T.C.

TRAKYA ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ÜNİVERSİTE YERLEŞKESİNDE BİYOTUTMA SİSTEMLERİNİN KİRLETİCİ GİDERİMİ İÇİN SAHA PERFORMANSININ İNCELENMESİ

CANSU KÜP

YÜKSEK LİSANS TEZİ

UYGULAMALI BİLİMLER VE TEKNOLOJİ

ANABİLİM DALI

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Gökçen BAYRAK

EDİRNE-2022

CANSU KÜP'ün hazırladığı "**ÜNİVERSİTE YERLEŞKESİNDE BİYOTUTMA SİSTEMLERİNİN KİRLETİCİ GİDERİMİ İÇİN SAHA PERFORMANSININ İNCELENMESİ**" başlıklı bu tez, tarafımızca okunmuş, kapsam ve niteliği açısından **UYGULAMALI BİLİMLER VE TEKNOLOJİ** Anabilim Dalında bir **Yüksek Lisans Tezi** olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri (Ünvan, Ad, Soyad): İmza

Dr. Öğr. Üyesi Gökçen BAYRAK ……

Dr. Öğr. Üyesi Nilgün BECENEN ……

Dr. Öğr. Üyesi H. Candan ZÜLFİKAR ……

Tez Savunma Tarihi: 27/01/2022

Bu tezin Yüksek Lisans olarak gerekli şartları sağladığını onaylarım.

İmza

Dr. Öğr. Üyesi Gökçen BAYRAK
Tez Danışmanı

Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü onayı

Prof. Dr. Hüseyin Rıza Ferhat KARABULUT
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

T.Ü.FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

UYGULAMALI BİLİMLER VE TEKNOLOJİ ANABİLİM DALI YÜKSEK LİSANS PROGRAMI

DOĞRULUK BEYANI

Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında, tüm verilerin bilimsel ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini, kullanılan verilerde tahrifat yapılmadığını, tezin akademik ve etik kurallara uygun olarak yazıldığını, kullanılan tüm literatür bilgilerinin bilimsel normlara uygun bir şekilde kaynak gösterilerek ilgili tezde yer aldığını ve bu tezin tamamı ya da herhangi bir bölümünün daha önceden Trakya Üniversitesi ya da farklı bir üniversitede tez çalışması olarak sunulmadığını beyan ederim.

27 / 01 / 2022

Cansu KÜP

İmza

Yüksek Lisans Tezi

Üniversite Yerleşkesinde Biyotutma Sistemlerinin Kirletici Giderimi için Saha Performansının İncelenmesi

T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü

Uygulamalı Bilimler ve Teknoloji Anabilim Dalı

ÖZET

Sınırlı bir kaynak olan suyun verimli kullanımı, su miktar, kullanıcı ve kirleticilerin belirlenmesi, su ve suya bağlı ekosistemlerin korunması sürdürülebilir su kaynakları yönetimi ile mümkün olmaktadır. Dünyada sürdürülebilir su yönetimi sistemleri kapsamında birçok kavram ortaya çıkmıştır. Bu kavramlardan biri olan yeşil altyapı sistemleri yağmur suyunu düştüğü yerde yönetmek için bitki örtüsü ve toprağı kullanmakta, infiltrasyonu sağlamakta ve yayılı kaynaklardan gelen kirleticilerin giderilmesini sağlamaktadır.

Yeşil altyapı tekniklerinden olan yağmur bahçeleri, başka bir ifadeyle biyo-tutma alanları, yağmur sularının herhangi bir işlem uygulanmadan doğrudan yönlendirildiği ve üstünde yerli yurtlu bitki türlerinin dikildiği yüzeysel bölgeler olarak tanımlanmaktadır. Biyo-tutma; toprak, mikroorganizma ve bitkileri kullanarak kirleticileri uzaklaştıran, yüzeysel akışı azaltan, su kalitesi ve miktarını kontrol eden biyolojik, kimyasal ve fiziksel süreçler bütünüdür. Yağmur bahçeleri, yağmur suyu kanal sisteminin su ve kirletici yükünü (askıda katı madde, toplam azot, toplam fosfor, ağır metaller, yağ ve gres ve patojenik bakteriler) azaltmaktadır.

Bu çalışmada, Trakya Üniversitesi yerleşkelerinde kurulan üç adet yağmur bahçesinde, yağmur suyu ile yayılı kirletici kaynaklardan taşınan nitrit, nitrat, sülfat, posfat, bakır, çinko, kadmiyum ve kurşunun yağmur bahçelerinde tutulmasıyla elde edilen giderim verimlerinin belirlenmesi hedeflenmiştir. Yapay yağmur suyu hazırlanarak yağmur bahçeleri sulanarak giriş konsantrasyonu belli olan kirleticilerin biyotutma süreçleri ile hangi oranlarda giderileceği belirlenmiştir. Trakya Üniversitesi yerleşkelerinde kurulan yağmur bahçelerinde; ağır metal gideriminde Cu için %98,89-

99,92, Zn için %99,69-99,99, Cd için %99,96-100,00 ve Pb için %100,00 oranında, yüksek değerler hesaplanmıştır. Verim değerleri nitrit için -%152-36 arasında, nitrat için %-507,78-83,44 arasında geniş bir aralıkta değişim göstermiştir. Fosfat ve sülfat için ise giderim sözkonusu olmadığı gibi negatif giderim ile yüksek konsantrasyonlara ulaşıldığı görülmüştür. Sonuçların literatürdeki çalışmaların sonuçlarına uyumlu olduğu düşünülmektedir.

Yıl : 2022

Sayfa Sayısı : 95

Anahtar Kelimeler : Yeşil Altyapı, biyotutma, yağmur bahçesi, yayılı kirletici kaynaklar, kirletici giderimi, Edirne.

Master's Thesis

Investigation of Field Performance of Bioretention Systems for Pollutant Removal in University Campus

Trakya University Institute of Natural Sciences

Department of Applied Sciences and Technology

ABSTRACT

Efficient use of water, which is a limited resource, determination of water amount, users and pollutants, protection of water and water-dependent ecosystems is possible with sustainable water resources management. Many concepts have emerged within the scope of sustainable water management systems in the world. Green infrastructure systems, one of these concepts, use vegetation and soil to manage rainwater where it falls, provide infiltration and removal pollutants from diffuse sources.

