

Düşük Etkili Kentleşme (DEK) Uygulamalarının Kentsel Yağmursuyu Drenaj Sistemi Üzerindeki Etkileri

Abdülbaki Hacı*, Sezar Gülbaz**†, Yasin Paşa***

* İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mimarlık ve Mühendislik Fakültesi, İstanbul Gelişim Üniversitesi, Avcılar, İstanbul, Türkiye

** İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, 34320 Avcılar, İstanbul, Türkiye

*** İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mimarlık ve Mühendislik Fakültesi, İstanbul Gelişim Üniversitesi, Avcılar, İstanbul, Türkiye

(abhaci@gelisim.edu.tr, sezarg@iuc.edu.tr, ypasa@gelisim.edu.tr)

** İletişim; Sezar Gülbaz,

İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, 34320 Avcılar, İstanbul, Türkiye

Tel: +90 212 473 70 70/17920

sezarg@iuc.edu.tr

Geliş / Received: 29.05.2024 Kabul / Accepted: 16.09.2024

Öz - İklim değişimi ve kentleşme hızının artmasıyla birlikte verimli su kullanımının önemi giderek artmaktadır. Günümüzde, yağmursuyu hasadı yapılarak yağmur suyunun tekrar kullanılması ve su temini üzerindeki baskının azaltılması hedeflenmektedir. Ayrıca, su kaynaklarının korunması amacıyla doğa tabanlı çözüm yöntemlerini içeren Düşük Etkili Kentleşme (DEK) uygulamalarının kullanılması büyük öneme sahiptir. DEK, hidrolojik çevrimi korumak, selin ve yayılı kirlilik kaynaklarının olumsuz etkilerini azaltmak için tasarlanmış bir yağmursuyu yönetimi uygulamasıdır. Bu çalışma kapsamında, Çevre Koruma Kuruluşu Yağmursuyu Yönetim Modeli (EPA SWMM) kullanılarak kentleşme baskısı altında olan İstanbul Esenyurt ilçesinde bulunan bir yerleşim alanının hidrolojik ve hidrolik modeli oluşturulmuştur. Daha sonra, farklı DEK uygulamaları modele entegre edilerek bu uygulamaların yüzeysel akışa ve askıda katı madde (AKM) konsantrasyonuna olan etkisi incelenmiştir. Bu kapsamda, 2, 5, 10, 25, 50 ve 100 yıllık tekerrür aralığına sahip yağışlar ile İSKİ'den temin edilen yağmursuyu drenaj planları modelde kullanılmıştır. Çalışma kapsamında, yağmur varili/tankı (YV), yağmur bahçesi (YB) ve geçirimli kaldırım (GK) DEK uygulamaları, oluşturulan hidrolojik-hidrolik modele dahil edilmiştir. Model sonuçları incelendiğinde DEK uygulamalarının pik debiyi ve AKM konsantrasyon değerlerini büyük oranda azalttığı görülmüştür. Yapılan simülasyonlar sonucunda DEK uygulamalarının 2, 5, 10, 25, 50, 100 tekerrür aralıklı yağışların oluşturduğu akışın pik değerini sırasıyla, %9.89, %10.46, %9.43, %9.14, %9.34 ve %9.02 ve askıda katı madde maksimum konsantrasyon değerlerini %3.85, %3.25, %3.17, %4.80, %4.64 ve %4.75 oranlarında düşürdüğü gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Düşük Etkili Kentleşme (DEK), Yağmursuyu drenajı, Kentsel altyapı, Yağmursuyu hasadı, Yüzeysel akış, Askıda Katı Madde (AKM), EPA-SWM

Impacts of Low Impact Development (LID) Practices on Urban Stormwater Drainage System

With climate change and increasing urbanization, efficient water use is becoming increasingly important. Today, rainwater harvesting aims to reuse rainwater and reduce the pressure on the water supply. In addition, Low Impact Development (LID) practices, which include nature-based solutions to conserve water resources, are of great importance. LID is a stormwater management practice designed to protect the hydrological cycle and reduce the negative impacts of flooding and diffuse pollution sources. In this study, the Environmental Protection Agency Stormwater Management Model (EPA SWMM) was used to create a hydrological and hydraulic model of a residential area in Esenyurt district of Istanbul, which is under urbanization pressure. Then, different LID practices were integrated into the model and their effects on runoff and total suspended solids (TSS) concentrations were investigated. In this context, rainfall with 2, 5, 10, 25, 50, and 100-year return periods and stormwater drainage plans obtained from ISKI were used in the model. Within the scope of the study, rain barrel/tank (RB), rain garden (RG), and permeable pavement (PP) LID applications were included in the hydrological-hydraulic model. When the model results were analyzed, it was observed that LID applications significantly reduced the peak flow rate and TSS concentration values. As a result of the simulations, it was observed that LID applications decreased the peak value of runoff generated by rainfall with 2, 5, 10, 25, 50, 100 return periods by 9.89%, 10.46%, 9.43%, 9.14%, 9.34% and 9.02% and the maximum concentration values of suspended solids by 3.85%, 3.25%, 3.17%, 4.80%, 4.64% and 4.75%, respectively.

Keywords: Low Impact Development (LID), Stormwater Drainage, Urban infrastructure, Stormwater harvest, Surface Runoff, Total Suspended Solid (TSS), EPA-SWMM

1. Giriş

Kentleşmenin ve iklim değişikliği etkilerinin giderek artmasıyla birlikte su kaynaklarının korunması ve tekrar kullanımı büyük önem kazanmıştır. Almeida ve diğ., [1] hızlı kentleşmeyle birlikte kullanılabilir su kaynakları üzerinde artacak olan su ihtiyacı baskısına değinmiştir. Hızlı kentleşmenin etkisiyle birlikte artan yüzey akışları taşkınlara ve su kalitesindeki bozulmalara sebep vermektedir [2,3]. Bu kapsamda su miktarının kontrol altına alınması ve düzenlenmesi için çeşitli mühendislik modellerinin ve uygulamalarının sistematik olarak yapılması zaruridir [4, 5]. Bahsedilen sorunların çözümü için Düşük Etkili Kentleşme (DEK) sistemleri başarılı uygulamalar arasında görülmektedir. Düşük etkili kentleşme uygulamaları son zamanlarda meskun mahallerdeki yüzey akışını azaltma konusunda önem kazanmış uygulamalardır [6,7]. Yüzey akışı azaltılarak taşkın riskinin azaltılması ve kirlilik kontrolü gibi konulardaki verimliliği en yüksek düzeye çıkarmak için DEK uygulamaları hızla önem kazanmaya devam etmektedir. Bu hususta literatürde özellikle son yıllarda birçok çalışma yapılmıştır [8, 9, 10, 11, 12].

