

## Yeşil Altyapı Sistemlerinin Hidrolojik/Hidrolik ve Su Kalitesi Modeli ile Performansının İncelenmesi: İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa Büyükçekmece Kampüsü Örneği

Orkun Aydın<sup>1</sup> , Selin Emir<sup>1</sup> , Selen Emir<sup>1</sup> , Ecem Güney<sup>2</sup> , Elif Naz Coşkun<sup>2</sup> , Zeynep Aydın<sup>2</sup> , Ecem Yıldız<sup>1</sup> , Yasemin Kaya<sup>2</sup> , Sezar Gülbaz<sup>1\*</sup> 

<sup>1</sup> İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, İstanbul, Türkiye

<sup>2</sup> Çevre Mühendisliği Bölümü, İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, İstanbul, Türkiye

\*sezarg@iuc.edu.tr

### Özet

Yoğun kentleşme, yüzeysel akış miktarının artmasına, yüzeyde toplanan suyun kirlenmesine ve bunun sonucunda su kalitesinin azalmasına neden olmaktadır. Bu olumsuz etkilerin azaltılması için Yeşil Altyapı Sistem bileşenleri kullanılmaktadır. Yeşil Altyapı Sistemleri yüzeysel akışın pik debisini ve miktarını azaltan, aynı zamanda kirlenici konsantrasyonunu düşürerek su kalitesini iyileştiren doğal yöntemlerdir. Özellikle, kentsel alanlarda yağmur suyu özelinde uygulanan yeşil altyapı uygulamaları aynı zamanda Düşük Etkili Kentleşme (DEK) uygulamaları olarak isimlendirilmektedir. Bu çalışma kapsamında, DEK uygulamalarının yüzeysel akış miktarına ve su kalitesine etkisi incelenmiştir. Bu çerçevede ilk olarak Çevre Koruma Kuruluşu Yağmur Suyu Yönetim Modeli (EPA-SWMM) bilgisayar programı kullanılarak İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa Büyükçekmece Kampüsü'ne ait hidrolojik-hidrolik ve su kalitesi modeli oluşturulmuştur. DEK uygulamalarının bulunduğu ve bulunmadığı modeller karşılaştırılarak, yeşil altyapı sistemlerinin yüzeysel akış debisini azaltmadaki, su kalitesini iyileştirmedeki performansı incelenmiştir. Karşılaştırma sonucunda çalışma alanına tanımlanan DEK uygulamalarının, toplam yüzeysel akış miktarını ve pik debiyi azalttığı görülmüştür. Ayrıca, modele tanımlanan DEK uygulamalarının yüzeysel akıştaki kirlenici yüklerini ve pik konsantrasyonlarını azaltmada etkili olduğu sonucuna varılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Düşük etkili kentleşme, Yeşil altyapı sistemleri, Epa-Swmm, Hidrolojik/Hidrolik model, Su kalitesi modeli, Taşkın, Yüzeysel akış

## Investigation of the Green Infrastructure Performance via Hydrologic/Hydraulic and Water Quality Model: A Case Study of Istanbul University-Cerrahpaşa Büyükçekmece Campus

### Abstract

Heavy urbanization leads to an increase in surface runoff volume, the pollution of collected surface water, and consequently a decline in water quality. Green Infrastructure System components are used to mitigate these adverse effects. Green Infrastructure Systems are nature-friendly methods that decrease peak discharge and surface runoff quantity as well as improving water quality by decreasing pollutant concentrations. These implementations, which lessen the impacts of urbanization, are called Low Impact Development (LID). In this study, the effects of LID implementations on surface runoff quantity and water quality are examined. In this context, the Environmental Protection Agency Storm Water Management Model (EPA-SWMM) was utilized to develop the hydrologic-hydraulic and water quality model for the Istanbul University-Cerrahpaşa Büyükçekmece Campus. By comparing models with and without LID applications, the performance of green infrastructure systems in reducing surface runoff discharge and

improving water quality was investigated. The comparison revealed that the LID implementations defined for the study area reduced the total surface runoff volume and peak discharge. Additionally, it was concluded that the LID implementations defined in the model were effective in reducing pollutant loads and peak concentrations in surface runoff.

**Keywords:** Low impact development, Green infrastructure systems, Epa-Swmm, Hydrologic/Hydraulic model, Water quality model, Flood, Surface runoff

## 1. GİRİŞ

Nüfusun ve sanayi faaliyetlerinin artmasından dolayı dünyada ve ülkemizde kullanılabilir su miktarı giderek azalmaktadır ve su kaynaklarının kirlenme oranı artmaktadır. Suyun kullanımı ve tasarrufu önem kazanmakta olup yeni stratejilerle verimli ve bilinçli su kullanımı ile su kaynaklarının en iyi şekilde yönetilmesi gerekmektedir [1]. Bu kapsamda yağmur suyu hasadına yönelik sistemler sürdürülebilir bir yaklaşım olarak değerlendirilebilir [2, 3]. Yağmur sularının geri kazanılıp yeniden kullanılması, temiz su kaynaklarının tükenmesini önlemeye ve yüzeysel akış hacminin kirlenmeden toplanmasını sağlayarak atıksu oluşumunu azaltmaya yönelik önemli faydalar sağlamaktadır. Modern su arıtma teknolojisinin gelişmesiyle birlikte temiz kaynak olarak kabul edilen yağmur suyu birçok kişi tarafından zamanla tanınmaya başlanmıştır ve yağmur suyu toplama ve yeniden kullanım sistemleri yaygınlaşmıştır [4]. Yağmur suyu hasadı, su tasarrufu sağlamak amacıyla; evsel, endüstriyel, tarımsal ve çevresel amaçlı talepleri karşılamak için yağmur suyunun toplanması ve kullanılması olarak tanımlanmaktadır. Başta konut çatıları olmak üzere, yollar, kaldırımlar ve otoparklar gibi açık alanlardan borularla toplanan yağmur suları filtrelendikten sonra depoya alınmakta ve depolanan su; bahçe sulama, araç yıkama, temizlik işleri vb. ihtiyaçlar için kullanılabilir [5]. Artan endüstrileşme ve şehirleşme; doğal su kaynaklarının, yeşil alanların işgal edilmesini ve geçirimsiz alanların çoğalmasını beraberinde getirmiştir. Bununla birlikte, artan geçirimsiz alanlar yağmur sularının toprağa sızmasını zorlaştırmıştır [6]. Geçirimsiz yüzeyler üzerinde yağışın hızla yüzeysel akışa dönüşmesi özellikle kentsel alanlarda sel ve taşkınlara neden olmaktadır. Ayrıca, kentsel alanlarda, yüzeyde oluşan kirliliği yıkayarak su kaynaklarına taşımakta ve su kaynaklarının kirlenmesine neden olmaktadır. Bundan dolayı, kentsel alanlarda yağış sonucu oluşan yüzeysel akışın toplanması ve çeşitli mühendislik modelleriyle yönetilmesi önemlidir [7, 8]. Yeşil Altyapı Sistemlerinde, kentleşmiş bölgelerde su kalitesini iyileştirmek ve yüzeysel akışı azaltmak amacıyla uygulanan Düşük Etkili Kentleşme (DEK) uygulamaları sürdürülebilir bir yaklaşım sunmaktadır. Bu uygulamalar, yağmur suyunun toplanması ve ileriki süreçlerde arıtılması ile yeniden kullanıma olanak sağlamaktadır.