Rain gardens, which are among the green infrastructure techniques, in other words, bioretention areas are defined as superficial areas where rainwater is directly directed without any treatment and native plant species are planted on it. Bioretention; It is a set of biological, chemical and physical processes that use soil, microorganisms and plants to remove pollutants, reduce surface runoff, and control water quality and quantity. Rain gardens reduce the water and pollutant load (suspended solids, total nitrogen, total phosphorus, heavy metals, oil and grease, and pathogenic bacteria) of the rainwater canal system.

In this study, it was aimed to determine the removal efficiencies obtained by keeping nitrite, nitrate, sulfate, phosphate, copper, zinc, cadmium and lead transported from polluting sources dispersed by rain water in three rain gardens established in Trakya University campuses. By preparing artificial rain water and irrigating the rain gardens, it was determined at what rate the pollutants with a certain inlet concentration would be

removed by bioretention processes. In the rain gardens established in Trakya University campuses; High values of heavy metal removal were calculated as 98.89-99.92% for Cu, 99.69-99.99% for Zn, 99.96-100.00% for Cd and 100.00% for Pb. Efficiency values varied in a wide range between -152-36% for nitrite and -507.78-83.44% for nitrate. For phosphate and sulfate, there was no removal, and it was observed that high concentrations were reached with negative removal. It is thought that the results are compatible with the results of the studies in the literature.

Year : 2022

Number of Pages : 95

Keywords : Rain Garden, Bioretention, Green Infrastructure, Sustainable Water Management

TEŞEKKÜR

Bu araştırma süresince her noktada değerli görüş, öneri ve desteklerini esirgemeyen tez danışmanım sayın Dr. Öğr. Üyesi Gökçen BAYRAK' a, içtenlikle çok teşekkür ederim.

Hayatım boyunca beni destekleyen, bugünlere gelmemde maddi ve manevi olarak her türlü desteğini hep hissetiğim yol göstericilerim annem Rukiye KÜP, babam Hasan KÜP ve eğitim hayatımda her zaman yanımda olan sevgili kardeşim Arzu KÜP'e, eşi sevgili abim Oğuz KÜP'e sonsuz teşekkür ederim. Yağmur bahçelerinin kurulum aşamasında sevgili arkadaşlarım ve ayrıca her zaman her konuda desteklerini sunan canım arkadaşım Rabia EFE'ye sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Bu tez, Trakya Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (Proje No: TÜBAP 2020/76 ve Proje No: TÜBAP 2021/72) tarafından desteklenmiştir. Trakya Üniversitesi Rektörlüğü'ne teşekkürlerimi sunarım.

Önemli tüm yazılarımı bir temenniyle bitiriyorum. Araştırmamı sürdürülebilir bir gelecek için suyun değerini koruyup, gelecek nesillere aktarması adına yeğenim Eylül KÜP'e armağan ediyorum.

Cansu KÜP
Çevre Mühendisi

İÇİNDEKİLER TABLOSU

ÖZET iv
ABSTRACT vi
TEŞEKKÜR viii
İÇİNDEKİLER TABLOSU ix
SİMGELER DİZİNİ xi
KISALTMALAR DİZİNİ xii
ŞEKİLLER DİZİNİ xiii
ÇİZELGELER DİZİNİ xv
BÖLÜM 1 15
GİRİŞ 1
1.1. Amaç ve Kapsam 3
1.1.1. Amaç 3
1.1.2. Kapsam 4
1.2. Kaynak Özetleri 5
BÖLÜM 2 9
KURAMSAL BİLGİLER 9
2.1. Yağmur Suyu Yönetimi 9
2.2. Yağmur Suyu Yönetimi Yaklaşımları 10
2.2.1. En İyi Yönetim Uygulaması (BMP) 10
2.2.2. Suya Duyarlı Kentsel Tasarım (WSUD) 10
2.2.3. Sürdürülebilir Kentsel Drenaj Sistemleri (SUDS) 10
2.2.4. Düşük Etkili Geliştirme (LID) 11
2.3. Yeşil Altyapı 11
2.4. Yeşil Altyapı Uygulamaları 15
2.5. Yeşil Altyapı Uygulamalarının Avantaj ve Dezavantajları 17
2.6. Yağmur Suyu Kirleticileri 19
2.7. Kirletici Giderim Süreçleri 23
2.8. Kirletici Giderim Verimleri 26

2.9. Kirletici Giderimini Etkileyen Etmenler 29
BÖLÜM 3 34
MATERYAL VE YÖNTEM 34
BÖLÜM 4 40
SONUÇLAR 40
4.1. Çalışma Alanı Özellikleri 40
4.1.1. Coğrafi Konum 40
4.1.2. İklim 41
4.1.3. Hidroloji 42
4.1.4. Toprak Yapısı 43
4.1.5. Demografik Yapı 43
4.1.6. Edirne Kent Merkezi Atıksu Uzaklaştırma, Arıtma ve Yağmur Suyu Tesisleri 43
4.1.7. Edirne Kent Merkezi Açık Yeşil Alanları 44
4.2. Yağmur Bahçeleri için Yer Seçimi 45
4.3. Yağmur Bahçelerinin Boyutlandırılması 46
4.3.1. Makedonya Yerleşkesi 48
4.3.2. Balkan Yerleşkesi 49
4.3.3. Teknopark Bahçesi 50
4.4. Yağmur Bahçesi Bitki Seçimi 51
4.5. Yağmur Bahçelerinin Kurulum Aşaması 52
4.6. Yağmur Bahçelerinde Su Analizleri 55
BÖLÜM 5 59
TARTIŞMA VE SONUÇ 59
KAYNAKLAR 62
EK 72
ÖZGEÇMİŞ 79
TEZ ÖĞRENCİSİNE AİT TEZ İLE İLGİLİ BİLİMSEL FAALİYETLER 80