Literatürde kabul gören EPA-SWMM programı ile biyotutma, yağmur bahçeleri, yeşil çatılar, yağmur varilleri/tankları, sızdırma hendekleri, geçirimli kaldırım gibi birçok DEK uygulaması modellenmektedir [13]. Bu kapsamda su kalitesi ve su miktarı konuları ile ilgili EPA-SWMM programı kullanılarak yapılmış çalışmalar bulunmaktadır [14, 15, 16, 17]. Zhang ve diğ., [18] EPA-SWMM programını kullanarak yaptıkları araştırmada kentsel yüzey akışının optimum yönetimi için DEK uygulamalarının ve peyzaj kompozisyonunun saha ölçeğinde etkili bir şekilde yapılandırılmasına yönelik entegre bir çalışma yapmışlardır. Arjenaki ve diğ., [19], yaptıkları çalışmada SWMM modelini

kullanarak Düşük Etkili Kentleşme (DEK) yöntemlerinin Shahrekord Şehrindeki kentsel akış toplama ağı üzerindeki etkisini modellemiş ve araştırmışlardır. Diğer bir çalışmada ise, kentsel alanlardaki yüzey akışını kontrol etmek ve kentsel sel felaketlerini önlemek için SWMM modeli kullanarak DEK uygulamalarının yüzey akışını azaltmadaki önemi vurgulanmakta ve kentsel alanlarda etkili yağmursuyu yönetimine duyulan ihtiyaca dikkat çekilmektedir [20]. Lee ve diğ., [21] noktasal olmayan kirleticilerin yönetiminde SWMM-DEK modellemesinin etkinliğini değerlendirmektedir. Çin'de yapılan çalışmada, SWMM kullanarak Kunming Şehrinin Chuanfang nehir havzasındaki birleşik drenaj ağlarını simüle etmek için bir model oluşturmuştur [22]. Mancipe-Munoz ve diğ., [23] yaptıkları çalışmada birleşik kanalizasyon sistemlerindeki taşmaları ve yağmursuyu yönetimini kontrol etmek için merkezi olmayan yeşil altyapı alternatiflerini doğru bir şekilde değerlendirmek amacıyla kentsel su havzaları için oldukça ayrıntılı, yarı dağılımlı bir yağış-akış modelini kullanarak kalibre etmişlerdir. Compisano ve diğ., [24] yaptıkları çalışmada yağmursuyu hasat sistemlerinin tutma potansiyelini tahmin etmek için SWMM programında yer alan yağmur varili seçeneğini incelemişlerdir. Sousa ve diğ., [25] Campo Grande şehrinde yaptıkları çalışmada geçirimli kaldırım, yağmursuyu hasadı ve infiltrasyon hendeklerini ve kendi aralarındaki kombinasyonlarını kullanarak DEK uygulamaları yapmışlardır. Bu çalışma ile DEK uygulamaları sonucunda bölge için en uygun maliyetli olan kombinasyonun sadece infiltrasyon hendeği olduğunu ve bu uygulamanın yüzey akışında %15'lik bir düşüş sağladığını ortaya koymuşlardır. Movahedinia ve diğ., [26] Tahran'da yaptıkları çalışmada DEK uygulamalarının 2-5-10 yıllık tekrür aralıklarında yüzey akışı üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Zhou ve diğ., [27] yaptıkları çalışmada geliştirilmiş bir dikey



Şekil 1. Çalışma alanına ait görsel.

DEK modeli oluşturma yöntemi önererek geleneksel DEK modelleme yaklaşımlarının sınırlamalarını ele almışlardır. Çalışma, DEK'ler arasındaki ayrıntılı bağlantı modlarını keşfetmeyi, dikey yerleşim planında akış bağlantı yollarını oluşturmayı ve çok boyutlu bir DEK tahsisi, modellemesi ve değerlendirmesi elde etmeyi amaçlamaktadır.

Bu çalışma kapsamında, farklı DEK uygulamalarının kentsel bir alanda yüzeysel akışa ve askıda katı madde konsantrasyonuna etkisi incelenmiştir. Bu kapsamda, literatürde kabul gören EPA-SWMM programı kullanılmıştır. Çalışma sahası olarak kentleşme baskısı altında olan İstanbul Esenyurt ilçesinde bulunan bir yerleşim alanı seçilmiştir. Çalışma alanı, EPA-SWMM programında 26 alt havzaya bölünmüş, İSKİ'den temin edilmiş yağmur drenaj planları ile örtüştürülerek hidrolojik-hidrolik model oluşturulmuştur. Global Mapper programı kullanılarak belirlenen alt havzalara ait geçirimli ve geçirimsiz yüzeylerin alansal değerleri elde edilmiştir. Oluşturulan hidrolojik-hidrolik modele yağmur varili (YV), yağmur bahçesi (YB) ve geçirimli kaldırım (GK) gibi DEK uygulamaları entegre edilmiştir. DMİ'den alınan 2, 5, 10, 25, 50 ve 100 yıllık tekrür aralığına sahip yağışlar ile model çalıştırılmış ve yüzeysel akış debisi ile askıda katı madde konsantrasyon değerleri hesaplanmıştır. Farklı tekrürdeki yağış verisi kullanılarak DEK uygulamalarının olduğu ve olmadığı durumlarda drenaj sisteminin çıkış noktasında hesaplanan debi ve AKM konsantrasyon değerleri incelenerek DEK uygulamalarının performansı incelenmiştir. Yapılan simülasyonlar sonucunda DEK uygulamalarının farklı

tekrür aralıklı yağışların oluşturduğu akışın pik değerlerini ve askıda katı madde konsantrasyon pik değerlerini düşürdüğü gözlemlenmiştir.

2. Malzeme ve Yöntem

2.1. Çalışma Alanı

Çalışma alanı, İstanbul'un Esenyurt ilçesinde TEM otoyoluna yakın bir konumda bulunmaktadır (Şekil 1). Çalışma alanının bulunduğu bölge geçirimsiz alanların oransal olarak yüksek olduğu bir bölgedir. Modellenen alt havzaların toplam alanı 39.88 hektar (ha)'dır. Tüm geçirimsiz alanlar, tüm alt havzaların toplam alanının %32.58'ini oluşturmaktadır. DEK uygulanan alan toplam çalışma alanının %6'sına, toplam geçirimsiz yüzey alanının ise %17.91'ine tekabül etmektedir. Çalışma alanının bulunduğu bölgenin iklim özellikleri literatürde de geçiş iklimi olarak tanımlanan Marmara bölgesi iklimidir.

