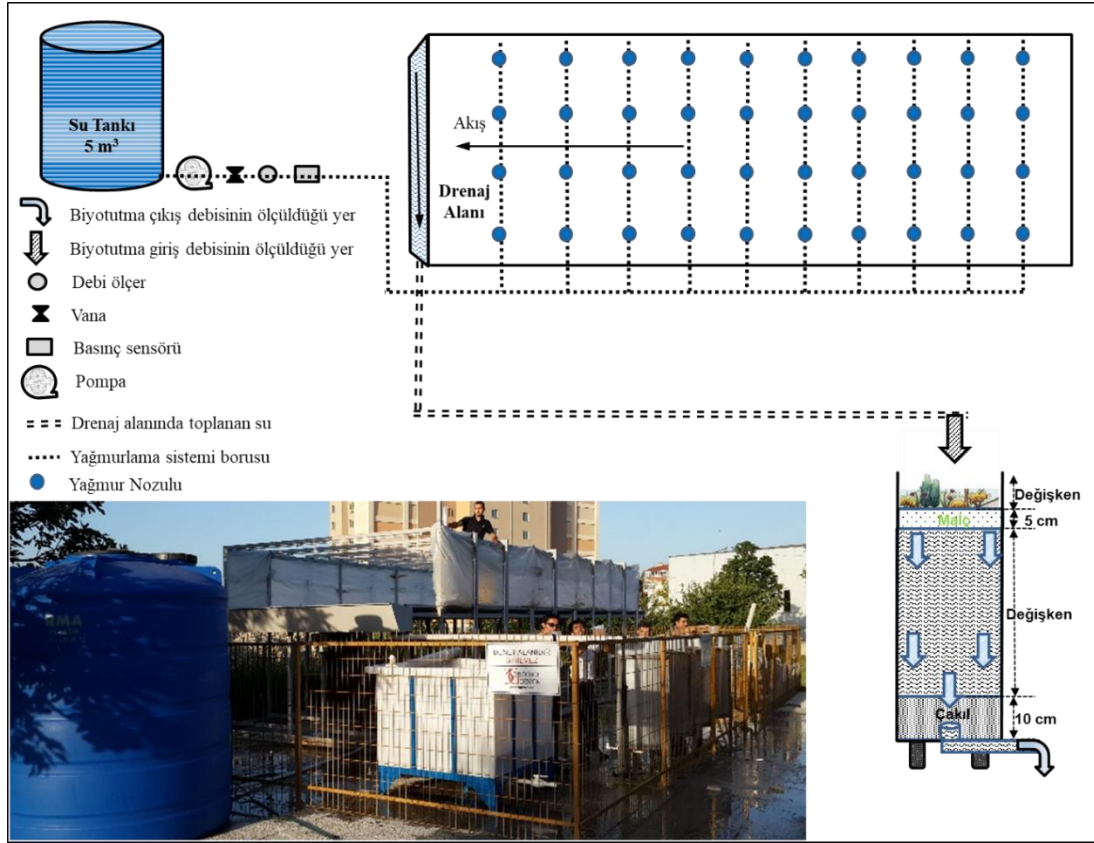
Taşkın ve sel, kontrolsüz yapılaşmalar sonucunda ciddi can ve mal kayıplarına neden olmaktadır. Son 20 yılda ülkemizde 300'den fazla taşkın meydana gelmiş ve yaklaşık 500 kişi hayatını kaybetmiştir. Bununla birlikte ciddi oranlarda maddi kayıplar verilmiştir [22]. Türkiye'de taşkın zararı yılda ortalama 100 milyon dolar ve taşkın yatırımı 30 milyon

dolardır [23]. Sel ve taşkınlar özellikle kentleşme ile birlikte artmakta ve ciddi risk teşkil etmektedir. Bu kapsamda Gülbaz ve Kazezyılmaz-Alhan [24] tarafından yapılan çalışmada arazi kullanımı ve kentleşmedeki artışın yüzeysel akışta meydana getirdiği artış gösterilmiştir. Kentleşme ile beraber artan yüzeysel akışa, taşkın ve sel gibi afetlere maruz kalmadan doğru zamanda müdahale edilmeli ve suyun etkisi azaltılmalıdır. Taşkınlarla önceden müdahale, sadece taşkın yataklarının korunması ve altyapının yeterliliği ile sınırlı değildir. Özellikle kentsel bölgelerde suların sızmasını kolaylaştıracak ve suyu tutabilecek küçük ve büyük ölçekli yapıların yapılması, taşkın ve sel olaylarının engellenmesinde büyük önem arz etmektedir. Bu kapsamda bir DEK uygulaması olan biyotutma, yüzeysel akışın azaltılmasında ve taşkınların önlenmesinde faydalı olmaktadır. Literatürde son yıllarda DEK'in pik debiyi azalttığını ve yüzeysel akışın toplanma süresini arttırdığını gösteren çalışmalar bulunmaktadır [25]-[27]. Lee ve diğ. [28] tarafından yapılan çalışmada kentleşme ile birlikte yüzeysel akış debisinin arttığı ve biyotutma, bitkisel kanal, geçirgen kaldırım, yeşil çatı ve yağmur tankı gibi DEK uygulamalarından sonra debinin azaldığı görülmektedir. Dolayısıyla DEK uygulamaları ile taşkın ve sel riskinin önlenmesine yönelik deneysel ve saha çalışmalarına ağırlık verilmelidir. Bu çalışma ile literatüre bu konuda katkı sağlanması hedeflenmektedir.