Bu çalışma kapsamında Çevre Koruma Kuruluşu Yağmur Suyu Yönetim Modeli (EPA-SWMM) bilgisayar programı kullanılarak, İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa Büyükçekmece Kampüsü'nün yağmur suyu modeli oluşturulmuştur. Daha sonra, oluşturulan modele DEK uygulamaları entegre edilmiştir. Düşük yoğunluklu yerleşim yeri, yüksek yoğunluklu yerleşim yeri, ticari alan, karayolu olmak üzere dört farklı arazi kullanımı modele tanımlanmıştır. Ayrıca, modele su kalitesini tanımlamak amacıyla Biyokimyasal Oksijen İhtiyacı (BOİ), Askıda Katı Madde (AKM), Kurşun (Pb) ve Toplam Kjeldahl Azotu (TKN) kirletici olarak tanımlanmıştır. Kirleticilere ait biriktirme ve yıkanma parametreleri modele girilmiştir. Kampüste bulunan binaların, yeşil alanların ve kaldırımların yerleşimlerine göre; yeşil çatı, biyotutma, geçirimli kaldırım, yağmur bahçesi, yağmur suyu toplama deposu, sızma hendeği olmak üzere altı farklı DEK uygulaması modele entegre edilmiştir. DEK uygulamalarının bulunduğu ve bulunmadığı modellerden alınan hidrograflar ve polutograflar karşılaştırılarak, DEK uygulamalarının yüzeysel akış miktarı ve su kalitesi üzerindeki etkileri incelenmiştir.

## 2. MATERYAL VE YÖNTEM

### 2.1 EPA-SWMM Yağmur Suyu Yönetim Modeli

EPA-SWMM bilgisayar programı, kentsel drenaj sistemlerinde yüzey akışlarını ve kalitesini modellemek amacıyla Amerika Birleşik Devletleri Çevre Koruma Ajansı (US EPA) tarafından geliştirilen ücretsiz ve

açık kaynaklı bir yazılımdır [9]. Model, kentsel alanlarda drenaj sistemleri ile ilgili planlama, analiz ve tasarım için yaygın olarak kullanılmaktadır [10]. Ayrıca, EPA-SWMM programı, bir havza sistemi içindeki her bir alt havza alanında oluşan yüzeysel akış miktarını ve kalitesini, ayrıca her bir boru ve kanalda oluşan akış hızını, derinliğini ve kirletici konsantrasyonunu hesaplar [11]. EPA-SWMM programına sağlanan girdiler arasında yağış şiddeti, havzanın alanı, havzadaki geçirimsiz alan yüzdesi, boru ve kanalların uzunluğu, genişliği ve kesiti gibi bilgiler yer almaktadır. Programın çıktıları arasında; debinin zaman içindeki değişimi (hidrograf), havzanın hidrodinamik değişkenleri ve kirletici konsantrasyonunun zaman içindeki değişimi (pollutograf) gibi veriler yer alır [12].

EPA-SWMM içerisinde yapılan akış hesapları, kütle, momentum ve enerji korunumu prensiplerine dayanır. Yüzeysel akışı hesaplarken, yağış ve havza girişindeki su kaynakları giriş debisini, sızma, buharlaşma ve yüzeysel akış ise çıkış debisini oluşturur. Boru ve kanallarda akımı ötelemek için üniform akım, kinematik ve dinamik dalga öteleme seçenekleri vardır. Üniform akım en basit öteleme metodudur ve debi ile derinlik arasındaki ilişki Manning denklemi ile verilir. Kinematik dalga denklemi ise momentum denkleminde bulunan basınç değişimi ve ivme terimlerinin ihmal edilerek yazılmış halidir. Dinamik dalga ile ötelemede ise St. Venant denklemleri olarak bilinen denklem takımı çözülerek elde edilir. EPA-SWMM programında sızma hesabı için Entegre Horton Metodu, Green-Ampt Metodu veya SCS Eğri-Numarası Metodu olmak üzere üç farklı opsiyon vardır [13].

## 2.2 İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa Büyükçekmece Kampüsü Alanı

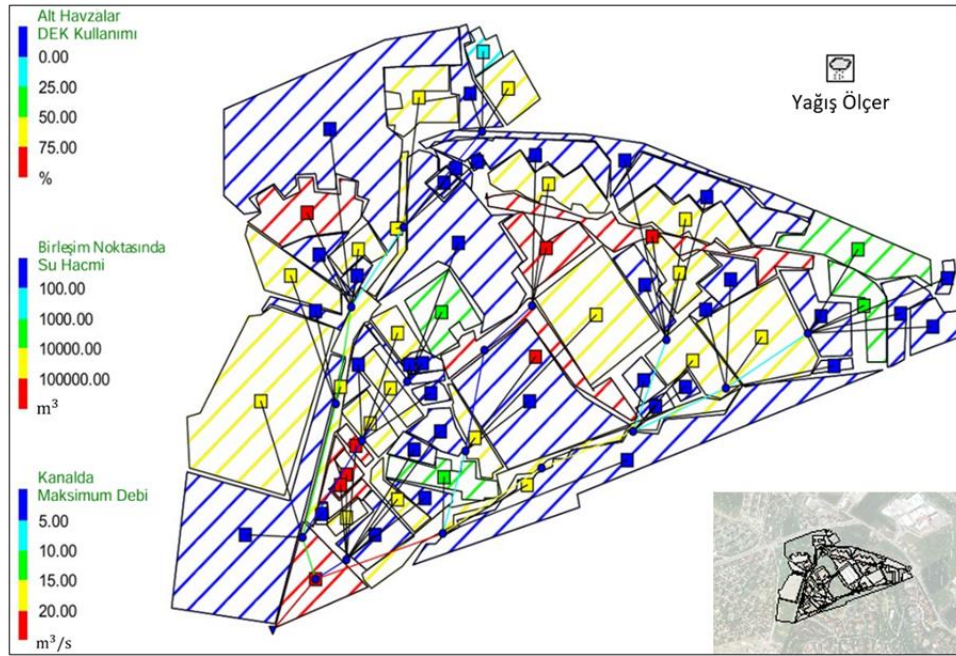
İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa Büyükçekmece Kampüsü, İstanbul'un Avrupa Yakası'nda yer almaktadır (Şekil 1). Kampüs, 41°05'26.50" kuzey enlemi ve 28°37'14.25" doğu boylamı ile tanımlanan bir konumda bulunmaktadır. Kampüs alanı yaklaşık 18 hektardır. Kampüste; dört fakülte, iki yüksekokul, iki enstitü, uygulama ve araştırma merkezi, kız öğrenci yurdu, jeoloji müzesi, merkez kütüphanesi, otopark ve kafe/restoranların bulunduğu bir alan bulunmaktadır.



Şekil 1. İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa Büyükçekmece Kampüsü konumu (Google Earth).