2.2. EPA SWMM Yağmur suyu Yönetim Modeli

EPA SWMM, bir yağış olayı sırasında bir havzada oluşan yüzeysel akışını hesaplayan dinamik bir simülasyon modelidir [28, 29]. EPA SWMM, her bir alt havzadaki yüzey akışını ve suyun kalitesini; her bir kanaldaki ve bağlantı noktasındaki akış hızını, derinliğini ve su konsantrasyonunu hesaplamaktadır. Hiyetograf, programa girdi olarak tanımlanır; Çıktı olarak ise debinin zaman içindeki değişimi olan hidrograf ve su konsantrasyonunun zaman içindeki değişimi olan polutograflar

programdan elde edilir. Debiyi hesaplamak için EPA SWMM taşkın yönlendirmesi için süreklilik ve momentum denklemlerini çözmektedir. Taşkın yönlendirme denklemlerinin en genel şekli, kararsız üniform olmayan akışı tanımlayan dinamik dalga denklemleridir. Kinematik ve difüzyon dalga denklemleri, momentum denkleminde etkili olan bazı kuvvetlerin ihmal edilmesiyle dinamik dalga denkleminde elde edilir. Yapılan çalışmada akış yönlendirme için dinamik dalga denkleminde elde edilen difüzyon dalga denklemi kullanılmıştır ve aşağıdaki Denklem 1'deki gibi verilmiştir [30]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} &= 0 \\ S_f &= S_0 - \frac{\partial y}{\partial x} \\ \frac{\partial Q}{\partial t} + c \frac{\partial Q}{\partial x} &= K \frac{\partial^2 Q}{\partial x^2} \\ c &= mV \\ K &= \frac{Q}{2BS_0} \end{aligned} \quad (1)$$

Burada Q debi (L^3/T), A kesit alanı (L^2), y su derinliği (L), S_f sürtünme eğimi (L/L), S_0 yatak eğimi (L/L), t zaman (T), x mesafe (L), c difüzyon dalga hızı (L/T), V hız (L/T), K hidrolik difüzyon (L^2/T), B genişlik (L) ve m debi-sürtünme eğimi ilişkisine göre verilmiştir.

Yapılan çalışmada infiltrasyonu hesaplamak için (Denklem 2) Green-Ampt Yöntemi kullanılmış olup Green-Ampt Yöntemine ait denklem aşağıdaki şekilde verilmiştir [29]:

$$\begin{aligned} \text{for } F < F_s : f &= i \\ \text{if } i > K_s : F_s &= \frac{S_u M}{i / K_s - 1} \\ \text{if } i < K_s : F_s &\text{ is not calculated} \\ \text{for } F \geq F_s : f &= f_p \text{ and } f_p = K_s \left(1 + \frac{S_u M}{F}\right) \end{aligned} \quad (2)$$

Burada, F kümülatif infiltrasyon (L), F_s doymuş toprağın kümülatif infiltrasyonu (L), i yağış yoğunluğu (L/T), K_s doymuş toprak için hidrolik iletkenlik (L/T), S_u emme yüksekliği (L), M başlangıçtaki nem açığı (L/L), f infiltrasyon hızı (L/T) ve f_p infiltrasyon kapasitesidir (L/T).

Kirlilik Birikimi (Build-up) ve Kirlilik Yıkınımı (Washoff) denklemleri üstel fonksiyon olarak seçilmiş ve Denklem 3 ve 4'te verilmiştir [31]. Üssel Fonksiyon Birikme Fonksiyonu üstel bir artış olarak ilerler ve maksimum sınıra ulaşır. Denklem şu şekildedir:

$$B = C_1 x (1 - e^{-C_2 x}) \quad (3)$$

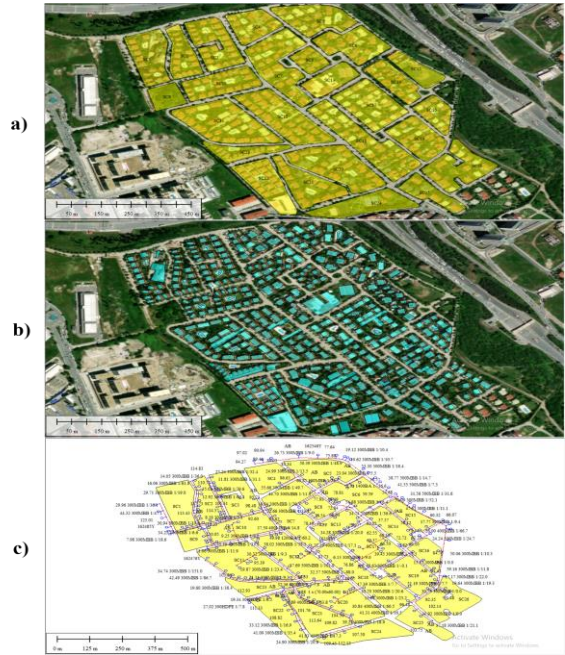
Burada C_1 kirlenici maddenin mümkün olan maksimum birikme miktarı, C_2 sabit birikme değeri ($1/T$) olarak tanımlanmaktadır. Kirlilik yıkınımı, belirlenen arazi türü için yağışlı havalarda meydana gelmektedir ve aşağıda verilen üstel fonksiyon ile hesaplanabilmektedir.

$$W = C_3 q C_4 B \quad (4)$$

Burada W zamanla yıkanan kirlenici kütlesi, C_3 yıkanma sabiti, C_4 yıkanma üssü, q birim alan için akış değeri (L/T) ve B kirlilik birikmesi (M) olarak tanımlanır.

2.3. Model Kurulumu

Bu çalışma kapsamında, EPA-SWMM'e tanımlanacak alt havzaların konumları, alansal büyüklükleri, geçirimli ve geçirimsiz alanların alansal değerleri, yağmur drenaj altyapısının konumları gibi bilgiler Global Mapper programı aracılığıyla oluşturulmuştur. Global Mapper programı CBS uygulamaları sunan bir yazılımdır. Global Mapper'da oluşturulmuş olan alanlar ve işlenmiş bilgiler Şekil 2'de gösterilmiştir. Şekil 2 (a)'da EPA-SWMM programına alt havza olarak tanımlanacak alanlar, Şekil 2 (b)'de alt havza içerisinde kalan geçirimsiz yüzeyler, Şekil 2 (c)'de ise çalışma bölgesindeki yağmur drenaj sisteminin bileşenleri ve gerekli bilgileri gösterilmiştir. Şekil 2'de gösterilmiş olan alt havzalara ait bilgiler Tablo 1'de verilmiştir. Ortalama alt havza alanı 15336 m^2 , ortalama havza genişliği 98 m , ortalama geçirimsiz alan oranı ise %32 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 2. (a) EPA-SWMM modelinde yapılan alt havzalar, (b) çalışma alanında yer alan yapılar, (c) yağmur drenaj hattı