SİMGELER DİZİNİ

cm	: Santimetre
CO_2	: Karbondioksit
ha	: Hektar
kg	: Kilogram
km	: Kilometre
km^3	: Kilometreküp
lt	: Litre
m	: Metre
mm	: Milimetre
m^2	: Metrekare
m^3	: Metreküp
t	: Ton
%	: Yüzde

KISALTMALAR DİZİNİ

AKM : Askıda Katı Madde

BMP : Best Management Practices / En İyi Yönetim Uygulamaları

BOİ : Biyolojik Oksijen İhtiyacı

Cu : Bakır

Cd : Kadmiyum

ÇF : Çözünür Fosfor

EPA : Environmental Protection Agency

GI : Yeşil Altyapı

KOİ : Kimyasal Oksijen İhtiyacı

LID : Düşük Etkili Geliştirme

MGM : Meteoroloji Genel Müdürlüğü

Pb : Kurşun

ppb : Milyarda bir

ppm : Milyonda bir

SuDS : Sustainable Urban Drainage Systems

TKN : Toplam Kjeldahl Azotu

TP : Toplam Fosfor

TÜTAGEM : Trakya Üniversitesi Teknoloji Araştırma ve Geliştirme Uygulama ve Araştırma Merkezi

WSUD : Water Sensitive Urban Design

Zn : Çinko

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Bütünleşik su yönetimi 2
Şekil 1.2. Kentleşmenin yağış üzerindeki etkileri 3
Şekil 2.1. Yeşil altyapı tanımı, ölçek ve ölçütleri 13
Şekil 2.2. Havza ölçeğinde yeşil altyapı uygulamaları 15
Şekil 2.3. Yağmur bahçesi örneği 17
Şekil 2.4. Yağmur bahçesinde su emilim süreçlerini gösteren diyagram 24
Şekil 2.5. Biyotutma sistemi bileşenleri 24
Şekil 2.6. Biyotutma sistemlerinde azot giderim süreçleri 31
Şekil 3.1. Tez çalışması akış şeması 35
Şekil 3.2. (a) Yapay yağmur suyu çözeltisi hazırlanırken kullanılan tuzlar, (b) Tuzların hassas terazide tartımı, (c) Çözelti hazırlanırken kullanılan tuzlar, (d) Laboratuvar ortamında steril beher içerisinde çözeltinin hazırlanması 38
Şekil 4.1. Yağmur bahçelerinin kent içindeki konumu 41
Şekil 4.2. Edirne ili aylara ait ortalama sıcaklık grafiği (MGM, 2019) 42
Şekil 4.3. Edirne ili aylara ait ortalama yağış grafiği (MGM, 2019) 42
Şekil 4.4. Edirne kent merkezi yıllara göre nüfus dağılımı (TUİK, 2019) 43
Şekil 4.5. Toprak tekstür muayenesi 45
Şekil 4.6. Yağmur bahçelerinin yapılara uzaklığı 46
Şekil 4.7. (a) Google Map üzerinden çim alan, (b) Google Map üzerinden kiremit yüzey alanı, (c) Google Map üzerinden tuğla döşeme tretuvar alanı 48
Şekil 4.8. (a) Google Map üzerinden metal çatı yüzey alan, (b) Google Map üzerinden çim alan 49
Şekil 4.9. (a) Google Map üzerinden kiremit yüzey alanı, (b) Google Map üzerinden çim alan 50
Şekil 4.10. (a) Rosa sp., (b) Salvia officinalis, (c) Chrysanthemum sp. (ç) Gaura lindheimeri, (d) Canna sp., (e) Iris germanica (f) Imperata cylindrica, (g) Allium sp., (ğ) Salvia rosmarinus (h) Lavandula sp. (ı) Hydrangea macrophyll 52

Şekil 4.11. Yağmur bahçesi bileşenleri 53
Şekil 4.12. (a) Yağmur bahçesinin şeklinin belirlenmesi, (b) Yağmur bahçesinin istenilen derinliğe göre açılması (c) Yağmur bahçesinin su geçirmez jeomembran ile kaplanması (ç) Yağmur bahçesine geçirgen jeotekstil kaplı PVC delikli drenaj borusunun yerleştirilmesi, (d) Yağmur bahçesinin toprakla doldurulması (kum, turba, silt ve gübre karışımı) (e) Yağmur bahçesinin bitkilendirilmesi, (f) Teknopark bahçesi yağmur bahçesi (g) Balkan yerleşkesi yağmur bahçesi, (ğ) Makedonya yerleşkesi yağmur bahçesi.....54

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 1.1. Bazı ağırmetallerin biyotutma alanı giriş ve çıkış konsantrasyonları (µg/l) 8
Çizelge 2.1. Yeşil altyapı uygulamalarının özeti 15
Çizelge 2.2. Yağmur suyu kirleticileri 20
Çizelge 2.3. Yağmur suyundaki ağır metal konsantrasyonları 22
Çizelge 2.4. Yağmur suyundaki kirletici konsantrasyonları. 23
Çizelge 2.5. Sahada uygulanan biyotutma sistemlerinde ağır metal giderim verimleri (%) 28
Çizelge 2.6. Sahada uygulanan biyotutma sistemlerinde kirletici giderim verimleri (%) 28
Çizelge 3.1. Yapay yağmur suyunda hedeflenen kirletici konsantrasyonları 37
Çizelge 3.2. Yapay yağmur suyu oluşturmak için kullanılan maddeler 37
Çizelge 3.3. Yapay yağmur suyu oluşturulurken kullanılan tuz miktarları 37
Çizelge 4.1. Edirne Merkez İlçe'de yıllara göre aylık toplam yağış miktarları (MGM, 2022) 42
Çizelge 4.2. Yağmur bahçesi yağmur suyu miktarları 47
Çizelge 4.3. Yağışın akışa çevrilme katsayıları (Doğangönül ve Doğangönül, 2008) 47
Çizelge 4.4. Yağmur bahçesi bitki düzeni 51
Çizelge 4.5. Yağmur bahçesi detayları 53
Çizelge 4.6. Yağmur bahçelerinde süzüntü suyu analiz sonuçları **(**ppm**)** ve giderim verimleri **(**%**)** 57
Çizelge 4.7. Yağmur bahçelerinde en düşük-en yüksek-ortalama giderim verim değerleri **(**%**)** 58