## 3 Biyotutma deney düzeneği

### 3.1 Yağış-Havza-Biyotutma sistemi

Yağış-Havza-Biyotutma (YHB) Sistemi İstanbul Üniversitesi Avcılar Kampüsü'nde İnşaat Mühendisliği Bölümü'nün yanında bulunan 150 m<sup>2</sup>'lik bir alana kurulmuştur [32]. Kurulan düzeneğe ait fotoğraf ve şematik gösterim Şekil 1'de görülmektedir (Gülbaz ve Kazezyılmaz-Alhan'dan [27] değiştirilerek alınmıştır). Bu alan 40 adet nozuldan oluşan sentetik yağmurlama sisteminden, 40 m<sup>2</sup> drenaj alanından ve 4 adet biyotutma kolonundan oluşmaktadır. Farklı eğimli drenaj alanlarını test edebilmek için drenaj alanının altına hareket ettirilebilen bir platform kurulmuştur. Kurulan platform ile drenaj alanına %0 ile %1.5 arasında eğim verilebilmektedir. Bu şekilde deney düzeneğinin daha fonksiyonel olması ve ileride yapılacak deneylerde havza eğiminin incelenebilmesine olanak sağlaması hedeflenmiştir. Bu çalışma kapsamında eğim %0.7 olarak alınmıştır. Kurulan sistemde drenaj alanını temsilen 40 m<sup>2</sup> geçirimsiz yüzeyle galvanizli sac levhalar kullanılmıştır. Daha sonra drenaj alanında yapay yağmur oluşturabilmek için drenaj alanından 1 metre yukarıda 10 sıra şeklinde ve toplam 40 adet nozul içeren çelik yapı bir düzenek kurulmuştur. Ayrıca yapay yağmur sisteminde 5 m<sup>3</sup>'lük bir adet su deposu, bir adet pompa, bir adet debi ölçer, 12 adet vana ve PVC borular kullanılmıştır. Kurulan deney düzeneği daha sonraki çalışmalarda gerçek yağmurlar ile çalışmaya olanak sağlayabilmesi amacıyla açık alana kurulmuştur. Yapılan çalışmada deney düzeneğini farklı iki açıdan gören iki adet gece görüş özelliği olan kamera yerleştirilmiştir. Kayıt cihazı ile her iki kameradan elde edilen görüntüler kayıt altına alınmaktadır. Böylece deney sırasında yapılan çalışmalar kamera kaydı ile izlenebilmektedir ve ayrıca deney düzeneğinin güvenliği sağlanmış olmaktadır.



Şekil 1: Yağış-Havza-Biyotutma Sistemi'ne ait fotoğraf ve şematik görünüm.

### 3.2 Biyotutma kolonları

Yapılan çalışmada Şekil 2'de görülen farklı tasarımlara sahip 4 adet biyotutma kolonu kullanılmıştır. Bu kolonlar içerisinde biyotutma tasarım kriterlerine uygun olarak [29]-[31], en altta çakıl ve en üstte malç olacak şekilde farklı oranlarda kum, bahçe toprağı ve torf yerleştirilmiştir (Tablo 1). Ayrıca Tablo 1'de her bir kolon için ölçülen nem oranları verilmiştir. 4 adet biyotutma kolonuna farklı oranlarda zemin ve organik içecek şekilde malzemeler konulmuştur.

Tablo 1: Biyotutma kolonlarının içerikleri [27].

| No | Kum (%)<br>(ağırlık) | Bahçe toprağı (%)<br>(ağırlık) | Torf (%)<br>(ağırlık) | Çakıl (kg) | Malç (kg) | Nem İçeriğı (%) |
|----|----------------------|--------------------------------|-----------------------|------------|-----------|-----------------|
| 1  | 70                   | 30                             | 0                     | 40         | 3.5       | 31              |
| 2  | 70                   | 20                             | 10                    | 40         | 3.5       | 41              |
| 3  | 85                   | 15                             | 0                     | 40         | 3.5       | 18              |
| 4  | 55                   | 45                             | 0                     | 40         | 3.5       | 43              |