### 2.3 Hidrolojik-Hidrolik ve Su Kalitesi Modelin Oluşturulması

EPA-SWMM bilgisayar programında Büyükçekmece Kampüs alanının hidrolojik ve hidrolik modeli, İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa Yapı İşleri Daire Başkanlığı'ndan temin edilen topografik harita ve yerleşim planı kullanılarak yapılmıştır. Kampüsün hidrolojik-hidrolik modeli oluşturulurken benzer bölgeler bir alt havza oluşturacak şekilde 68 alt havzaya (subcatchments) bölünmüştür. Örneğin bir yapıya ait çatı alanı, otopark alanı veya benzer şekilde bina etrafında yer alan yeşil alan bir bütün olarak alt havza şeklinde oluşturulmuştur. Daha sonra modele bir adet yağış ölçer, 18 bağlantı noktası (junction) ve 18 kanal (conduit) tanımlanmıştır. Hidrolojik-Hidrolik modelin oluşturulması için, EPA-SWMM bilgisayar programına çalışma alanının arka plan görüntüsü yüklenmiştir. Bu görüntü kullanılarak alt havzalar oluşturulmuştur. Alt havzalar üzerinde yağış sonrası oluşan yüzeysel akış sularının toplandığı bağlantı noktaları ve mevcut altyapı hatlarının güzergahları esas alınarak bağlantı kanalları oluşturulmuştur. Bağlantı noktaları, Havza Modelleme Sistemi (WMS) programından elde edilen havzaya ait eğim, havza sınırı ve alan verileri dikkate alınarak, suyun akış yönüne göre eklenmiştir. Topografik harita kullanılarak yükselti değerleri girilmiş ve modele kanallar eklenmiştir. Ayrıca, alt havzalara ait eğim, alan, genişlik değerleri WMS'den alınarak EPA-SWMM programına aktarılmıştır. Ek olarak, kanal uzunlukları, kanal birleşim noktalarının yükselti değerleri topografik harita kullanılarak elde edilmiş ve EPA-SWMM programına tanımlanmıştır. Oluşturulan düğüm noktaları, kanallar ile birleştirilerek çıkış, mansap noktasına ulaştırılmıştır (Şekil 2).

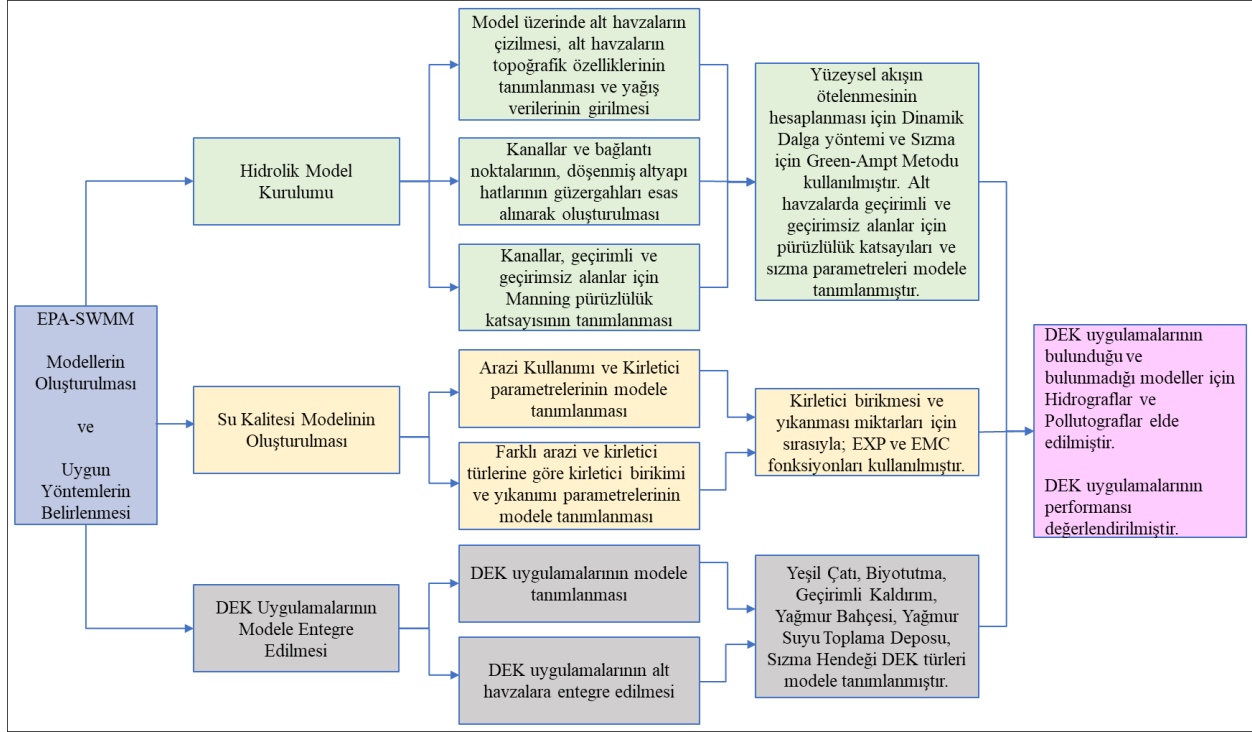


Şekil 2. Çalışma havzası EPA-SWMM bilgisayar programı görüntüsü

Simülasyonlar için geçmiş yıllarda İstanbul'da meydana gelen şiddetli bir yağış seçilmiştir. Bu kapsamda, Florya Meteoroloji İstasyonu'ndan 09-12 Temmuz 1995 tarihleri arasında meydana gelen şiddetli yağışa ait saatlik yağış verileri alınmış ve modele tanımlanmıştır. Hidrolik modelde yüzeysel akışın ötelenmesinin hesaplanması için Dinamik Dalga yöntemi ve hidrolojik modelde havzada meydana gelen sızma miktarı Green Ampt yöntemi kullanılarak hesaplanmıştır [14, 15]. Sızma denkleminde yer alan hidrolik iletkenlik (hydraulic conductivity) ve toprağın emme basınç yükü (suction head) değerleri sırası ile 6.66 mm/sa ve 169 mm olarak havzanın zemin tipine uygun olarak seçilmiştir [16, 17]. Manning pürüzlülük katsayısı; geçirimli alanlar için 0.1, geçirimsiz alanlar için 0.01 ve kanallar için 0.02 alınarak programa girilmiştir [14, 18]. EPA-SWMM bilgisayar programında su kalitesi modelini geliştirmek amacıyla; kirlilik birikim (buildup) miktarını hesaplamak için eksponansiyel (EXP) fonksiyon ve yüzeysel akış ile yikanarak



(washoff) yüzey suyuna karışan kirletici miktarını hesaplamak için akış-yüklü ortalama konsantrasyon (EMC) fonksiyonu kullanılmıştır. Modele ait akış şeması Şekil 3’te verilmiştir. Parametreler, farklı arazi tiplerindeki, dört farklı kirletici tipine göre değer almaktadır. Yüzeysel akıştaki kirletici parametreleri literatürdeki değerler [9, 13, 19, 20, 21, 22] dikkate alınarak su kalitesi modeline girilmiştir.



Şekil 3. EPA-SWMM modeli akış şeması

## 2.4 Düşük Etkili Kentleşme Uygulamalarının Modele Tanımlanması

İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa Büyükçekmece Kampüsü’ne EPA-SWMM bilgisayar programı üzerinde altı farklı DEK uygulaması tanımlanmıştır. Bu tanımlanan uygulamalardan, yeşil çatı; yapı kapsamında izolasyonu ve enerji verimliliğini artırma amacıyla, ısıtma ve soğutma maliyetlerini düşürme yönünde ortaya çıkan bir DEK uygulamasıdır. Toplumsal ve çevresel yararları en üst düzeye çıkarmak için tasarlanmış ve tüm yüzeyi su geçirmez bir membran ile kaplanmış, bitki örtüsü tabakası eklenmiş çatılardır [23]. Sızma hendeği; çoğunlukla sulak alan olarak işlev görerek yağmur suyunu hasat etmek amacıyla kırsal ve kentsel bölgelerde kullanılmaktadır, yer altı su seviyesinin yüzeye yakın olduğu bölgelerde inşa edilmektedir [24]. Biyotutma; yüzeysel suların toprağa sızmasını sağlayarak akışı azaltma amacıyla yerel bitkiler içeren küçük çöküntü alanlarının oluşturulduğu DEK uygulamasıdır. Fiziksel, kimyasal ve biyolojik arıtım süreçleri bulunmaktadır [2, 25]. Yağmur suyu toplama deposu; toplu konut ve benzeri yapılarda çatı sularının hasadı için yağmur suyu biriktirmeye yarayan uygulamalardır [26]. Yağmur bahçesi; yağmur suyunun toplanması amacıyla toprakta boşluklu yapı oluşturulup geçirgen malzemelerle doldurma uygulamasıdır. Geçirgen alanın üzerine bitkilerin ekilmesi ve malç kullanımı ile tamamlanan, su tutma kapasitesi yüksek bir uygulamadır [27]. Geçirimli kaldırım; şiddetli yağışın yüzeysel akışa dönüşme oranını azaltmak amacıyla bağlantılı boşluklardan yağmur suyunun sızmasına olanak sağlayan geçirimli malzemeden yapılmaktadır. Sağladığı drenajla su kaynaklarının azalması ve kirlenmesinin önüne geçilmesine yönelik faydalı bir uygulamadır [28].