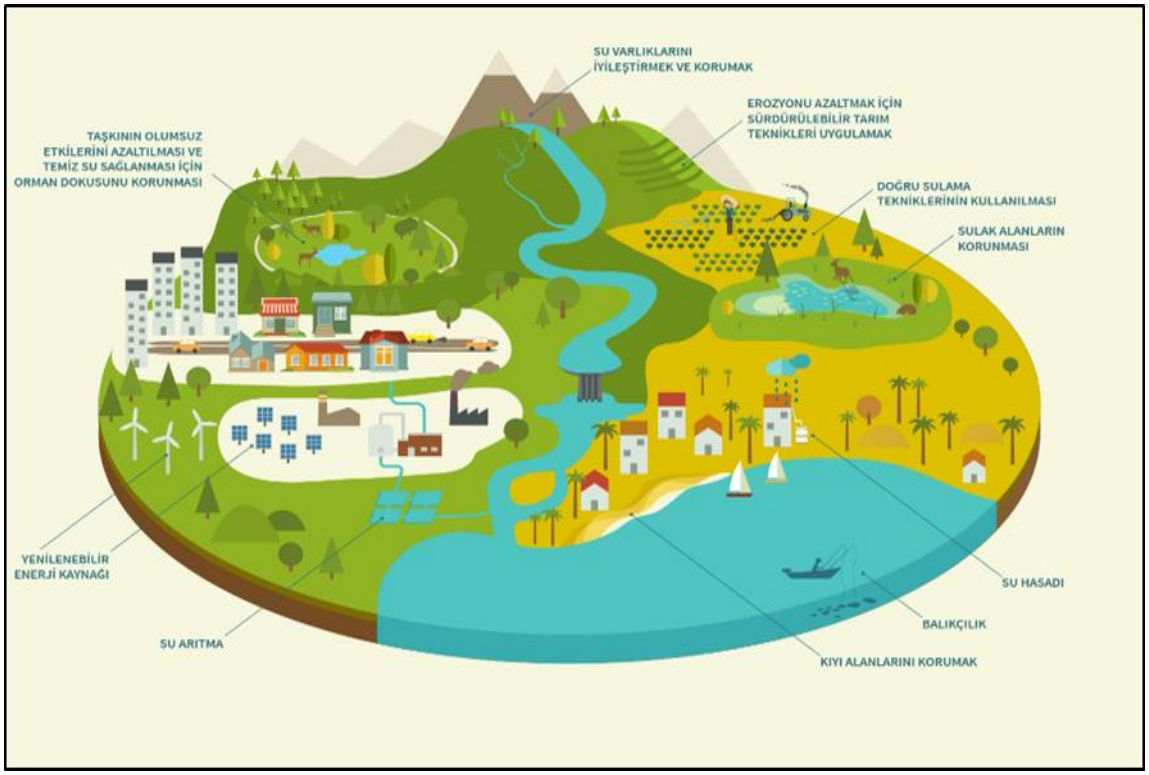
BÖLÜM 1

GİRİŞ

Son yıllarda, hızlı kentleşme ile birlikte, kent çevresinde veya kırsal alanlarda var olan birçok doğal alan, arazi gereksinimleri ile birlikte yok olmuş veya işlevselliğini kaybetmiştir. Bu değişimler, kentsel alandaki tarımsal ve ormanlık alanlarda özellikle daha etkin olmuştur. Ekolojik temelli arazi planlamasının olmaması, çevresel sorunların artmasına, ekolojik fonksiyonlar ve süreçlerde olumsuz etkilere sebep olmuştur.

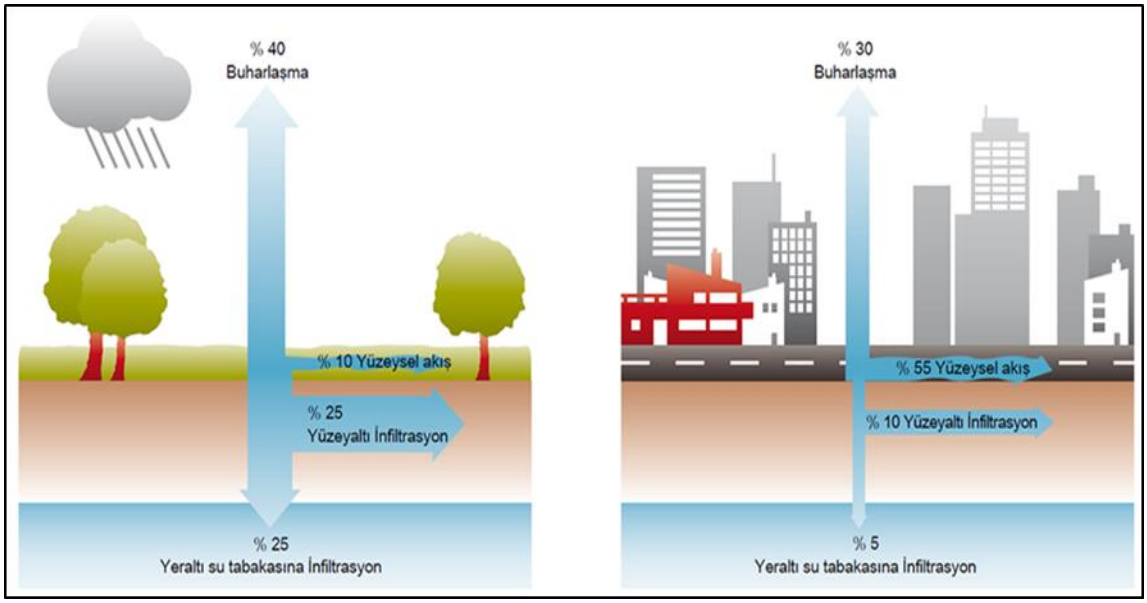
Dünyada iklim değişikliğinin oluşturduğu olumsuz etkiler, kentlerde aşırı yağış sebebiyle görülen taşkınlar, kuraklık ve çevre kirliliğine yol açmaktadır. Kentlerin plansız gelişimi, nüfus artışı ve yanlış ve amaç dışı arazi kullanımları yolu ile suyun doğal döngüsünün değişmesi, kentlerde yaşanan bu olayların asıl nedeni olarak görülmektedir. Gelecekte olması beklenen ciddi su krizinin önlenebilmesi için; sürdürülebilir bütünleşik su yönetim sistemlerinin kurulması gerekmektedir (Yiğit, Yıldız ve Çabuk, 2015).