Kolonlar dayanıklı polietilen malzemeden yapılmıştır. Kolonların boyu 124 cm, çapı 54 cm'dir. Kolonlar yerden 30 cm yüksekliğe konulmuştur. Böylelikle biyotutmanın çıkışından debi ölçümü rahatlıkla yapılabilmektedir. Drenaj alanından toplanan suyun biyotutma kolonlarına aktarılması için PVC boru kullanılmıştır. Her biyotutma kolonuna bu şekilde PVC boru yerleştirilerek drenaj alanından gelen suyun biyotutma kolonlarının içine akması sağlanmıştır. Bu sistem ile bütün kolonlara aynı anda suyun gelmesi sağlanabildiği gibi diğer 3 kolona kapak kapatılarak sadece bir kolona suyun gelmesi de

sağlanabilmektedir. Bütün biyotutma kolonlarının ortasına açılan deliklere plastik boru ve vana takılarak bir boru ile drene edilmiştir. Saha uygulamalarında drene edilen bu su, doğrudan yağmur suyu toplama kanallarına ya da akarsu veya denize verilebilmektedir. Bu çalışma kapsamında drene edilen su bahçeye akmaktadır [27].

Biyotutma kolonlarına konulan malzemelerin tane boyutlarının belirlenmesi için İstanbul Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Geoteknik Laboratuvarı'nda elek analizi ve hidrometre deneyi Amerikan ASTM standartları kullanılarak yapılmıştır. Bu kapsamda iri taneli zeminler için elek analizi ve ince taneli zeminler için hidrometre analizi deneyleri kullanılmıştır. Bu çalışmada kullanılan malzemelerden yüksek oranda organik içeren ve tane dağılımı olmayan malzemeler (malç ve torf) için granülometri eğrisi elde edilmemiştir. Ayrıca kullanılan çakıl yıkanmıştır. Diğer kullanılan malzemeler için (kum ve bahçe toprağı) elek analizi ve hidrometre deneyi yapılmış, kil, silt, kum ve çakıl oranları belirlenmiştir.

Daha sonra kullanılan malzemelerin organik içerikleri İstanbul Üniversitesi Çevre Mühendisliği Laboratuvarı'nda 550 °C'de kül fırını kullanılarak belirlenmiştir. Son olarak yapılan dört adet biyotutma kolonunun hidrolik iletkenlik değeri ölçülmüştür. Yapılan bu çalışma kapsamında kolonlara ait hidrolik iletkenlik katsayısının doğru tespit edilmesi büyük önem arz etmektedir. Biyotutma uygulamasında kolonlardan çıkan çıkış debisi ve kolonların pik debiyi azaltması hidrolik iletkenlik ile doğrudan ilişkilidir. Hidrolik iletkenlik Darcy kanunu esas alınarak ve sabit permeametre deneyi ile Denklem (1)'de verilen formül ile hesaplanmıştır. Bu kapsamda kolonlar tamamen doygun hale



getirilmiş ve su yüksekliği sabit tutularak kolonlardaki çıkış debisi ölçülmüştür. Daha sonra kolonlardaki su yüksekliği, toprak kalınlığı, kolonların kesit alanı ve çıkış debisi kullanılarak hidrolik iletkenlik hesaplanmıştır.

$$K = \frac{Q}{A} \cdot \frac{L}{H} \quad (1)$$

Burada  $K$  hidrolik iletkenlik ( $L/T$ ),  $Q$  çıkış debisi ( $L^3/T$ ),  $A$  kolona ait kesit alanı ( $L^2$ ),  $H$  su yüksekliği ( $L$ ) ve  $L$  biyotutma kolonundaki toprak kalınlığıdır ( $L$ ).



Şekil 2: Biyotutma kolonlarının görünümü.

### 3.3 Deney düzeneğinin işletimi

YHB deney düzeneği kullanılarak üç adet sabit şiddetli yağış ile deney yapılmıştır. Bunlardan birincisi 50 mm/sa, ikincisi 36 mm/sa ve üçüncüsü 25 mm/sa dir. Tasarım kriterlerinde biyotutma yüzey alanının drenaj yüzey alanının %2-5 arasında bir değer alması gerektiği belirtilmiştir. 54 cm çapındaki her bir biyotutma kolonunun yüzey alanı 0.23 m<sup>2</sup> olduğundan drenaj alanı ile biyotutma yüzey alanı arasındaki oranı sağlayabilmek

için yapılan deneylerde YHB sistemindeki 40 m<sup>2</sup>'lik drenaj alanının 8 m<sup>2</sup>'lik kısmı kullanılmış olup bahsedilen kritere uygun olarak bu oran %2.9 olarak belirlenmiştir.