DEK uygulamalarını içeren toplam alan 50614 m<sup>2</sup>’dir. Bu alan, toplam kampüs alanının %28,1’ini oluşturmaktadır. Yeşil çatı uygulaması; bina yapısı itibarıyla uygun olan İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa

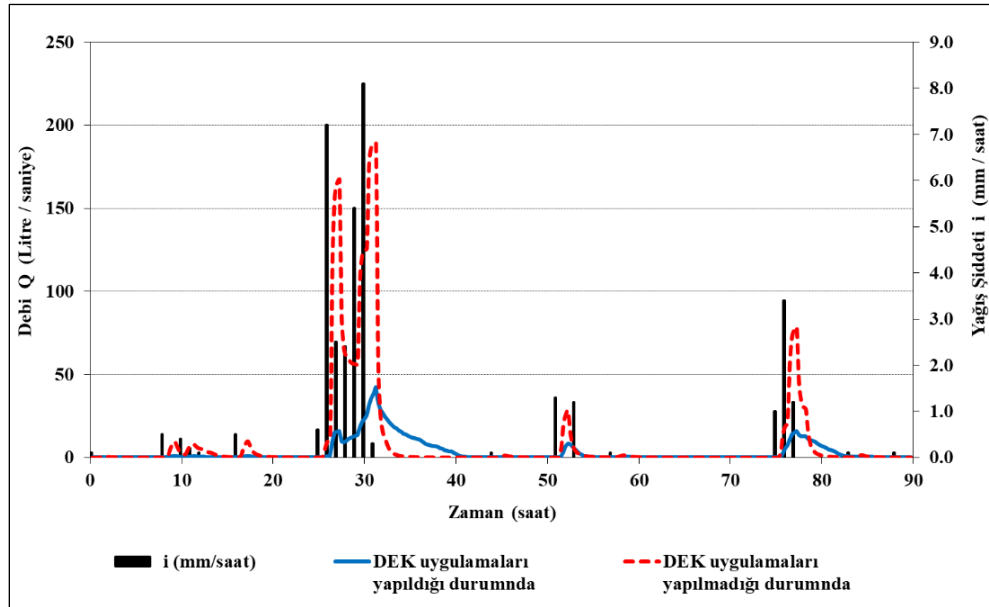
Veteriner Fakültesi, Adli Tıp ve Adli Bilimler Enstitüsü, İstanbul Üniversitesi 15 Temmuz Şehitleri Öğrenci Yurdu başta olarak, 20 adet betonarme yapıyı kapsayacak şekilde toplam 18510 m<sup>2</sup> alana uygulanmıştır.

Mevcut bir yapıya makul seviyenin üzerinde yük getirilmemesi amacıyla toprak kalınlığı 15 cm olarak belirlenmiştir. Bir diğer DEK tipi olan biyotutma uygulaması 850 m<sup>2</sup>'lik alanda uygulanmıştır. Biyotutma uygulaması; 100 cm toprak derinliği, 50 cm bitki örtüsü yüksekliği olacak biçimde tasarlanmıştır. Kampüs içindeki yolların geçirimli olarak yenilenmesi planlanmış ve modele entegre edilmiştir. Geçirimli yol ve kaldırımlar saatte 150 mm su geçirimliliği sağlayacak ve alt katmanında 25 cm kalınlığında geçirimli olmasını sağlayacak zemin özelliklerine sahiptir. Geçirimli kaldırım DEK uygulamasının toplam alanı 22754 m<sup>2</sup>'dir.

Sızma hendeği uygulaması, Veteriner Fakültesinin ön tarafında bulunan araç ve yaya yolu üzerindeki 4200 m<sup>2</sup>'lik alana uygulanmıştır. Uygulama kolaylığı amacıyla ve çevre bitki örtüsünün incelenmesi sonucunda, bu yapının hem derinliği 50 cm hem de bitki örtüsü yüksekliği 50 cm olacak biçimde modele girilmiştir. Yağmur suyu toplama deposu uygulaması toplam 3300 m<sup>2</sup>'lik alana tanımlanmıştır. Bir deponun yüksekliği 2,5 m olarak planlanmıştır. Tanımlanan altıncı DEK uygulaması olan yağmur bahçesi, büyük yeşil alanlarda tanımlanmıştır. Yağmur bahçesi uygulamasının toplam alanı 1000 m<sup>2</sup>'dir. Derinliği 50 cm ve bitki örtüsü yüksekliği 50 cm olacak biçimde tanımlanmıştır.

### 3. BULGULAR

İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa Büyükçekmece Kampüs alanı için kurulan model temelinde; DEK uygulamalarının bulunduğu ve bulunmadığı iki model karşılaştırılmıştır. Şekil 4'teki hiyetografa görüldüğü gibi, 26-30 saat aralıklarında şiddetli yağış gerçekleşmiştir. Yağış sonrasında, 31. saatte, havza çıkış noktasında pik debisi 189,28 L/s'ye varan yüzeysel akış debisi hidrograf üzerinde görülmüştür. DEK uygulamaları sonucunda ise yüzeysel akış pik debisi 42,36 L/s'ye düşmüştür. Uygulamalar sonucu pik debideki azalma %77,62, yüzeysel akış hacmindeki azalma %90,97 olarak hesaplanmıştır (Tablo 1).

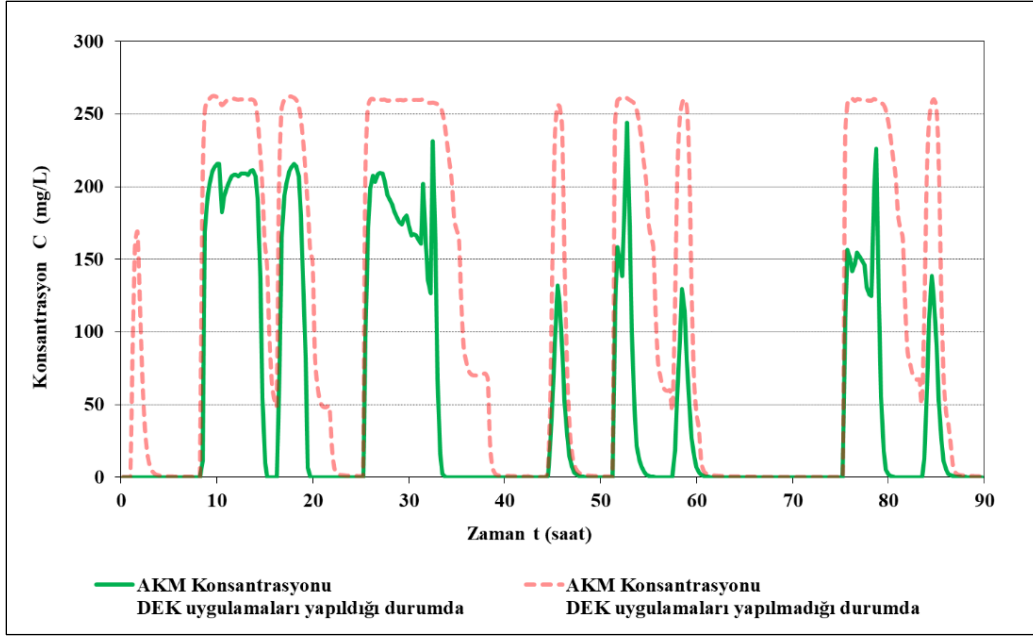


Şekil 4. 9-12 Temmuz 1995 tarihleri arasında oluşan yağışın hiyetografı ve DEK uygulamaları yapıldığı ve yapılmadığı durumlardaki yüzeysel akış hidrografı