Sürdürebilir bütünleşik su yönetim sistemi; içme ve kullanma suyu, tarımal ve endüstriyel kullanma suyu, atık su, yağış kaynaklı su ve doğal su rezervleri (göl, dere, nehir, sulak bölge, deniz, okyanus vb.) gibi alanları içermektedir. Şekil 1.1'de bütünleşik su yönetimi şeması gösterilmektedir (UNEP, 2012). Kentleşme ile yaşanan birçok çevresel sorun, çevre dostu planlama yöntemlerinin geliştirilmesi, sürdürülebilir kentlerin oluşturulması açısından önem arz etmektedir. Bütünleşik su yönetiminin önemli bir parçası olan yağmur suyu yönetiminde son yıllarda yaygınlaşan yeşil altyapı sistemleri ise, bu değişimler ve sorunlara çözüm sunacak niteliktedir (Shakouri, 2016).



Şekil 1.1. Bütünleşik su yönetimi (UNEP, 2012)

Yapılaşma ve geçirimsiz yüzeylerin kentsel alanlarda artmasıyla birlikte, yağmur sularının yönetimi ve yer altı su kaynaklarına iletilmesi çok büyük bir sorun oluşturmaktadır. Kentlerde yağış rejimi ile gelen yağmur suları için toprak yüzeyine elverişli düzeyde infiltrasyon (sızma) ortamı sağlanamamaktadır. Ayrıca, evapotranspirasyon (buharlaşma) azalmakta, birikerek artan yağış suyu, geçirimsiz zemin üzerinde akışına devam ederken deniz seviyesine yakın noktalarda taşkınlara neden olmaktadır (Butler ve Davies, 2004). Şekil 1.2.'de kentleşmenin yağış üzerindeki etkileri gösterilmektedir. Ayrıca, yüksek rejimli yağışın olduğu dönemlerde, geçirimsiz yüzeylerdeki su akışının kentsel kanalizasyon sistemine yönlendirilmesi ile kirletici maddeler yüzeysel su kaynaklarına taşınmaktadır. Bu nedenle, konuyla ilgili sürdürülebilir çözümlerin bulunması bir gereksinim haline gelmiştir. Son yıllarda, yapılan birçok araştırma bu gereksinimin önemini vurgulamaktadır (Pomeroy, 2007; Pitt vd., 2008; Onat, 2013; Kirmencioğlu, 2015, Erdoğan, 2017).



Şekil 1.2. Kentleşmenin yağış üzerindeki etkileri (UNEP, 2012)

Yeşil altyapı planlama stratejileri ve uygulama teknikleri özellikle doğal kaynakların korunması ve kentsel yaşam kalitesinin arttırılması ve iklim değişikliğine uyum sürecinde önemli araçlar haline gelmektedir. Dünya'da yeşil altyapı konusunda, faklı ölçekler ve disiplinlerde yapılan çalışmaların yaygınlaştığı, ancak ülkemizdeki çalışmaların son on yılda başladığı görülmektedir. Yeşil altyapı sisteminin en önemli bileşenlerinden olan biyotutma alanları, kentler için küçük süngerler olarak hizmet etmektedir. Bu sistemler, yağmur suyu akışını azalttığı, kirliliği gideriminde etkin olduğu ve su döngüsünü desteklediği için büyük önem taşımaktadır. Ancak, biyotutma sistemlerinin kirletici giderimi için performans verilerinin, özellikle saha ölçeğinde yapılan çalışmalarda, laboratuvar ölçeğinde yapılan çalışmalara oranla daha az olduğu görülmektedir.

1.1. Amaç ve Kapsam

1.1.1. Amaç

Yağmur suyunun yüzeysel akışıyla yayılı kirletici kaynaklardan taşınan kirletici maddelerin (azot, fosfor, askıda katı madde, ağır metaller vb.) biyotutma süreçleriyle giderilmesinin incelenmesi amacıyla yapılan bu çalışmada, Edirne ilçe merkezinde yarı-özel açık-yeşil alanlar içermesi nedeniyle Trakya Üniversitesi yerleşkelerinde seçilen üç farklı alanda yağmur bahçeleri kurulmuştur. Bir yıllık bir süreçte, yağmur bahçelerine

akan yağmur suyundaki kirleticilerin bitkiler ve topraktaki tutulma miktarlarını belirlemek amacıyla drenaj borularıyla toplanan yağış suyu ve sızıntı suyunda nitrit, nitrat, fosfat, sülfat, bakır, çinko, kadmiyum, kurşun miktarlarının belirlenmesi ve bahçelerin bu kirletici giderme verimlerinin belirlenmesi amaçlanmıştır.

Yüksek lisans tezi kapsamında; yağmur suyu yönetiminde yeşil altyapı yaklaşımları ve uygulamaları ne olmalıdır? ve yeşil altyapı uygulamalarından olan yağmur bahçelerinin kirletici giderim verimleri saha ölçeğinde nasıl değişmektedir? soruları irdelenmektedir. Tez çalışması ile ulusal ve uluslararası ölçekte hem coğrafi olarak yeni bir alanda çalışma yapılması hem de saha ölçeğindeki çalışmalara katkıda bulunulması amaçlanmıştır.