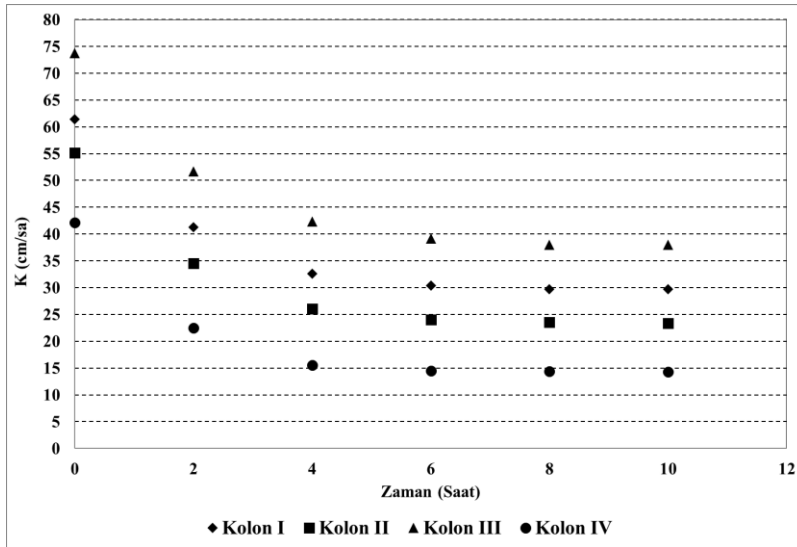
Deney sırasında öncelikle yağış şiddeti ölçülmüş ve drenaj alanı üzerinde 19 dakika boyunca yağış oluşturulmuştur. Yağış başladıktan ve akışa geçtikten sonra biyotutma kolonunun girişinden her 2 dakikada bir debi ölçümü yapılmıştır. Ayrıca kolon çıkışından su gelmeye başladıktan itibaren 180 dakika boyunca debi ölçümü yapılmıştır. Kolon çıkışında ilk anlarda 2 dakikada bir ölçüm yapılırken debinin sabitlenmesinden dolayı 60. dakikadan sonra 4 dakikada bir, 100. dakikadan sonra 10 dakikada bir debi ölçümü alınmıştır. Ölçülen debi değerleri kullanılarak giriş çıkış hidrografları elde edilmiştir.

## 4 Bulgular

### 4.1 Mekanik analizler

Biyotutmada kullanılan malzemeler için tane boyu dağılımı ve organik içerikleri Tablo 2'de sunulmuştur. Biyotutmanın hidrolojik performansı üzerinde önemli bir rol oynayan hidrolik iletkenlik değeri her bir biyotutma kolonu için detaylı olarak incelenmiştir. Sabit seviyeli permeabilite deney düzeneği ile iki saat aralıklarla hidrolik iletkenlik değeri sabitlenene kadar toplam altı adet ölçüm yapılmıştır. Kolonlara ait ölçülmüş olan hidrolik iletkenlik değerleri Şekil 3'te gösterilmiştir.

Şekil 3'te görüldüğü gibi bütün kolonlarda başlangıçta yüksek olan hidrolik değerleri zamanla düşmekte ve daha sonra sabitlenmektedir. Sabitlenen değerler doygun hidrolik iletkenlik değerleri olup birinci kolon için 30 cm/saat, ikinci kolon için 23 cm/saat, üçüncü kolon için 38 cm/saat ve son olarak dördüncü kolon için 14 cm/saat olarak ölçülmüştür.



Şekil 3: Farklı zamanlarda elde edilen hidrolik iletkenlik değerleri.

Tablo 2: Biyotutmada kullanılan malzemelerin tane boyu dağılımı ve organik içerikleri [27].

|               | d <sub>10</sub><br>(mm) | d <sub>60</sub><br>(mm) | d <sub>60</sub> /d <sub>10</sub> | Çakıl<br>(%) | Kum<br>(%) | Silt<br>(%) | Kil<br>(%) | Organik içerik<br>(%) |
|---------------|-------------------------|-------------------------|----------------------------------|--------------|------------|-------------|------------|-----------------------|
| Kum           | 0.27                    | 0.72                    | 2.67                             | 3.04         | 96.79      | 0.17        | 0.00       | 0.86                  |
| Bahçe Toprağı | 0.003                   | 0.32                    | 106.67                           | 5.00         | 48.50      | 37.50       | 9.00       | 6.41                  |
| Çakıl         | -                       | -                       | -                                | 100          | 0          | 0           | 0          | 0.19                  |
| Torf          | -                       | -                       | -                                | -            | -          | -           | -          | 47.37                 |
| Malç          | -                       | -                       | -                                | -            | -          | -           | -          | 67.23                 |