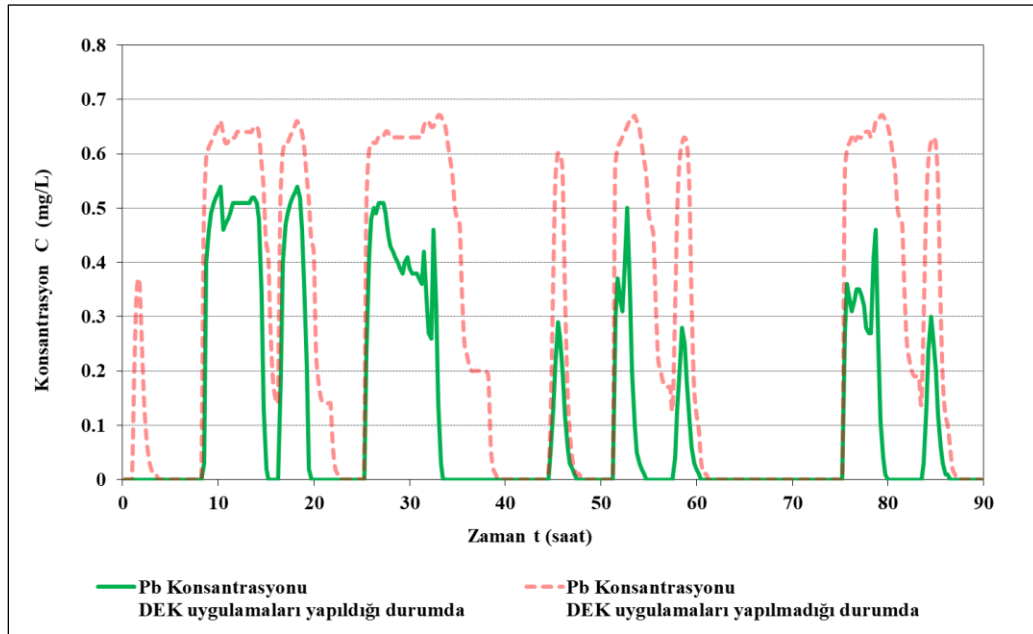
DEK uygulamaları bulunan ve bulunmayan modellerdeki konsantrasyon-zaman değişim grafikleri (pollutograf) Şekil 5, 6, 7 ve 8'de verilmiştir. DEK uygulamaları, 18 hektarlık havzanın %28,1'ine denk gelmektedir, su kalitesi modeli AKM, Pb, BOİ ve TKN olmak üzere farklı kirletici tiplerine göre

geliştirilmiştir. Altı farklı DEK uygulamasının birleşik etkileriyle, kirletici konsantrasyonlarının pik değerlerindeki düşüş %7,01 ile %19,40 arasında ve toplam kirletici yükü miktarlarında olan azalma %84,55 ile %86,00 arasında bulunmuştur.

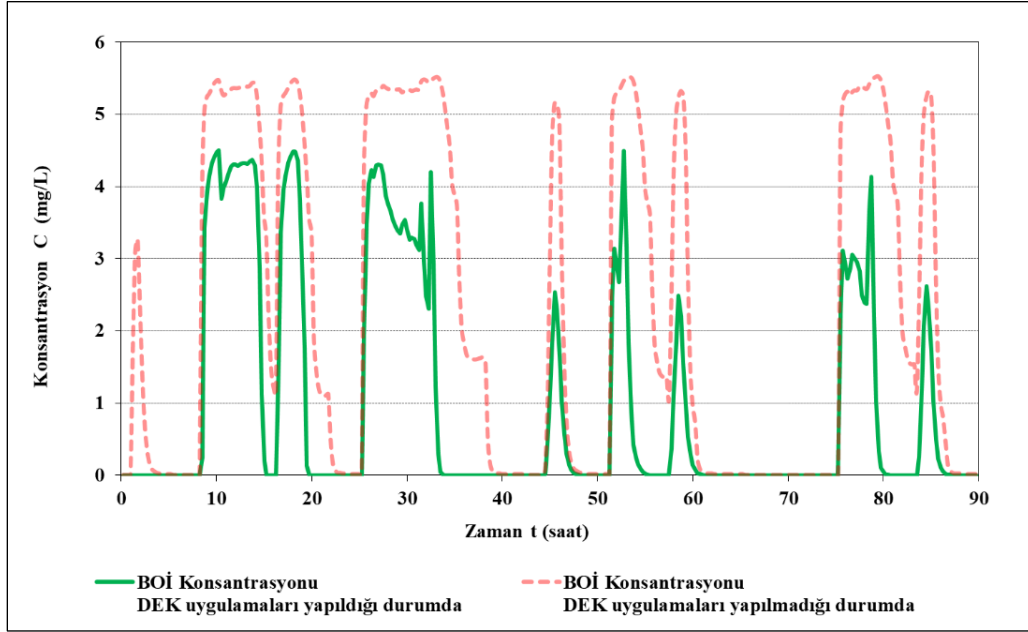
Bulgular sonucunda Tablo 1 ve 2’de yapılan karşılaştırmalar ile; Yeşil Altyapı Sistem bileşenlerinin yüzeysel akış miktarını düşürmedeki ve su kalitesini iyileştirme yönündeki performansı gösterilmiştir.



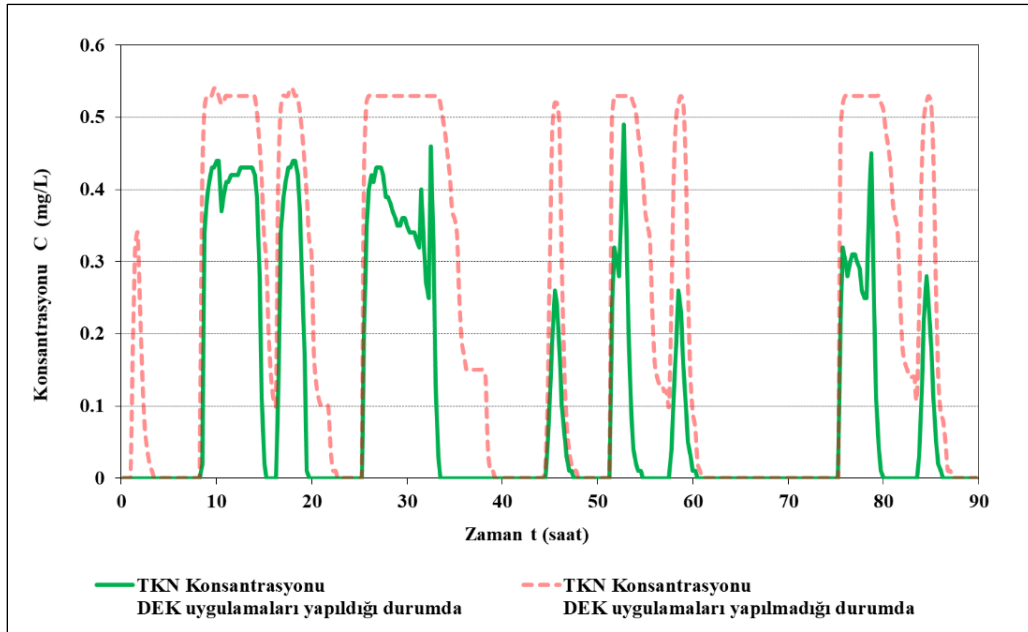
Şekil 5. DEK uygulamaları yapıldığı ve yapılmadığı durumlardaki AKM pollutografları