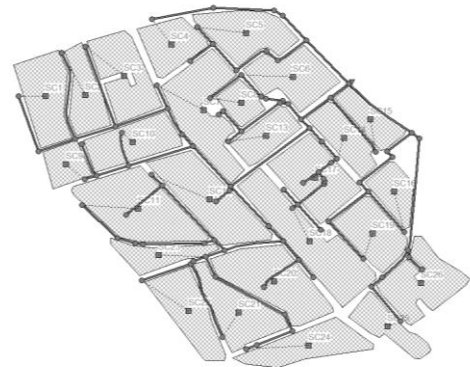
Tablo 1. Havzalara ait bilgiler

Alt-Havza No.	Havza Alanı (m ²)	Havza Genişliği (m)	Eğim (%)	Geçirimsiz Alan (%)	Geçirimli Alan Pürüzlülük sabiti	Geçirimsiz Alan Pürüzlülük sabiti
SC1	16730	85	4%	33.09	0.15	0.012
SC2	11240	80	2%	26.25		
SC3	17340	93	4%	31.12		
SC4	11830	113	7%	31.87		
SC5	16540	130	9%	23.82		
SC6	15920	137	15%	30.27		
SC7	23300	100	7%	28.31		
SC8	6040	71	13%	25.47		
SC9	6890	80	19%	0.00		
SC10	15400	186	5%	30.08		
SC11	27540	140	3%	41.87		
SC12	23880	94	2%	34.61		
SC13	9780	142	4%	94.05		
SC14	10990	67	5%	31.59		
SC15	8460	55	10%	5.77		
SC16	8430	80	14%	36.37		
SC17	19930	115	5%	36.50		
SC18	26460	70	5%	30.67		
SC19	14430	95	10%	36.97		
SC20	24450	123	8%	41.07		
SC21	16100	87	5%	33.68		
SC22	15890	73	0%	27.84		
SC23	8370	40	6%	47.04		
SC24	15690	78	3%	21.35		
SC25	9210	57	4%	31.46		
SC26	17940	150	8%	21.81		

Tablo 1’de numaralandırılmış olan alt havzaların havza alanları, havza genişlikleri, eğim yüzdesi, geçirimsiz alan oranı, geçirimli ve geçirimsiz alanların Manning n değerleri verilmiştir. Yağış sırasında havzada meydana gelen sızma miktarı Green – Ampt Metodu kullanılarak hesaplanmıştır. Sızma miktarını bulmak için zemin cinsine bağlı olarak değişen porozite, hidrolik iletkenlik ve emme basınç parametrelerinin değerleri, EPA SWMM kullanma kılavuzundan ve literatürdeki kaynaklardan yararlanılarak belirlenmiştir. Daha sonra alt havzalar üzerinde yağış sonrası oluşan yüzeysel akış sularının toplandığı 100 adet birleşim noktası tanımlanmış ve yükseklikleri eşyükselti haritaları kullanılarak belirlenip programa girilmiştir. Yağış sonucu oluşan yüzeysel akış, birleşim noktalarında toplanarak drenaj sistemi vasıtasıyla toplanmaktadır. Modellemenin bu aşamasında 98 adet açık kanal İSKİ’den temin edilmiş yağmur drenaj planları ile örtüştürülerek oluşturulmuştur. Yüzeysel akış ve kanallardaki debi hesaplamaları için yerçekimi ve basınç kuvvetini esas alan difüzyon dalga öteleme metodu kullanılmıştır. EPA SWMM programında kurulan model Şekil 3’te gösterilmiştir. Modellemenin ikinci aşamasında oluşturulan hidrolojik-hidrolik modele su kalitesi modeli eklenmiştir. Bu kapsamda, SWMM programına kirletici madde ve arazi kullanımı tanımlanması gerekmektedir. Su kalitesi analizi için kirletici madde olarak askıda katı madde (AKM) ve arazi kullanımı olarak da çalışma alanının durumu dikkate alınarak yerleşim bölgesi olarak tanımlama yapılmıştır.

Tablo 2. Kirlilik Birikimi (Build Up) ve Kirlilik Yıkınımı (Washoff) katsayıları.

Kirlilik Birikimi (Build Up)		Kirlilik Yıkınımı (Washoff)	
Fonksiyon	Üstel Fonksiyon	Fonksiyon	Üstel Fonksiyon
Maksimum Birikme Miktarı Katsayısı (C ₁)	181.4	Yıkınma Katsayısı (C ₃)	0.003
Sabit Birikme Değeri Oran Sabiti (C ₂)	0.22	Yıkınma Üssü Katsayısı (C ₄)	0.8
Normalizer	CURB		



Şekil 3. EPA-SWMM modeli

Tablo 3. Havzalara uygulanan DEK tipleri ve geçirimli alana dönüştürülmüş geçirimsiz alan yüzdeleri.

Alt Havzalar	Havza Alanları (hektar)	YV (m ²)	GK (m ²)	YB (m ²)	DEK Uygulanan Geçirimsiz Alan oranı		
					YV %	GK %	YB %
SC1	1.67	65	-	-	1.17	0.00	0.00
SC2	1.12	70	-	-	2.37	0.00	0.00
SC3	1.73	115	-	-	2.13	0.00	0.00
SC4	1.18	40	-	-	1.06	0.00	0.00
SC5	1.65	50	-	-	1.27	0.00	0.00
SC6	1.59	45	-	-	0.93	0.00	0.00
SC7	2.33	90	-	-	1.36	0.00	0.00
SC8	0.60	50	-	6980	3.25	0.00	0.00
SC9	0.69	0	-	-	0.00	0.00	0.00
SC10	1.54	105	-	-	2.27	0.00	0.00
SC11	2.75	120	1819	-	1.04	15.78	0.00
SC12	2.39	100	600	290	1.21	7.26	0.00
SC13	0.98	20	-	-	0.22	0.00	3.15
SC14	1.10	60	-	-	1.73	0.00	0.00
SC15	0.85	5	-	-	1.02	0.00	0.00
SC16	0.84	60	-	-	1.96	0.00	0.00
SC17	1.99	90	1398	-	1.24	19.22	0.00
SC18	2.65	120	-	-	1.48	0.00	0.00
SC19	1.44	75	-	-	1.41	0.00	0.00
SC20	2.45	110	380	-	1.10	3.78	0.00
SC21	1.61	75	-	390	1.38	0.00	0.00
SC22	1.59	90	450	-	2.03	10.17	8.82
SC23	0.84	55	-	-	1.40	0.00	0.00
SC24	1.57	70	-	9210	2.09	0.00	0.00
SC25	0.92	0	-	-	0.00	0.00	0.00
SC26	1.79	70	-	-	1.79	0.00	0.00

Su kalitesi modelinin kurulumu için gerekli olan kirlilik birikimi (Buildup) ve kirlilik yıkanım (Washoff) katsayıları Tablo 2’de verilmiştir. Bu tabloda yer alan kirlilik birikimi (Buildup) kısmında yer alan C_1 ve C_2 katsayıları Tu ve Smith [32] tarafından yapılan çalışmadan alınmıştır. Kirlilik yıkanımı (Washoff) katsayıları C_3 ve C_4 ise Chow ve diğ., [33] tarafından yapılan çalışmadan elde edilmiştir (Tablo 2).