1.1.2. Kapsam

180000 nüfusa sahip Edirne'de, tarım alanlarının ve dere havzalarının üzerinde genişleyen yerleşim alanlarının artışına paralel olarak, yağış, drenaj suyu ve atıksuların yetersiz drenajı, çevre ekonomisi açısından önemli sorunlara ve kayıplara neden olmaktadır. Yağmur suyunun neden olduğu sorunları düşük maliyetlerle ortadan kaldırabilmek, gri altyapının yağmur suyu miktarını ve kirletici yükünü azaltmak gibi faydaları olan yeşil altyapı tekniklerinin sahada uygulanabilirliğinin incelenmesi ve özellikle yağmur suyu ile yayılı kirletici kaynaklardan taşınan çeşitli inorganik kirleticilerin giderim veriminin belirlenmesi amacıyla Edirne kent merkezinde bulunan Trakya Üniversitesi'ne ait yerleşkelerde üç adet yağmur bahçesi kurulmuştur. Yağmur bahçelerinin yer seçiminde, araç trafiğinin, yaya mekanlarının ve kamusal kullanımların olduğu açık-yeşil alanlar incelenmiş ve bu alanların fiziksel çevre koşulları ile toprak ve su özellikleri dikkate alınmıştır.

Yağmur bahçelerinde farklı derinlik ve miktarlarda biyotutma ortamları hazırlanarak, iklim ve toprak yapısına uygun yerel bitkiler seçilmiştir. Bu kapsamda, öncelikle yer seçiminin yapılması aşamasında, daha sonra bahçelerin kurulması ve kirletici gideriminin incelenmesi aşamalarında; bölgenin topoğrafik, meteorolojik, hidrolojik yapısı, arazi kullanımı, toprak yapısı, mevcut altyapı durumu, yapılaşmış alanlarda geçirimli ve geçirimsiz yüzey vb. analizleri yapılmıştır. Analizler sonucunda, yağmur bahçesine akacak suyun miktarı, kalitesi, farklı derinlikteki biyotutma ortamlarının karışım oranları, bitki türleri belirlenmiştir.

Araştırmanın birinci bölümü olan “Giriş” bölümü, “Amaç ve Kapsam” ve “Kaynak Özetleri”ni içermektedir. Bu bölümde, araştırmanın ana yapısı açıklanmıştır.

İkinci bölüm olan “Kuramsal Bilgiler”de; yağmur suyu yönetimi ve yaklaşımları incelenmiştir. Daha sonra, yeşil altyapı uygulamaları ve yağmur suyu kileticilerine değinilmiştir. Son olarak, kirletici giderim süreci ve kirletici giderimini etkileyen etmenler hakkında bilgiler ele alınmıştır.

Üçüncü bölüm “Materyal ve Yöntem” bölümünü oluşturmaktadır. Bu bölüm içeriğinde; araştırmaya ait materyalleri ve ortaya konulan yöntemlere ilişkin açıklamalar yer almaktadır.

Dördüncü bölümde çalışma alanı ve çevresinin doğal özellikleri hakkında bilgiler verilmektedir.

Beşinci bölüm olan “Bulgular”da ise; Edirne İli Merkez İlçede, Trakya Üniversitesi Balkan ve Makedonya Yerleşkelerinde ve Trakya Teknopark bahçesinde yağmur suyu yönetimi kapsamında, yeşil altyapı tekniği olan yağmur bahçesi için havza ölçeğinde hesaplamalar ele alınarak, kurulum süreçlerine ve süzüntü suyu analiz sonuçlarına yer verilmiştir.

Altıncı bölüm olan “Tartışma ve Sonuç” bölümünde, çalışmanın her aşaması değerlendirilmiş, elde edilen analiz sonuçları literatürde yer alan çalışma sonuçlarıyla karşılaştırılarak önerilerde bulunulmuştur.

1.2. Kaynak Özetleri

Jiang vd. (2017), infiltrasyonun olduğu ve olmadığı 24 m^2’lik iki yağmur bahçesi ve aynı zamanda karayolu yeşil kuşağında yer alan iki biyohendek inşa etmişlerdir. 20 cm derinliği olan 50 cm toprak içeren yağmur bahçesinin alt kısmı, geçirgen jeotekstile sarılmış ve bir çakıl tabakası ile kaplanmış PVC delikli drenaj borusu (d = 75 mm) ve su geçirmez jeomembran ile döşenmiştir. Kil, silt ve kum oranları sırasıyla %8.80, %79.9 ve %11.31'dir. Yüzey topraktaki TN, TP ve toplam organik karbon (TOC) içeriği sırasıyla 7.11 g/kg, 5.17 g/kg ve %1.53 olarak belirlenmiştir. Su kalitesi otomatik örnekleyici yağmur bahçelerine kurulmuş, akış oluştuğunda otomatik örnekleyici 0, 5, 10, 20, 30, 60, 90 dakikalarda 500 ml örnekleme yapmıştır. 24 yağış olayındaki su kalitesi verilerine göre, infiltrasyonlu yağmur bahçesi hariç diğer üç sistemde kirletici giderim

değerlerinin %39.8-59.73, %61.06-72.66 ve %76.67-88.16 olduğu belirtilmiştir. İzlenen kirlilik yükü verilerine dayanarak, infiltrasyonsuz yağmur bahçesi ve Biyohendek-B için yıllık kirletici yük gideriminin % 75,45 ve% 90,7 olduğu tahmin edilmiştir (Jiang, Li, Li, Li ve Chen, 2017).