Şekil 6. DEK uygulamaları yapıldığı ve yapılmadığı durumlardaki Pb pollutografları



Şekil 7. DEK uygulamaları yapıldığı ve yapılmadığı durumlardaki BOİ pollutografları



Şekil 8. DEK uygulamaları yapıldığı ve yapılmadığı durumlardaki TKN pollutografları

Tablo 1. Yüzeysel akış hacminin ve pik debisinin, DEK uygulamaları yapıldığı ve yapılmadığı durumlardaki değerlerinin karşılaştırılması.

Parametre:	DEK uygulamaları yapılmadığı durumda Pik Debi (L/s)	DEK uygulamaları yapıldığı durumda Pik Debi (L/s)	Pik Debinin Azalma Yüzdesi (%)	Toplam Yüzeysel Akış Hacminin Azalma Yüzdesi (%)
Yüzeysel Akış	189.28	42.36	77.62	90.97



Tablo 2. Yüzeysel akıştaki kirletici yükü miktarlarının ve pik konsantrasyonlarının, DEK uygulamaları yapıldığı ve yapılmadığı durumlardaki değerlerinin karşılaştırılması.

<b>Kirleticiler</b>	<b>DEK uygulamaları yapılmadığı durumda Pik Konsantrasyon (mg/L)</b>	<b>DEK uygulamaları yapıldığı durumda Pik Konsantrasyon (mg/L)</b>	<b>Pik Konsantrasyonlarının Azalma Yüzdesi (%)</b>	<b>Toplam Kirletici Yükü Miktarının Azalma Yüzdesi (%)</b>
<b>AKM</b>	262.53	244.11	7.01	84.55
<b>Pb</b>	0.67	0.54	19.40	86.00
<b>BOİ</b>	5.52	4.50	18.48	85.49
<b>TKN</b>	0.54	0.49	9.26	84.76

## 5. TARTIŞMA

DEK uygulamaları havza ölçeğinde yapıldığı zaman, havza alanının büyük olması nedeniyle bir havzanın %1-5 gibi küçük bir alanını kaplayacak şekilde uygulanabilmektedir. Dolayısıyla, DEK uygulamalarının su miktarına ve kalitesine olan etkisi için elde edilen sonuçlar genellikle düşük çıkmaktadır. Çalışmamız kapsamında yaklaşık 18 hektar alana sahip Büyükçekmece Kampüsü alanı modellenmiş ve bu alan için 50614 m<sup>2</sup> alana DEK uygulaması planlanmıştır. Dolayısıyla, planlanan DEK alanının kampüs alanına oranı %28,1 olarak hesaplanmıştır. Bu oran havza çalışmalarına kıyasla büyük bir oran olmasına rağmen kampüs ölçeğinde yapılması makul bir planlamadır. Kampüs alanında yer alan her binanın çatısından toplanan yağmur suyu yağmur tankına aktarıldığı için ve ayrıca diğer DEK türleri de aktif olarak yüzeyde toplanan yağmur suyunu kendilerine has teknikler ile depoladığı ve sızmayı arttırdığı için yüzeysel akış debisinin ve miktarının ciddi oranda azaldığı görülmüştür. Kampüs alanının küçük olması ve uygulanan DEK uygulamalarının sayısının ve türlerinin fazla olması nedeniyle sonuçlarda elde edilen azalma yüzdeleri yüksek çıkmıştır. Çıkan sonuçlar literatürde yer alan diğer sonuçlar ile karşılaştırılmış ve sonuçlar bu kapsamda yorumlanmıştır.

Gülbağ vd., (2019) tarafından yapılan benzer bir çalışmada 133 hektar büyüklüğündeki İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa Avcılar Kampüsü için bir model geliştirilmiştir [9]. Geliştirilen modelde, %7,65 DEK uygulamaları sonucu havzada pik debideki azalmanın %27 olduğu görülmüştür [9]. Ayrıca, Askıda Katı Madde Konsantrasyonunda (AKM) %33 ve Kurşun (Pb) konsantrasyonunda %36 oranında azalma görülmüştür. Gülbağ ve Kazezyılmaz-Alhan (2014) Sazlıdere Havzasının 40 km<sup>2</sup>'lik belirli kısmı için hidrolojik/hidrolik modelini, birleşik DEK uygulamalarının havzada kullanım oranı %3 olacak şekilde geliştirmişlerdir. Yaptıkları çalışma sonucunda, havzadaki pik debideki azalmayı %13,3 ve toplam yüzeysel akış hacmindeki azalmayı %13,4 olarak bulmuşlardır [13]. Frias ve Maniquiz-Redillas (2021) yaptıkları çalışmada De La Salle Üniversitesi Laguna Kampüsü'nün yağmur suyu yönetim modelini geliştirmişlerdir [29]. Yaptıkları modelde, üniversite kampüsünü 24.13 hektar, 10.18 hektar ve 4.34 hektar olmak üzere üç alt havzaya bölmüşlerdir. Havzaya; biyotutma, sızma hendeği, yağmur bahçesi, yeşil çatı, geçirimli kaldırım, yağmur suyu toplama deposu, bitkisel kanal, üstçatı ayırımı olmak üzere sekiz DEK uygulamasını model üzerinde tanımlamışlardır. DEK uygulamalarının bulunduğu ve bulunmadığı modelleri karşılaştırmış ve farklı senaryolar üretmişlerdir. Yaptıkları çalışma sonunda, yüzeysel akışın en fazla azaldığı senaryonun; %87 azalma ile 24,13 hektar büyüklüğünde olan en büyük alt havzaya ait olduğunu bulmuşlardır [29]. Gülbağ ve Kazezyılmaz-Alhan (2019) tarafından Alibeyköy havzasında yapılan çalışmada, farklı DEK uygulamalarına yer verilmiş ve DEK uygulamalarının tekil etkileri ve birleşik etkileri incelenmiştir. Yapılan çalışmada, 161 km<sup>2</sup> havza alanına %5 oranında DEK uygulamaları

tanımlanmıştır. Modellemeler sonucunda, DEK uygulamalarının birleşik etkileriyle beraber AKM pik konsantrasyonunda %26 oranlarında azalma gözlemlenmiştir [19]. Ayrıca, Gülbaz ve Kazezyılmaz-Alhan (2014) Sazlıdere havzasının belirli kısmı için su kalitesi modelini geliştirmişler ve havzadaki AKM konsantrasyon değerinde azalmayı %17,33 bulmuşlardır [13]. Ek olarak, Jia vd., (2015); Liu vd., (2015); Gehenau vd., (2015) yaptıkları çalışmalarda, bir DEK uygulamasının farklı kirleticilere karşı su kalitesini iyileştirmedeki veriminin değişkenlik göstereceğini belirtmişlerdir [30-32]. Bu çalışmada ise; AKM, PB, BOİ ve TKN kirleticilerinin, altı farklı DEK uygulamasının birleşik etkileri sonucu, toplam kirletici yükü miktarlarındaki azalma oranını yüksek ve birbirine yakın oranlarda bulunmuştur (Tablo 1 ve 2).