#### 4.2 Yağış-Havza-Biyotutma sistemi sonuçları

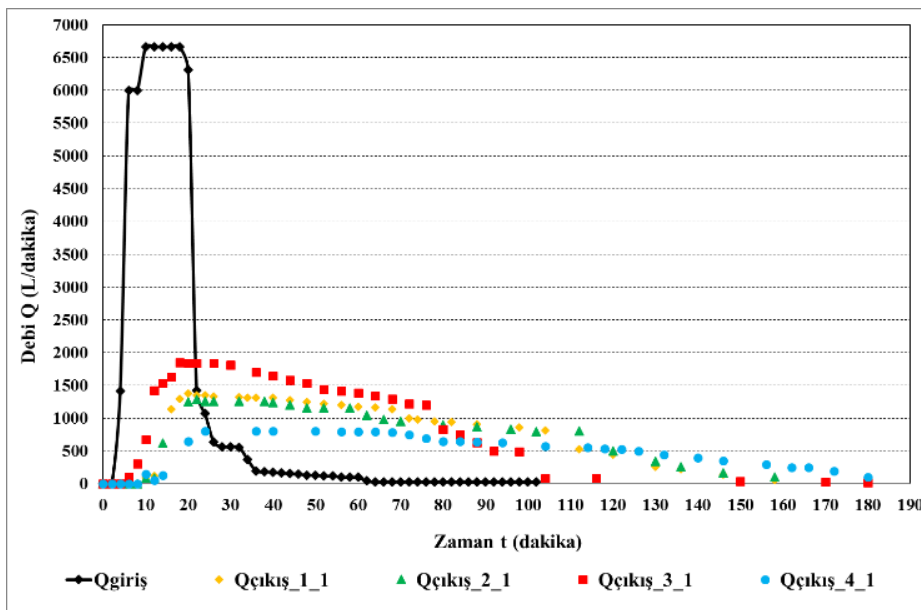
YHB deney düzeneği kullanılarak yağış şiddeti, biyotutma kolonlarına giren ve kolonlardan çıkan debiler, pik debiye ulaşılan süreler ölçülmüştür. Aynı yağış altında dört adet biyotutma kolonundan çıkan pik debiler ve çıkış noktasına varış süreleri kıyaslanmıştır. Tablo 3'te biyotutma kolonlarına farklı yağış şiddeti altında giren ve çıkan suyun 3 saat süresince yapılan ölçümleri görülmektedir. İlk kullanılan yağış şiddeti değeri 50 mm/sa dir. Yapılan bu deneyde yağış süresi 19 dakika olacak şekilde pompa çalıştırılmış ve daha sonra kapatılmıştır. Şekil 4'te kolonlara giren ve çıkan hidrograflar görülmektedir. Drenaj alanından her kolona aynı giriş debisi ulaşmakta olup grafikte Qgiriş olarak gösterilmiştir. Ayrıca birinci yağış için birinci kolonun çıkış debisi "Qçıkış\_1\_1", ikinci kolon için "Qçıkış\_2\_1", üçüncü kolon için "Qçıkış\_3\_1", ve dördüncü kolon için "Qçıkış\_4\_1" olarak ifade edilmektedir. Şekilde görüldüğü gibi 10.-18. dakikalar arasında giriş debisi maksimum değere ulaşmakta ve aynı kalmaktadır. 20. dakikadan sonra giriş debisi azalmaya başlamaktadır. Birinci biyotutma kolonundan çıkan pik debi 1380 L/dakika ve pik debinin görülme zamanı 20. dakikadır. İkinci biyotutma kolonundan çıkan pik debi 1290 L/dakika ve pik debinin görülme zamanı 22. dakikadır. Birinci kolon ile ikinci kolon kıyaslandığında ikinci kolonda pik debinin daha küçük olduğu ve pik debinin çıkışa daha geç ulaştığı görülmüştür. Bu durum, ikinci kolonda kullanılmış olan organik içeriği yüksek olan torf malzemesinin biyotutma tasarımında etkili olduğunu ortaya koymuştur. Buna ek olarak kum içeriği ve hidrolik iletkenliği yüksek olan üçüncü kolon incelendiğinde çıkış debisinin en yüksek ve 1855 L/dakika ve pik debinin görülme zamanı en erken ve 18 dakika olarak gözlemlenmiştir. Kum oranının artması ile hidrolik iletkenliğin ve çıkış debisinin arttığı ve pik debiye ulaşma zamanının küçüldüğü görülmektedir. Son olarak dördüncü kolon incelenmiştir. En küçük çıkış debisi 810 L/dakika ve en yüksek görülme zamanı 24 dakika olarak ölçülmüştür. Bu sonuç, kullanılan malzemelerin tane çaplarının hidrolik iletkenlik, pik debi ve pik debinin görülme zamanı üzerinde etkili olduğunu göstermiştir.

Tane çapı küçüldükçe hidrolik iletkenliğin ve çıkış debisinin azaldığı ve pik debinin görülme zamanının arttığı görülmektedir. Daha sonra bu deneyler sırası ile 36 mm/saat ve 25 mm/saat yağış şiddeti altında ve yine 19 dakika süreyle tekrar edilmiştir (Şekil 5 ve Şekil 6). Ayrıca Tablo 3'te görüldüğü üzere yağış şiddeti azaldıkça giriş debisindeki azalma bütün kolonlarda aynı şekilde azalmaktadır. Çıkış debisindeki azalma ise yüzdeye biriken su miktarındaki azalma ile birlikte azalmaktadır.