Modellemenin son aşamasında, uygun alanlarda Yağmur Varili (YV), Yağmur Bahçesi (YB) ve Geçirimli Kaldırım (GK) gibi DEK uygulamaları modele tanıtılmıştır. Çalışma alanındaki havzalara uygulanan DEK tipleri, Tablo 3’te gösterildiği oranlarda uygulanmıştır. Tanımlanan her bina için 5 m³’lük yağmur varilleri (YV), var olan kaldırımların yerine geçirimli kaldırım (GK) ve yeşil alanların bulunduğu bölgelerde ise yağmur bahçeleri (YB) çalışma alanında uygulanmıştır. Çalışma alanındaki havzalarda toplam 350 adet yağmur varili uygulanmış ve total olarak 1750 m² alan kaplamıştır. Diğer DEK’lerin uygulama alanları ise, geçirimli kaldırım 4647 m² ve yağmur bahçeleri 16870 m²’dir. Bu bağlamda toplam DEK uygulanmış alan 23267 m² olarak hesaplanmıştır. DEK uygulanan alan toplam havza alanının %5.8’ine, toplam geçirimsiz alanların ise %17.91’ine tekabül etmektedir. Literatürde DEK uygulamalarına uygulanabilirlik açısından bakıldığında havza alanının %5-10’una uygulandığı durumlarda optimum sonuçlar verdiği görülmektedir. Osheen

ve diğ., [34] yaptıkları çalışmada, toplam havza alanına alsansal olarak farklı yüzdelerde DEK uygulamış ve fayda maliyet açısından incelediklerinde havza alanının %10’una DEK uyguladıkları senaryonun optimum sonuç verdiğini gözlemlemişlerdir. Bu çalışma kapsamında modele entegre edilen DEK’ler ve özellikleri Tablo 4’te gösterilmiştir.

3. Bulgular ve Tartışma

Çalışma alanına ait hidrolojik-hidrolik modeline DEK uygulamaları dahil edilmeden önce çalıştırılmış olup sonuçlar elde edilmiştir. Daha sonra, DEK uygulamaları dahil edilerek model yeniden çalıştırılmış ve elde edilen sonuçlar karşılaştırılarak değerlendirilmiştir. Simülasyonlar için 2, 5, 10, 25, 50 ve 100 yıl tekerrür aralığına sahip yağışlar kullanılmıştır. Model sonuçları, çalışma alanına ait drenaj hattının çıkış noktası için incelenmiştir. Bulgular yüzey akışı ve askıda katı madde konsantrasyonu başlıkları altında ayrı olarak incelenmiştir.

Tablo 4. DEK uygulamalarına ait değerler.

DEK Uygulamaları		GK	YV	YB
Depolama	Kalınlık/Varil Yüksekliği (mm)	600	1000	0
	Boşluk Oranı	0.75	X	0.75
	Sızma Oranı	0.5	X	0.5
	Tıkanma Faktörü	0	X	0
Yüzey	Taşma Yüksekliği (mm)	0	X	100
	Vejetasyon Hacmi	0	X	0
	Yüzey Pürüzlülüğü	0.1	X	0.1
	Yüzey Eğimi (%)	1	X	1
Düşeme	Kalınlık (mm)	150	X	x
	Boşluk Oranı	0.15	X	x
	Permeabilite	100	X	x
Toprak	Kalınlık (mm)	900	X	900
	Porozite	0.5	X	0.5
	Saha Kapasitesi	0.2	X	0.2
	Solma Noktası	0.1	X	0.1
	Hidrolik İletkenlik	0.5	X	0.5
	Hidrolik İletkenlik Eğimi	10	X	10
	Emme basıncı (mm)	3.5	X	3.5
Drenaj	Akış katsayısı	2	0	x
	Akış Üssü	0.5	0.5	x
	Ofset (mm)	6	6	x

3.1. Yüzey Akışı

Çalışmada, DEK uygulanmış ve DEK uygulanmamış modellerin altı farklı tekerrür aralığına sahip yağış yüksekliklerine göre yapılan analizleri sonucunda Tablo 5'te gösterilen pik debiler elde edilmiştir. Her tekerrür aralığı senaryosu için DEK uygulamalarının pik debiyi düşürdüğü sonucuna ulaşılmıştır. Sırasıyla bu farklar, %9.89, %10.46, %9.43, %9.14, %9.34, %9.02 olarak hesaplanmıştır. Her tekerrür yılı için DEK uygulaması yapılmış ve DEK uygulaması yapılmamış senaryolarda çıkış noktasında hesaplanan debi-zaman grafikleri (hidrograflar) Şekil 4'te gösterilmiştir. Elde edilen grafiklerden DEK uygulamasının uygulandığı her

Tablo 5. DEK uygulaması öncesi ve sonrası senaryolarda tekerrür aralıklarına göre çıkış debileri.

Pik Çıkış Debileri (L/s)			
Senaryolar	DEK uygulamaları yokken elde edilen pik debi değerleri	DEK uygulamaları varken elde edilen pik debi değerleri	Fark (%)
2 yıl	35.81	32.27	9.89%
5 yıl	64.92	58.13	10.46%
10 yıl	85.64	77.56	9.43%
25 yıl	113.70	103.31	9.14%
50 yıl	136.91	124.12	9.34%
100 yıl	159.11	144.76	9.02%