Benzer çalışmalardaki; Avcılar Kampüs alanının ve Sazlıdere Havza alanının, bu çalışmada modellenen Büyükçekmece Kampüsü'nden çok daha büyük olduğu görülmektedir. Bununla birlikte, Laguna Kampüsü'ndeki 3 adet alt havzanın Büyükçekmece Kampüs alanını ile yakın büyüklükte olduğu görülmüştür. Literatürden elde edilen sonuçlar ile bu çalışma kapsamında yapılan çalışma sonuçları karşılaştırıldığında, Frias ve Maniquiz-Redillas (2021) tarafından yapılan çalışmada büyük olan alt havzanın, DEK uygulamaları sonucu %87 ile yüksek seviyede yüzeysel akış miktarını azaltma oranına sahip olduğu görülmüştür. İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa Büyükçekmece Kampüsü'nde pik debideki azalma oranının da benzer şekilde %90,97 olması, bu iki çalışmada birbirine yakın oranlar elde edildiğini göstermektedir. İkinci olarak ise Gülbaz vd., (2019) ve Gülbaz ve Kazezyılmaz-Alhan (2014) tarafından yapılan çalışmalardaki yüzeysel akış pik debi değerlerindeki azalma oranlarının, Büyükçekmece Kampüsü'nde elde edilen pik debi değerlerindeki azalma oranlarından göreceli olarak daha düşük olması; Büyükçekmece Kampüsü'nün daha küçük bir alana sahip olması ve DEK uygulamalarının tanımlanma oranının daha yüksek olmasından kaynaklı olduğu görülmektedir. Göz önüne alınan bu iki durumdan yola çıkılarak, DEK uygulamalarının küçük havzalarda ve daha yüksek oranda uygulanması durumunda, yüzeysel akış debisini düşürmede daha yüksek performans sergileyebileceği, ancak DEK uygulamalarının kullanım yüzdesine bağlı olarak, gözlemlenen performansın değişkenlik göstereceği anlaşılmaktadır.

## 6. SONUÇ

Bu çalışma, dünyada kentleşme sürecinin hızla devam etmesinden ötürü geçirimsiz alanların artışına dikkat çekmektedir. Yoğun kentleşmeyle birlikte geçirimsiz alanların artışı, su baskını ve taşkın riskini artırmaktadır. Aynı zamanda, temiz su kaynakları düzensiz şehirleşmeden dolayı kirlenmektedir. Yapılan çalışmada, gösterilen bu sorunlar karşısında yeşil altyapı sistemlerinin su kalitesini korumadaki önemi ifade edilmektedir.

Araştırma ve modelleme kapsamında; EPA-SWMM bilgisayar programı kullanılarak İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa Büyükçekmece Kampüsü için Hidrolik-Hidrolojik ve Su Kalitesi Modeli geliştirilmiştir. Oluşturulan model temelinde; ilk olarak modele DEK uygulamaları tanımlanmazken, daha sonra modele uygun bölgelerde yeşil çatı, sızma hendeği, biyotutma ve geçirimli kaldırım, yağmur bahçesi, yağmur suyu depolama deposu olmak üzere altı farklı DEK uygulaması tanımlanmıştır. DEK uygulamaları bulunan ve bulunmayan modellerdeki sonuçlar karşılaştırılarak; yüzeysel akış debisindeki ve AKM, Pb, BOİ, TKN kirletici konsantrasyonlarındaki değişimler gözlemlenmiştir. Modellemeler sonucunda, İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa Büyükçekmece Kampüsü'ne tanımlanan %28,1 oranındaki DEK uygulamalarının; yüzeysel akış hacminde ve pik debisinde sırasıyla %90,97 ve %77,62 oranında azalmaya; kirletici yükü miktarlarında ve pik konsantrasyonlarında sırasıyla %84,55 ile %86,00 arasında ve %7,01 ile %19,40 arasında olmak üzere önemli ölçüde azalmaya neden olduğu görülmüştür. Literatürde yer alan benzer çalışmalar ile karşılaştırmalar sonucu; havza büyüklüğünün, DEK uygulamalarının havzaya tanımlanma yüzdesinin, DEK uygulamalarının çeşitliliğinin ve birleşik etkilerinin su miktarı ve kalitesinde etkili olduğu gözlemlenmiştir.

Sonuç olarak Yeşil Altyapı Sistemlerinin, literatürde bulunan benzer çalışmalar ile karşılaştırıldığında yüzeysel akışı düşürmedeki ve su kalitesini iyileştirmedeki performansının yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Çalışmada yer alan bulgular doğrultusunda; DEK uygulamalarının şehir planlamalarında yaygın bir şekilde

kullanılarak ve yerel yönetimlerin Yeşil Altyapı Sistemlerini önceliklendirerek, sürdürülebilir çevre oluşumuna katkı sağlaması önerilmektedir.

## 7. TEŞEKKÜR BÖLÜMÜ

Bu çalışmada kullanılan yerleşim planının ve topografik haritanın temini hususunda İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa Yapı İşleri Daire Başkanlığı'na ve yağış verilerinin temini hususunda T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı Meteoroloji Genel Müdürlüğü'ne (DMİ) teşekkürlerimizi sunuyoruz.

## REFERANSLAR

- [1] S. Gülbaz and C. M. Kazezyılmaz-Alhan, "Düşük etkili kentleşme uygulaması: Biyotutmanın hidrolojik performansının deneysel modellerle araştırılması," *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, vol. 23, no. 9, pp. 1041-1048, Dec. 2017, doi: 10.5505/pajes.2017.54531.
- [2] H. Baycan, M. N. Ciner, C. Gök, İ. B. Peker, and S. Gülbaz, "Flood Modeling of Ezine and Ayancik Stream Watersheds in Western Black Sea Basin Turkey," *14th International Conference on Hydroscience and Engineering*, İzmir, Türkiye, 26-27 May 2022, pp. 623-627.
- [3] K. Von Grebmer, C. Ringler, M. W. Rosegrant, T. Olofinbiyi, D. Wiesmann, H. Fritschel, O. Badiane, M. Torero, Y. Yohannes, J. Thompson, C. von Oppeln, and J. Rahall, "2012 Global hunger index: The challenge of hunger: Ensuring sustainable food security under land, water, and energy stresses," Bonn, Germany; Washington D.C., USA; and Dublin, Ireland: *Deutsche Welthungerhilfe, International Food Policy Research Institute (IFPRI), and Concern Worldwide*, Oct. 2012, doi: 10.2499/9780896299429.
- [4] X. Liu, Z. Ren, H. Ngo, X. He, P. Desmond, and A. Ding, "Membrane technology for rainwater treatment and reuse: A mini review," *Water Cycle*, vol. 2, pp. 51-63, 2021, doi: 10.1016/j.watcyc.2021.08.001.
- [5] G. E. Üstün, T. Can, and G. Küçük, "Binalarda yağmur suyu hasadı," *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, vol. 25, no. 3, pp. 1593-1610, Dec. 2020, doi: 10.17482/uumfd.765561.
- [6] W. He, X. Lin, Z. Shi, J. Yu, S. Ke, X. Lu, Z. Deng, Y. Wu, L. Wang, Q. He, and J. Ma, "Nutrient removal performance and microbial community analysis of amended bioretention column for rainwater runoff treatment," *Journal of Cleaner Production*, vol. 374, 133974, Nov. 2022, doi: 10.1016/j.jclepro.2022.133974.
- [7] S. Gülbaz, and C. M. Kazezyılmaz-Alhan, "Impact of land use/cover changes on water quality and quantity in a calibrated hydrodynamic model," *10th International Congress on Advances in Civil Engineering (ACE 2012)*, Türkiye, 2012.
- [8] S. Gülbaz, C. M. Kazezyılmaz-Alhan, R. Nas, and M. Dikici, "A calibrated hydrological model for Alibeyköy Watershed in Istanbul, Turkey, incorporating LID implementation," *Fresenius Environmental Bulletin*, vol. 26, pp. 6112-6120, 2017.
- [9] S. Gülbaz, A. Yıldırım, and C. M. Kazezyılmaz-Alhan, "A water quality-quantity model for Avcılar Campus of Istanbul University incorporating LID implementation," *New Trends in Urban Drainage Modelling (UDM 2018)*, Palermo, Italy, 23-26 Sep. 2018, pp. 688-692, doi: 10.1007/978-3-319-99867-1\_119.
- [10] J. Gironás, L. Roesner, L. Rossman, and J. Davis, "A new applications manual for the Storm Water Management Model (SWMM)," *Environmental Modelling & Software*, vol. 25, pp. 813-814, June 2010, doi: 10.1016/j.envsoft.2009.11.009.