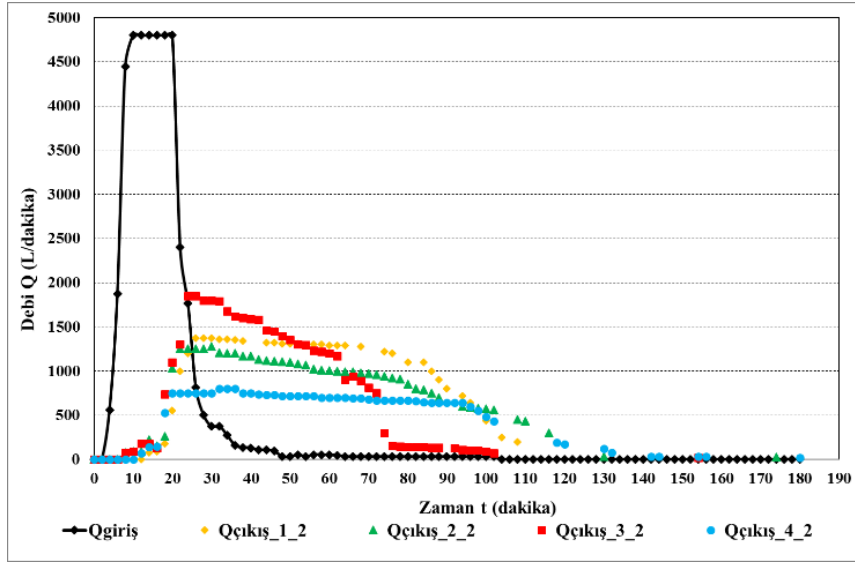
#### 5 Sonuçlar

Bu çalışma ile bir DEK çeşidi olan biyotutmanın ulusal literatüre dahil edilmesi hedeflenmiştir. Bu kapsamda biyotutma (bioretention) Türkçe terminolojiye kazandırılmış, biyotutmanın kullanım maksadı ve kullanım alanları detaylı olarak açıklanmıştır. İstanbul Üniversitesi Avcılar Kampüsü'ne kurulmuş olan YHB deney düzeneği ile biyotutmanın hidrolojik performansı, farklı tasarımı biyotutma kolonları kullanılarak farklı şiddette yağışlar altında test edilmiştir. Biyotutma tasarımında etkin olan hidrolik iletkenlik parametresinin davranışı 4 adet biyotutma kolonu için detaylı olarak incelenmiştir. Literatürde de belirtildiği üzere biyotutmada yerel malzemelerin kullanılıyor olması her bölge için bölgeye ait malzemelerin test edilmesi gerekliliğini ortaya koymaktadır. Dolayısıyla bu çalışma, biyotutmanın yerel kullanımında hidrolojik performansının gözlemlenmesine katkı sağlamıştır.

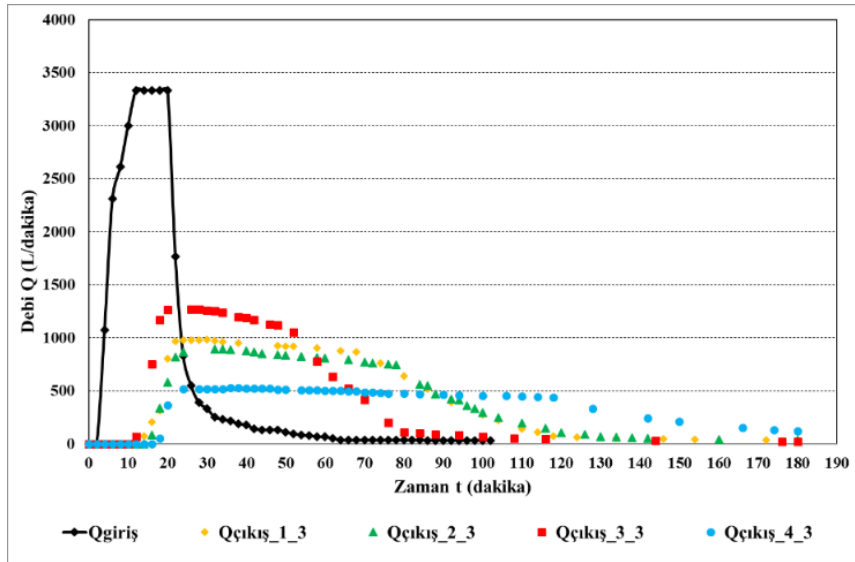
DEK uygulama teknikleri arasında yer alan biyotutma sistemleri yüzeysel akış hacmini, pik debiyi, akış frekansını ve süresini etkilemektedir. Elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde yağmur suyu akışının taşkın ve sel gibi olumsuz etkilerini azaltmak için biyotutma sistemlerinin kullanılabilir bir yöntem olduğu kanaatine varılmıştır. Bu sistemlerin ülkemizde kentleşme sürecinde belediyeler ve özel teşebbüsler tarafından küçük veya büyük ölçeklerde sıklıkla kullanılmasının faydalı olacağı anlaşılmaktadır.