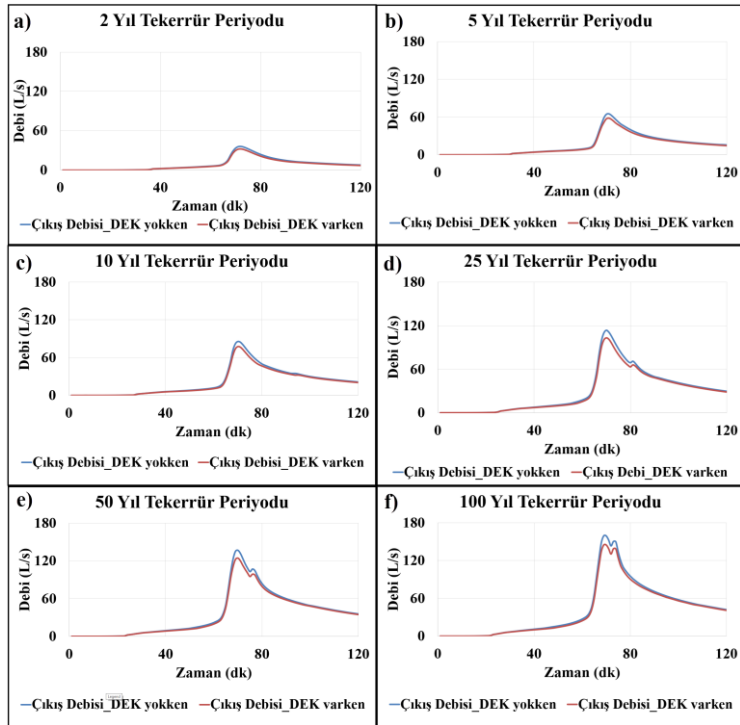
senaryoda çıkış noktasında hesaplanan pik debide azalma olduğu gözlemlenmiştir.

3.2. Askıda Katı Madde (AKM) Konsantrasyonu

Çalışma alanı için literatürden temin edilen parametrelere göre askıda katı madde konsantrasyonu yerleşim alanı arazi kullanımına göre tanımlanmıştır. Yapılan analizler neticesinde çıkan konsantrasyon-zaman grafikleri (polutograflar) DEK uygulanmış ve uygulanmamış halleriyle tekerrür aralıklarına göre Şekil 5'te gösterilmiştir. Ayrıca DEK uygulamalarının etkisini görmek amacıyla Tablo 6'da çıkış noktasında hesaplanan askıda katı madde konsantrasyonlarının pik değerlerinde oluşan farklar gösterilmiştir. Bu bağlamda 2-5-10-25-50 ve 100 yıllık farklı tekerrür periyotları için yapılan analizlerde yüzdesel değişim sırasıyla, %3.85, %3.25, %3.17, %4.80, %4.64, %4.75 olarak hesaplanmıştır. Literatürde DEK uygulamaları ile havzalardaki kirletici konsantrasyonu azaltma uygulamaları yapılmıştır. Lee ve diğ., [35] Güney Kore'de yaptıkları çalışmada üç farklı kanalizasyon sistemi tasarlayıp DEK uygulamalarının farklı kanalizasyon sistemlerinde hem akım hem de kirletici konsantrasyonu üzerindeki etkilerini incelemişlerdir.

Tablo 6. DEK uygulamaları varken ve yokken elde edilen maksimum AKM konsantrasyon değerleri.

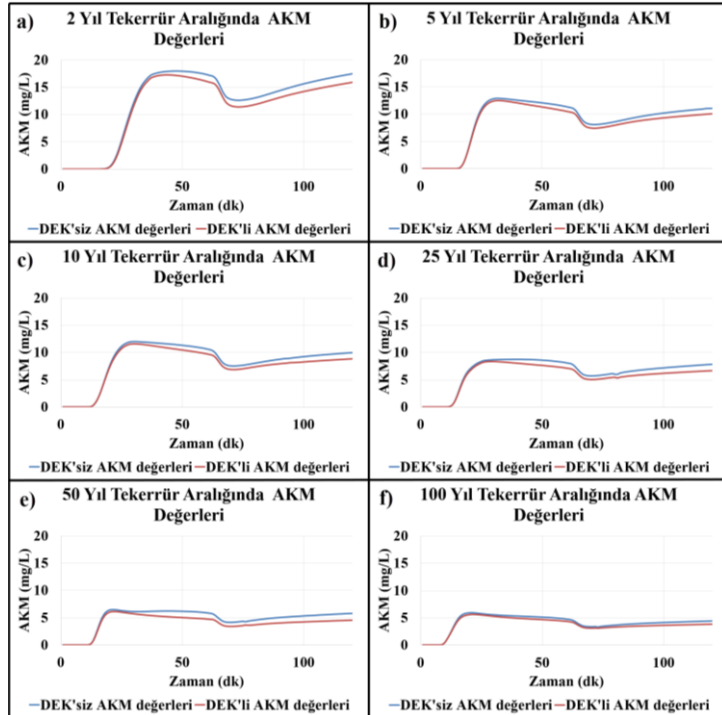
Pik Çıkış Debileri (L/s)			
Senaryolar	DEK uygulamaları yokken elde edilen pik konsantrasyon değerleri	DEK uygulamaları varken elde edilen pik konsantrasyon değerleri	Fark (%)
2 yıl	17.94	17.25	3.85%
5 yıl	12.93	12.51	3.25%
10 yıl	11.97	11.59	3.17%
25 yıl	8.75	8.33	4.80%
50 yıl	6.46	6.16	4.64%
100 yıl	5.89	5.61	4.75%



Şekil 4. Verilen tekerrür aralıklarında, DEK uygulanan ve DEK uygulanmayan senaryolardaki debi-zaman grafikleri (hidrograflar); (a) 2 yıllık tekerrür aralığı, (b) 5 yıllık tekerrür aralığı, (c) 10 yıllık tekerrür aralığı, (d) 25 yıllık tekerrür aralığı, (e) 50 yıllık tekerrür aralığı, (f) 100 yıllık tekerrür aralığı.

Bu çalışmaya paralel olarak, yaptıkları çalışmada DEK uygulaması sonucunda %11 mertebelerinde bir pik kirlenici konsantrasyonu düşüşü ortaya çıkmıştır. Öte yandan, Gülbaz ve Kazezyılmaz-Alhan [4], Sazlıdere havzasında yaptıkları çalışmada DEK uygulamalarının akış ve askıda katı madde üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Bu çalışmada elde edilen sonuçlara benzer olarak pik akım üzerinde %13.61'lik bir düşüş

elde edildiği görülmüştür. Çin'de Jia ve diğ. [6], tarafından yapılan çalışmada kampüs ölçeğinde farklı DEK senaryoları uygulaması yaparak, kampüs drenaj sistemi üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Sonuçların karşılaştırması yapıldığında ise kullanılan DEK alanları bazında farklılar olmasına rağmen sonuçların birbirinden çok da uzakta olmadığı gözlemlenmiştir.