- [11] W. C. Huber and R. E. Dickinson, "Storm Water Management Model Version 4 User's Manual," Athens, GA: *Environmental Research Laboratory, Office of Research and Development, U.S. Environmental Protection Agency*, EPA/600/S3-88/001, Aug. 1988.
- [12] S. Gülbaz, and C. M. Kazezyılmaz-Alhan, "Investigating effects of low impact development on surface runoff and TSS with a calibrated hydrodynamic model," *La Houille Blanche*, vol. 3, pp. 77-84, June 2014, doi: 10.1051/lhb/2014031.
- [13] L. A. Rossman, "Storm Water Management Model User's Manual Version 5," *Water Supply and Water Resources Division, National Risk Management Research Laboratory, U.S. Environmental Protection Agency*, EPA/600/R-05/040, Cincinnati, OH, July 2010.
- [14] L. Rossman and W. Huber, "Storm Water Management Model Reference Manual Volume I Hydrology," *U.S. EPA, Office of Research and Development*, Washington, DC, EPA/600/R-15/162A, Sep. 2015.
- [15] L. Rossman, "Storm Water Management Model Reference Manual Volume II – Hydraulics," *U.S. Environmental Protection Agency*, Washington, DC, EPA/600/R-17/111, Aug. 2017.
- [16] S. Gülbaz and C. M. Kazezyılmaz-Alhan, "Calibrated hydrodynamic model for Sazlıdere watershed in Istanbul and investigation of urbanization effects," *Journal of Hydrologic Engineering*, vol. 18, no. 1, pp. 75–84, 2013, doi: 10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000607.
- [17] S. Gülbaz, "Yağış-havza-biyotutma sisteminin hidrolojik-su kalitesi modellenmesi ve deneysel olarak incelenmesi," Doktora Tezi, İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye, 2015.
- [18] R. McCuen, "Hydrology," *Federal Highway Administration (FHWA)*, FHWA-SA-96-067, Washington, DC, USA, 1996.
- [19] S. Gülbaz and C. M. Kazezyılmaz-Alhan, "Impact of LID Implementation on Water Quality in Alibeyköy Watershed in Istanbul, Turkey," *Environmental Processes*, vol. 5, June 2018, doi: 10.1007/s40710-018-0318-3.
- [20] M. H. Mohammed, H. M. Haider, and W. H. Hassan, "Modeling the quality of sewage during the leaking of stormwater surface runoff to the sanitary sewer system using SWMM: A case study," *AQUA - Water Infrastructure Ecosystems and Society*, vol. 71, no. 1, pp. 86-99, Jan. 2022, doi: 10.2166/aqua.2021.227.
- [21] L. U. Murphy, T. A. Cochrane, and A. O'Sullivan, "Build-up and wash-off dynamics of atmospherically derived Cu, Pb, Zn, and TSS in stormwater runoff as a function of meteorological characteristics," *Science of The Total Environment*, vol. 508, pp. 206–213, March 2015, doi: 10.1016/j.scitotenv.2014.11.094.
- [22] D. Wicke, T. A. Cochrane, and A. O'Sullivan, "Build-up dynamics of heavy metals deposited on impermeable urban surfaces," *Journal of Environmental Management*, vol. 113, pp. 347-354, Dec. 2012, doi: 10.1016/j.jenvman.2012.09.005.
- [23] N. Tohum, "Sürdürülebilir peyzaj tasarım aracı olarak yeşil çatılar," Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye, 2011.
- [24] K. E. Saracoglu and C. M. Kazezyılmaz-Alhan, "Determination of grass swale hydrological performance with rainfall-watershed-swale experimental setup," *Journal of Hydrologic Engineering*, vol. 28, no. 3, 04022043, Dec. 2023, doi: 10.1061/jhyeff.heeng-5824.

- [25] C. Küp, "Üniversite kampüsünde biyotutma sistemlerinin kirletici giderimi için saha performansının incelenmesi," Yüksek Lisans Tezi, *Trakya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, Trakya, Türkiye, 2022.
- [26] M. Y. Kılıç and M. N. Abuş, "Bahçeli bir konut örneğinde yağmur suyu hasadı," *Uluslararası Tarım ve Yaban Hayatı Bilimleri Dergisi*, vol. 4, no. 2, pp. 209-217, Dec. 2018, doi: 10.24180/ijaws.426795.
- [27] M. Scholz and P. Grabowiecki, "Review of permeable pavement systems," *Building and Environment*, vol. 42, no. 11, pp. 3830-3836, Nov. 2007, doi: 10.1016/j.buildenv.2006.11.016.
- [28] Ö. B. Topçu, B. Felekoğlu, and B. Çaylak, "Agrega kökeni, agregaçimento oranı ve ince malzemeli agreganın kullanımının geçirimli betonun fiziksel ve mekanik özelliklerine etkisi üzerine bir çalışma," *Erzincan University Journal of Science and Technology*, vol. 12, no. 1, pp. 225-234, March 2019, doi: 10.18185/erzifbed.442592.
- [29] R. A. Frias and M. Maniquiz-Redillas, "Modelling the applicability of low impact development (LID) technologies in a university campus in the Philippines using Storm Water Management Model (SWMM)," *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 1153, 012009, 23-25 Jan. 2021, doi: 10.1088/1757-899X/1153/1/012009.
- [30] H. F. Jia, X. W. Wang, C. P. Ti, Y. Y. Zhai, R. Field, A. N. Tafuri, H. H. Cai, and S. L. Yu, "Field monitoring of a LID-BMP treatment train system in China," *Environmental Monitoring and Assessment*, vol. 187, no. 6, pp. 373, May 2015, doi: 10.1007/s10661-015-4595-2.
- [31] Y. Z. Liu, V. F. Bralts, and B. A. Engel, "Evaluating the effectiveness of management practices on hydrology and water quality at watershed scale with a rainfall-runoff model," *Science of The Total Environment*, vol. 511, pp. 298-308, April 2015, doi: 10.1016/j.scitotenv.2014.12.077.
- [32] N. Geheniau, M. Fuamba, V. Mahaut, M. R. Gendron, and M. Dugue, "Monitoring of a rain garden in cold climate: Case study of a parking lot near Montreal," *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, vol. 141, no. 6, 04014073, June 2015, doi: 10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000836.