Şekil 4: 50 mm/sa yağış şiddeti ile oluşan giriş ve çıkış hidrograflarının ölçülen değerleri.



Şekil 5: 36 mm/sa yağış şiddeti ile oluşan giriş ve çıkış hidrograflarının ölçülen değerleri.



Şekil 6: 25 mm/sa yağış şiddeti ile oluşan giriş ve çıkış hidrograflarının ölçülen değerleri.

Tablo 3: Yağış-Havza-Biyotutma Sistemi'nde ölçülen değerler.

| Kolon No | Yağış şiddeti i (mm/sa) | Pik giriş debisi Qgiris_pik (L/dak) | Yüzeyle biriken su yüksekliği hp (cm) | Pik giriş debisi zamanı tgiris_pik (dak) | Pik çıkış debisi Qçıkış_pik (L/dak) | Pik çıkış debisi zamanı tçıkış_pik (dak) | Pik değerdeki azalma (%) | Öteleme süresi (dak) |
|----------|-------------------------|-------------------------------------|---------------------------------------|--|-------------------------------------|--|--------------------------|----------------------|
| 1        | 50                      | 6667                                | 29                                    | 8  | 1380                                | 20                                       | 79                       | 12                   |
|          | 36                      | 4800                                | 27                                    | 12                                       | 1370                                | 28                                       | 71                       | 16                   |
|          | 25                      | 3333                                | 18                                    | 12                                       | 980                                 | 30                                       | 71                       | 18                   |
| 2        | 50                      | 6667                                | 29                                    | 8  | 1290                                | 22                                       | 81                       | 14                   |
|          | 36                      | 4800                                | 27                                    | 12                                       | 1280                                | 30                                       | 73                       | 18                   |
|          | 25                      | 3333                                | 18                                    | 12                                       | 890                                 | 32                                       | 73                       | 20                   |
| 3        | 50                      | 6667                                | 27                                    | 8  | 1855                                | 18                                       | 72                       | 10                   |
|          | 36                      | 4800                                | 25                                    | 12                                       | 1850                                | 24                                       | 61                       | 12                   |
|          | 25                      | 3333                                | 13                                    | 12                                       | 1270                                | 26                                       | 62                       | 14                   |
| 4        | 50                      | 6667                                | 29                                    | 8  | 810                                 | 24                                       | 88                       | 16                   |
|          | 36                      | 4800                                | 28                                    | 12                                       | 800                                 | 32                                       | 83                       | 20                   |
|          | 25                      | 3333                                | 20                                    | 12                                       | 525                                 | 36                                       | 84                       | 24                   |

## 6 Teşekkür

Bu çalışma İstanbul Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Yürütücü Sekreterliği'nin 33099 numaralı projesi ile desteklenmiştir. Deney düzeneğinin kurulumu ve ekipman alımı için destek sağlayan İstanbul Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi'ne katkılarından dolayı teşekkür ederiz.