Şekil 5. Verilen tekerrür aralıklarında, DEK uygulanan ve DEK uygulanmayan senaryolardaki AKM konsantrasyon-zaman grafikleri (polutograflar); (a) 2 yıllık tekerrür aralığı, (b) 5 yıllık tekerrür aralığı, (c) 10 yıllık tekerrür aralığı, (d) 25 yıllık tekerrür aralığı, (e) 50 yıllık tekerrür aralığı, (f) 100 yıllık tekerrür aralığı

4. Sonuçlar

İstanbul'un Esenyurt ilçesinde TEM otoyoluna yakın bir konumda seçilen çalışma alanı EPA SWMM bilgisayar programı kullanılarak modellenmiştir. Oluşturulan model ile yağış sonrası akışa geçen ve yağmursuyu drenaj sistemi ile toplanan yüzeysel akış miktarı ve askıda katı madde konsantrasyonu hesaplanmıştır. Daha sonra modele Yağmur Varili (YV), Yağmur Bahçesi (YB) ve Geçirimli Kaldırım (GK) gibi DEK uygulamaları entegre edilmiştir. DEK uygulamalarından sonra akış debisi değerlerinde ve askıda katı madde konsantrasyonunda meydana gelen değişimler incelenerek düşük etkili kentleşme uygulamalarının etkisi gösterilmiştir. Bu çalışma kapsamında çalışma alanından elde edilen bulgular ışığında;

- Toplam havza alanının %5-%6'sına tekabül eden DEK uygulaması yapıldığında çıkış noktasındaki önemli oranda pik debi değerlerinin düştüğü gözlemlenmiştir.
- Özellikle DEK uygulamaları sayesinde su kalitesi açısından çalışma alanına uygulanan DEK'lerin çıkış noktasında askıda katı madde oranını düşürdüğü gözlemlenmiştir.
- Binalara uygulanacak yağmur varili sistemleriyle yapılacak olan yağmursuyu hasadı ve yağmur suyunun yeniden kullanımı sayesinde su temini hatlarındaki yükün azaltılabileceği öngörülmektedir.
- Uygun modeller kurularak DEK uygulamaları ile tasarlanacak yaşam alanlarında yağmur drenaj sistemlerinin çapları küçültülüp maliyetin düşürülebileceği öngörülmektedir.

Bütün bu sonuçlar göz önüne alındığında; düşük etkili kentleşme uygulamasının geçirimsiz alanların çok fazla bulunduğu İstanbul gibi büyükşehirlerde de uygulanmasıyla olası taşkın, su basması, sel gibi problemlerin çözümünü kolaylaştıracağı yapılan bu çalışmada gösterilmiştir. Kullanılan 3 adet düşük etkili kentleşme uygulaması sayesinde debi ve AKM değerleri istenilen seviyede düşürülerek bu çalışma için başarı elde edilmiştir. İleride yapılacak çalışmalar için diğer düşük etkili kentleşme uygulamalarının da dahil edilerek modellenmesiyle daha etkili sonuçlar elde edilmesi veya su kalitesindeki kirlilik ve debi değerlerinin daha da düşürülmesi sağlanabilir.

Teşekkür

Bu çalışma kapsamında, çalışma alanına ait yağmursuyu drenaj planları İstanbul Su ve Kanalizasyon İdaresi'nden (İSKİ) temin edilmiştir. Ayrıca Meteoroloji Genel Müdürlüğü'nden (MGM) alınan 5, 10, 25, 50 ve 100 yıllık tekerrür aralığına sahip yağışlar kullanılmıştır. Katkılarından dolayı İSKİ'ye ve MGM'ye teşekkür ederiz.

Referanslar

- [1] Almeida, C. M. V. B., Borges, D., Jr., Bonilla, S. H., ve Giannetti, B. F., 2010, "Identifying Improvements in Water Management of Buswashing Stations in Brazil." *Resour. Conserv. Recycling*, 54(11), 821–831, doi: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2010.01.001>
- [2] Conley, D.J., Paerl, H.W., Howarth, R.W., Boesch, D.F., Seitzinger, S.P., Havens, K.E., Lancelot, C., Likens, G.E., 2009, "Controlling Eutrophication: Nitrogen and Phosphorus", *Science*, 323 (5917), 1014–1015, doi: <https://doi.org/10.1126/science.1167755>
- [3] Xie, M., He, D., Dong, Z., Cheng, Y., 2024, "Storage Scale Assessment of a Low-Impact Development System in a Sponge City", *Water*, 16(10), 77-84, doi: <https://doi.org/10.3390/w16101427>
- [4] Gülbaz, S. ve Kazezyılmaz-Alhan, C.M., 2014, "Investigating Effects of Low Impact Development on Surface Runoff and TSS with a Calibrated Hydrodynamic Model", *La Houille Blanche*, 100(3), 77-84, doi: <https://doi.org/10.1051/lhb/2014031>
- [5] Gülbaz, S., Kazezyılmaz-Alhan, C.M., 2012, "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)*, Ankara, Türkiye.
- [6] Jia, H., Yao, H., Tang, Y., Yu, S., Field, R., ve Tafuri, A., 2015, "LID-BMPs Planning For Urban Runoff Control and The Case Study in China", *Journal of Environmental Management*, 149, 65-76, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2014.10.003>
- [7] Ekmekçioğlu, Ö., Yılmaz, M., Özger, M., Tosunoğlu, F., 2021, "Investigation of the Low Impact Development Strategies for Highly Urbanized Area via Auto-Calibrated Storm Water Management Model (SWMM)", *Water Science & Technology*, 84 (9), 2194, doi: 10.2166/wst.2021.432
- [8] Gülbaz, S., Kazezyılmaz-Alhan, C.M., 2017, "Experimental investigation on hydrologic performance of LID with rainfall-watershed-bioretenion system", *Journal of Hydrologic Engineering*, 22 (1), D4016003, doi: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0001450](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001450)
- [9] Gülbaz, S., Kazezyılmaz-Alhan, C.M., 2017, "Hydrological model of LID with rainfall-watershed-bioretenion system", *Water Resources Management*, 31, 1931-1946, doi: <https://doi.org/10.1007/s11269-017-1622-9>
- [10] Gülbaz, S., Kazezyılmaz-Alhan, C.M., Coptý, N.K., 2015, "Evaluation of heavy metal removal capacity of