Gülbaz vd. (2015) yaptıkları çalışmada; çeşitli biyotutma ortamlarının sorpsiyon özelliklerini ayrı ayrı değerlendirmek için Cu, Pb ve Zn iyonları içeren karışık ağır metal çözeltileri ile kolon deneyleri gerçekleştirmişlerdir. Test edilen biyotutma medyası malç, torf, bitkisel toprak, kum ve çakıldır. Katı-çözelti oranı kütle ile 1:5 olup 48 saat sonra, her bir şişeden 50 mL örnek alınmış ve atomik absorpsiyon spektrofotometresi kullanılarak Zn, Pb ve Cu için analiz edilmiştir. Toprak, kum ve çakıl, 6 örnek, torf ve bitkisel toprak için toplam 36 örnek analiz edilmiştir. Kolon deneyleri 127 günlük bir süre boyunca sürekli olarak gerçekleştirilmiştir. Deneyin başında, daha sık örnekleme (12 saat içinde bir kez) yapılmış; daha sonra örnekleme süresi 24 saate, son olarak 48 saate yükseltilmiştir. Kesikli deneylerden elde edilen sonuçlarda, torf, malç ve bitkisel toprak için yüksek metal tutma kapasiteleri belirlenmiştir. Tutma kapasitesi sırasıyla torf, bitkisel toprak, malç, kum ve çakıldır. Metal tutulumu yüzdeleri sırasıyla Pb>Cu>Zn olarak bulunmuştur. Farklı biyotutma kolon ortamlarında denge koşullarına ulaşmak için gereken süre, incelenen her bir metal için 1 ila 6 saat arasında değişmiştir. Bu, sorpsiyonun hızlı bir süreç olduğunu gösterir. Ayrıca, ağır metal konsantrasyonları tipik olarak yüksek olduğunda, biyotutmanın yağmur suyu akışının ilk anlarında etkili olacağı anlamına gelmektedir. Kolon test sonuçları, farklı biyotutma ortamlarının hidrolik iletkenliği ve ağır metalin tutulmasını önemli ölçüde etkilediğini göstermektedir. Torf içeren kolonlar, ağır metallerin tutulmasında en etkili bulunmuştur. Cu ve Pb'nin tüm kolonlarda neredeyse tamamen adsorbe edildiği, Zn tutulumunun 127 gün sonra tamamlandığı belirtilmektedir (Gülbaz, Kazezyılmaz-Alhan ve Nadim, 2015).

Willard (2014), ilk akış azalmasını, toplam askıda katı maddeyi ve besi maddelerinini uzaklaştırmayı belirlemek için bir biyotutma sisteminin etkinliğini 5 ay boyunca Blacksburg, Virginia, ABD'de izlemiştir. Çalışmanın sonuçları, biyotutma ortamının kurulumdan sonra azot ve fosfor biriktirmediğini ve biyotutma sisteminin, TSS, TN, TP, toplam koliformlar, *E. coli* ve enterokok yüklerinin yanı sıra akış hacmini ve tepe akış hızlarını azaltmada etkili olduğunu göstermiştir. Uzun süreli işlemlerden sonra bile,

biyotutma sistemlerinin hidrolik iletkenliğinin iyi performans gösterdiği sonucuna varılmıştır (Willard, 2014).

Søberg vd. (2014a), laboratuvar pilot ölçekli biyotutma filtrelerinde metalin uzaklaştırılması üzerindeki sıcaklık ve tuz etkisini belirlemek için yaptıkları çalışmada, çözünmüş Zn ve Cd'nin yüksek oranda uzaklaştırıldığını (>%90), sistemin çözünmüş Cu ve Pb'nin uzaklaştırılmasında daha az etkili olduğunu belirlemişlerdir (Søberg, Blecken, Viklander ve Hedström, 2014a).

Blecken vd. (2011), %90 kum içeren filtre malzemesi kullanıldığında çözünmüş Zn ve Cd için >%99 ve çözünmüş Cu için >%60 giderim verimi gözlemlemişlerdir (Blecken, Marsalek ve Viklander, 2011).

New Hampshire'da yapılan çalışmada Zn, TPH, TSS için yüksek giderim verimleri elde edilirken başka bir biyotutma çalışmasında NO_3–N için düşük verim elde edilmiştir. North Carolina'da ise metal giderimleri yüksek olup besi maddelerini çeşitli giderim verimleri gözlemlenmiştir (Roseen, Ballestero, Houle, Avelleneda, Wildey ve Briggs, 2006).

Dietz ve Clausen (2005) yaptıkları kolon deneyinde fosforun % 85inin biyotutma ile giderildiğini, ancak kolonlardaki organik madde içeriğinin artması ile ortofosfat oluşumu nedeniyle giderim veriminin azaldığını (yaklaşık %40) belirtmişlerdir (Dietz ve Clausen, 2005).

İlk alan araştırması Maryland (ABD)'de biri Largo'da, diğeri Greenbelt'de olmak üzere iki farklı yağmur bahçesi alanına yapay akış uygulanarak yapılmıştır. Greenbelt'de Pb, Cu ve Zn için %95 den fazla giderim verimi, Largo'da diğerine göre daha az giderim gözlemlenmiştir. Besi maddeleri giderimi için benzer durum gözlemlenmiştir (Davis, Shokouhian, Sharma, Minami ve Winogradoff, 2003).

Davis vd. (2001), laboratuvar prototiplerinde yapılan araştırmalarda Pb, Cu ve Zn için %90 dan fazla giderim verimleri elde edildiğini, %68 TKN giderimi, %87 NH_3 giderimi ve %24 Nitrit+Nitrat azotu giderimi gözlendiğini belirtmişlerdir (Davis, Shokouhian, Sharma ve Minami, 2001). Maryland Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Maryland College Park'taki Stormwater Lab'de yapılan bir çalışmada, su kalitesi ve sızma verilerini toplamak ve analiz etmek için iki farklı ebatta biyotutma prototipi inşa edilmiş; çalışmanın ikinci aşaması Greenbelt, Maryland'deki Beltway Plaza'nın

otoparkında bulunan mevcut bir biyotutma tesisinde gerçekleştirilmiştir. Saha çalışmasında gözlenen giderim verimlerinin (Cu %97, Pb >%95, Zn >%95, P %65, TKN %52, NH_4 %92, NO_3 %16, TN %49) laboratuvarda oluşturulmuş iki biyotutma sistemi için gözlemlenen oranlara karşılık geldiği, giriş suyunun konsantrasyonun ikiye katlamasının veya yarıya indirmenin giderim verimini etkilemediği belirtilmektedir (USEPA, 2000).

Inglewood Plaza otoparkındaki iki biyotutma alanından birinde gerçekleştirilen bir çalışmada, giderim veriminin toplam bakır için ortalama %43, toplam kurşun için %70 ve toplam çinko için %64 olduğu, çözünmüş metaller için giderim veriminin %5-14 daha yüksek olduğu belirtilmektedir. Fosfor gideriminin %87, TKN gideriminin %67 ve nitrat gideriminin %15 verimle gerçekleştiği not edilmiştir (USEPA, 2000).