## 7 Kaynaklar

- [1] Jennings DB, Jarnagin, ST. "Changes in anthropogenic impervious surfaces, precipitation and Daily streamflow discharge: A historical perspective in a mid-Atlantic subwatershed". *Landscape Ecology*, 17(5), 471-489, 2002.
- [2] Davis AP. "Field Performance of Bioretention: Hydrology Impacts". *Journal of Hydrologic Engineering*, 13(2), 90-95, 2008.
- [3] Davis AP, Hunt W, Traver R, Clarn M. "Bioretention technology: Overview of current practice and future needs". *Journal of Environmental Engineering*, 135(3), 109-117, 2009.
- [4] Suriya S, Mudgal BV. "Impact of urbanization on flooding: The Thirusoolam sub watershed-A case study". *Journal of Hydrology*, 412, 210-219, 2012.
- [5] Zhang S, Guo Y. "Stormwater Capture Efficiency of Bioretention Systems". *Water Resources Management*, 28(1), 149-168, 2014.
- [6] Gülbaz S, Kazezyılmaz Alhan CM. "Investigating Effects of Low Impact Development on Surface Runoff and TSS with a Calibrated Hydrodynamic Model". *Houille Blanche-Revue Internationale De L Eau*, 3, 77-84, 2014.
- [7] Brown RA, Hunt WF. "Underdrain configuration to enhance Bioretention exfiltration to reduce pollutant loads". *Journal Environmental Engineering*, 137(11), 1082-1091, 2011.
- [8] Trowsdale SA, Simcock R. "Urban stormwater treatment using bioretention". *Journal of Hydrology*, 397 (3-4), 167-174, 2011.
- [9] Li H, Davis AP. "Water quality improvement through reductions of pollutant loads using bioretention". *Journal of Environmental Engineering*, 135(8), 567-576, 2009.
- [10] Davis AP. "Green engineering principles promote low impact development". *Environmental Science and Technology*, 39(16), 338A-344A, 2005.
- [11] Dietz ME. "Low impact development practices: A review of current research and recommendations for future directions". *Water Air Soil Pollution*, 186(1-4), 351-363, 2007.
- [12] Shafique M, Kim R. "Low Impact Development Practices: a Review of Current Research and Recommendations for Future Directions". *Ecological Chemistry And Engineering S-Chemia I Inzynieria Ekologiczna S*, 22(4), 543-563, 2015.
- [13] Coffman L, Green R, Clar M, Bitter S. "Development of Bioretention practices for stormwater management". *20<sup>th</sup> Anniversary Conference-Water Management in the '90s: A Time for Innovation*, Washington, United States of America, 1-5 May 1993.
- [14] Lucas WC, Sample DJ. "Reducing combined sewer overflows by using outlet controls for Green Stormwater Infrastructure: Case study in Richmond, Virginia". *Journal of Hydrology*, 520, 473-488, 2015.
- [15] Olszewski J, Davis A. "Comparing the hydrologic performance of a bioretention cell with predevelopment values". *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 139(2), 124-130, 2013.
- [16] Brown RA, Hunt WF. "Improving bioretention/biofiltration performance with restorative maintenance". *Water Science and Technology*, 65(2), 361-367, 2012.
- [17] Brown R A, Skaggs RW, Hunt WF. "Calibration and validation of DRAINMOD to model bioretention hydrology". *Journal of Hydrology*, 486, 430-442, 2013.
- [18] Haifeng J, Yuwen L, Shaw LY, Yurong C. "Planning of LID-BMPs for urban runoff control: The case of Beijing Olympic Village". *Separation and Purification Technology*, 84 (SI), 112-119, 2012.
- [19] Chen CF, Sheng MY, Chang CL, Kang SF, Lin JY. "Application of the SUSTAIN Model to a Watershed-Scale Case for Water Quality Management". *Water*, 6(12), 3575-3589, 2014.
- [20] Davis AP, Shokouhian M, Sharma H, Minami C, Winogradoff D. "Water Quality Improvement through Bioretention: Lead, Copper, and Zinc Removal". *Water Environmental Resources*, 75(1), 73-82, 2003.
- [21] Nichols P, Lucke T. "Evaluation of the Long-Term Pollution Removal Performance of Established Bioretention Cells". *International Journal of Geomate*, 11(24), 2363-2369, 2016.
- [22] Kadioğlu M. "Küresel İklim Değişimi ve Türkiye". *Sel-Heyelan-Çiğ Sempozyumu*, Samsun, Türkiye, 29-31 Mayıs 2007.
- [23] Özoral E. "Taşkın Koruma Faaliyetlerinde Memba ve Mansap Planlanması ve Yukarı Havza Önlemleri". *Sel-Heyelan-Çiğ Sempozyumu*, Samsun, Türkiye, 29-31 Mayıs 2007.
- [24] Gülbaz S, Kazezyılmaz Alhan CM. "Calibrated Hydrodynamic Model for Sazlıdere Watershed in Istanbul and Investigation of Urbanization Effects". *Journal of Hydrologic Engineering*, 18(1), 75-84, 2013.
- [25] Jia H, Lu Y, Yu SL, Chen Y. "Planning of LID-BMPs for urban runoff control: The case of Beijing Olympic Village". *Separation and Purification Technology*, 84(SI), 112-119, 2012.
- [26] Tillinghast ED, Hunt WF, Jennings GD. "Stormwater control measure (SCM) design standards to limit stream erosion for Piedmont North Carolina". *Journal of Hydrology*, 411(3-4), 185-196, 2011.
- [27] Gülbaz S, Kazezyılmaz Alhan CM. "Experimental Investigation on Hydrologic Performance of LID with Rainfall-Watershed-Bioretention System". *Journal of Hydrologic Engineering*, 22(1), D4016003, 2017.
- [28] Lee J, Hyun K, Choi J, Yoon Y, Geronimo, FKF. "Flood reduction analysis on watershed of LID design demonstration district using SWMM5". *Desalination and Water Treatment*, 38(1-3), 326-332, 2012.
- [29] Hsieh C, Davis AP. "Evaluation and Optimization of Bioretention Media for Treatment of Urban Storm Water Runoff". *Journal of Environmental Engineering*, 131(11), 1521-1531, 2005.

- [30] Prince George's County Department of Environmental Resources (PGDER), Design Manual for Use of Bioretention in Storm water Management. Division of Environmental Management, Watershed Protection Branch. Landover, MD, 1993.
- [31] Allen TP. "Bioretention Design under the 2009 Drainage Design and Erosion Control Manual". Volume V – Stormwater BMPs. Drainage Manual Thurston County Water Resources Division Resource Stewardship Department, 2010.
- [32] Gülbaz S. Yağış-Havza-Biyotutma Sisteminin Hidrolojik-Su Kalitesi Modellemesi ve Deneysel Olarak İncelenmesi. Doktora tezi, İstanbul Üniversitesi. İstanbul, Türkiye, 2015.