- bioretention systems”, *Water, Air, & Soil Pollution*, 226, article number 376, doi: <https://doi.org/10.1007/s11270-015-2640-y>
- [11] Gülbaz, S., Kazezyılmaz-Alhan, C.M., Temür, R., 2019, “Development of an empirical formula for estimation of bioretention outflow rate”, *Water Sa*, 45 (2), 209-215, doi: <https://doi.org/10.4314/wsa.v45i2.07>
- [12] Gülbaz, S., Kazezyılmaz-Alhan, C.M., 2017, “Düşük etkili kentleşme uygulaması: Biyotutmanın hidrolojik performansının deneysel modellerle araştırılması”, *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 23 (9), 1041-1048, doi: <https://doi.org/10.5505/pajes.2017.54531>
- [13] United States Environmental Protection Agency (USEPA), 2000, “Low Impact Development (LID), A Literature Review”. *EPA-841-B-00-005*. USEPA Office of Water: Washington, D.C
- [14] Gülbaz, S., Kazezyılmaz-Alhan, C.M., 2018, “Impact of LID implementation on water quality in Alibeyköy watershed in Istanbul, Turkey”, *Environmental Processes*, 5 (Suppl 1), 201-212, doi: <https://doi.org/10.1007/s40710-018-0318-3>
- [15] Gülbaz, S., 2020, “Water quality model for non-point source pollutants incorporating bioretention with EPA SWMM”, *Desalination and Water Treatment*, 164, 111-120, doi: <https://doi.org/10.5004/dwt.2019.24684>
- [16] Gülbaz, S., and Kazezyılmaz Alhan, C.M., Nasirzadehdizaji, R., and Dikici, M., 2017, “A calibrated hydrological model for Alibeyköy Watershed in Istanbul, Turkey incorporating LID implementation”, *Fresenius Environ. Bull.*, 26, 6112–6120.
- [17] Gülbaz, S., Kazezyılmaz-Alhan, C.M., Kaya, Y., 2018, “Düşük Etkili Kentleşme Uygulamalarının Yüzeysel Akışa Etkisi: İstanbul Üniversitesi Avcılar Kampüsü Örneği”, *İklim Değişikliği ve Çevre*, 3 (1), 45-50.
- [18] Zhang, X., Chen, L., Guo, C., Jia, H., ve Shen, Z., 2023, “Two-Scale Optimal Management Of Urban Runoff By Linking Lids And Landscape Configuration”. *Journal of Hydrology*, 620, 129332, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.129332>
- [19] Arjenaki, M. O., Sanayei, H. R. Z., Mahabadi, N. A., 2020, “Modeling and investigating the effect of the LID methods on collection network of urban runoff using the SWMM model (case study: Shahrekord City)”, *Modeling Earth Systems and Environment*, 7, 1-16, doi: <https://doi.org/10.1007/s40808-020-00870-2>
- [20] Bai, Y., Zhao, N., Zhang, R., Zeng, X., 2018, “Storm Water Management of Low Impact Development in Urban Areas Based on SWMM”, *Water*, 11, doi: <https://doi.org/10.3390/w11010033>
- [21] Lee, J. M., Park, M., Min, J-H., Kim, J., Lee, J., Jang, H. ve Na, E. H., 2022, “Evaluation of SWMM-LID Modeling Applicability Considering Regional Characteristics for Optimal Management of Non-Point Pollutant Sources” ,*Sustainability* 2022, 14, 14662, doi: <https://doi.org/10.3390/su142114662>
- [22] Zhu, X., Huang, B., Yao, B., Wang, S., Chen, S., & Zheng, J. (2012). Research for Combined Drainage Networks in Chuanfang river basin of Kunming City based on SWMM. *Applied Mechanics and Materials*, 170-173, 2380-2385. doi: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.170-173.2380>
- [23] Mancipe-Munoz N. A., Buchberger, S. G., Suidan M. T., Lu T., 2014, “Calibration of Rainfall-Runoff Model in Urban Watersheds for Stormwater Management Assessment”, *Journal of Water Resources Planning and Management*, 140(6), doi: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0000382](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000382)
- [24] Campisano, A., Catania, F. V., ve Modica, C., 2017, “Evaluating the SWMM LID Editor Rain Barrel Option for The Estimation of Retention Potential of Rainwater Harvesting Systems”, *Urban Water Journal*, 14(8), 876-881. doi: <https://doi.org/10.1080/1573062X.2016.1254259>
- [25] Sousa, B.J.D.O., Mattos, T.S., Taffarelo D., Mendiondo E.M., Vasconcelos, J.G., Oliveira, P.T.S., 2024, “Low-Impact Development Scenarios in terms of Construction Costs and Runoff Reduction”, *Journal of Hydrologic Engineering*, 29(1), 129809, doi: <https://doi.org/10.1061/JHYEFF.HEENG-6059>
- [26] Movahedinia, M., Shahdany, S.M.H., ve Barakhasi, F., 2022, “Integrated Approach for Low Impact Development Locating in Dense Residential Areas Based on Sustainable Development Criteria”, *Water Science & Technology*, 86(6), 1590, doi: 10.2166/wst.2022.290
- [27] Zhou, Q., Feng, J., ve Feng, W., 2023, “How Does Flow Connection Path and Vertical Spatial Layout of LIDs Affect Urban Runoff? A New LID Construction Method Based on Refined Landuse and Hydrologic Characterization”, *Journal of Hydrology*, 623, 129809, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.129809>
- [28] Rossman, L.A., 2010, “Storm Water Management Model, User’s Manual, Version 5”. Water Supply and Water Resources Division National Risk Management Research Laboratory, Cincinnati, Ohio, U.S. Environmental Protection Agency, *EPA/600/R-05/040*.

- [29] Huber, W.C. and Dickinson, R. E., 1988, “*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).
- [30] Ponce, V. M., 1989, “*Engineering Hydrology: Principles and Practices*”. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N. J.
- [31] USEPA, 2016, “Storm Water Management Model Reference Manuel, Vol III – Water Quality, *EPA/600/R-16/093*, National Risk Management Laboratory Office of Research and Development U.S Environmental Protection Agency, Cincinnati, OH.
- [32] Tu, M. C. ve Smith P., 2018, “Modeling Pollutant Buildup and Washoff Parameters for SWMM based on Land Use in a Semiarid Urban Watershed”, *Water, Air & Soil Pollution*, Volume 229, 121, <https://doi.org/10.1007/s11270-018-3777-2>
- [33] Chow, M. F., Yusop, Z., Toriman, M. E., 2012, “Modelling Runoff Quantity And Quality in Tropical Urban Catchments Using Storm Water Management Model”, *International Journal of Environmental Science and Technology*, 9, 737–748, doi: <https://doi.org/10.1007/s13762-012-0092-0>
- [34] Osheen, Mitthan L.K. & Deepak S.B., 2024, “Enhancing Urban Drainage Infrastructure Through Implementation of Low Impact Development Techniques”, *Water Resources Management*, doi: <https://doi.org/10.1007/s11269-024-03877-x>
- [35] Lee, J.M., Park, M., Min, J.-H., Kim, J., Lee, J., Jang, H., Na, E.H., 2022, “Evaluation of SWMM-LID Modeling Applicability Considering Regional Characteristics for Optimal Management of Non-Point Pollutant Sources”, *Sustainability*, 14, 14662, doi: <https://doi.org/10.3390/>