Çizelge 1.1'de biyotutma sistemleri tarafından bakır (Cu), kurşun (Pb) ve çinko (Zn) giderme performansı hakkındaki çalışmaların sonuçları özetlenmektedir.

Çizelge 1.1. Bazı ağırmetallerin biyotutma alanı giriş ve çıkış konsantrasyonları (µg/l)

Filtre Türleri	Cu		Pb		Zn		Kaynaklar
	Giriş	Çıkış	Giriş	Çıkış	Giriş	Çıkış	
Alan Ölçeği	56.8	1.9	41.4	10.2	98.3	20.6	Glass ve Bissouma (2005)
Alan Ölçeği	10	3-4	58	<2-4	107	44-48	Davis (2007)
Alan Ölçeği	_	_	_	_	72	17	Hunt, Smith, Jadlocki, Hathaway ve Eubanks (2008)
Alan Ölçeği	19	16	6	3	71	12	Li ve Davis (2009)
Alan Ölçeği	13	9	<2	<2	15	3	
Mahalle Alanı	60	5	110	7	330	13	Hatt, Fletcher ve Deletic (2009)
Otopark	10	6	6	2	100	13/15/30	
Filtre ortamı olarak çamur	241	4.5	90.3	0.2	1127	2.1	

BÖLÜM 2

KURAMSAL BİLGİLER

2.1. Yağmur Suyu Yönetimi

Yeşil alanların azalması, özellikle kentsel alanlarda geçirimsiz yüzeylerin de artmasıyla infiltrasyonun ve evapotranspirasyonun azalmasına neden olmaktadır. Bu durumda, yüzeysel akış suyu miktarı artmakta ve taşkın sayısında artma gözlenmektedir (Butler ve Davies, 2004; Dunnett ve Clayden, 2007). İnfiltrasyonun azalması, yüzeysel akış suyunun artması ve kalitesinin bozulması nedeniyle birleşik ve ayrık kanalizasyon sistemleri ve ilintili altyapı maliyetlerinin artmasının yanında alıcı ortamların kalitesi de bozulmaktadır. Yağmur suyunun yönetimi için su kaynakları yönetiminin bir parçası olarak sürdürülebilir kentsel yağmur suyu yönetimi kavramı ortaya çıkmaktadır (Demir, 2012).

Yeşil altyapı ile yağmur suyu akışını ve gri altyapı yükünü azaltmak için en uygun yolun yağmur suyunun yerinde kontrolü olduğu giderek artan bir şekilde kabul edilmektedir. Yağmur suyu ve eriyen kar sularının kanalizasyon sistemine girmeden önce yerinde toprak ve bitki örtüsü ile tutulması ve doğal hidrolojik sürecin devam ettirilmesi yeşil altyapı uygulamalarının temel prensibidir. Ekonomik zorluklar ve şehirlerin karşılaştığı kaynak kısıtlamaları göz önüne alındığında, "yeşil yağmur suyu altyapısı" kavramları ve uygulamaları, yağmur suyu akışını yönetmek ve kanalizasyon taşmasını azaltmak için uygun maliyetli ve sürdürülebilir bir çözüm arayan şehirler tarafından yağmur suyu yönetimine uyarlanmıştır. Yağmur suyu akışının azaltılmasına ek olarak, şehirler ve topluluklar daha temiz hava kalitesi, azaltılmış kentsel ısı adası etkisi, iklim

değişikliğinin azaltılmış etkileri, artan mülk değeri, gelişmiş şehir estetiği ve toplum süreci açısından kentsel yeşil altyapı sistemlerinden birçok fayda sağlanabilmektedir (Kambites ve Owen, 2006; Shaojing, 2011; Abunnasr, 2013).

2.2. Yağmur Suyu Yönetimi Yaklaşımları

2.2.1. En İyi Yönetim Uygulaması (BMP)

Hedeflenen yağmur suyu akış bileşenlerinin, kirleticilerin ve kirleticilerin alıcı sulara ulaşmasını ortadan kaldırmak, azaltmak, geciktirmek veya önlemek için bir araç, uygulama veya yöntemdir. En İyi Yönetim Uygulamaları (BMP'ler), özellikle ABD'de yaygın bir yaklaşımdır ve yağmur suyu akışının niceliği ve kalitesi için kontrol araçlarına dayanır. ABD'de her eyaletin çevre ile ilgili, özellikle iklim, toprak tipi ve kentsel gelişme özellikleri ile ilgili bilgi ve gözlemleri içeren kendi rehber kitabı vardır (Perini ve Sabbion, 2017).

2.2.2. Suya Duyarlı Kentsel Tasarım (WSUD)

Suya duyarlı kentsel tasarım (WSUD) terimi 1990'larda Avustralya'da kullanılmaya başlanmıştır. Daha sonra su kaynaklarını korumak için Birleşik Krallık ve Yeni Zelanda'da benimsenen bir yaklaşımdır. Bu yaklaşımda kentsel gelişimin çevre üzerindeki hidrolojik etkilerinin kentsel planlama ve tasarım yoluyla en aza indirilmesi amaçlanmaktadır (Fletcher vd., 2015):

- Su dengesini yönetmek (yeraltı suyu ve akarsu akışları ile sel hasarı ve su yolu erozyonu dikkate alınarak),
- Su kalitesini korumak ve mümkün olduğunca geliştirmek (sediman, nehir kıyısındaki bitki örtüsünün korunması ve kirleticilerin yüzey ve yeraltı sularına kontaminasyonunun en aza indirilmesi dahil),
- Su korumasını teşvik etmek (yağmur suyunun toplanması ve atık suyun geri dönüştürülmesi ve sulama gereksinimlerinin azaltılması),
- Suyla ilgili çevresel ve rekreasyonal fırsatları sürdürmek.

2.2.3. Sürdürülebilir Kentsel Drenaj Sistemleri (SUDS)

Birleşik Krallık'ta yağmur suyu yönetimi yaklaşımının değiştirilmesine yönelik gelişmeler, 1980'lerin sonlarında başlamış ve 1992'de, bir dizi teknik kontrol seçeneği

hakkında rehberlik sağlayan "Kentsel Akışın Kontrolü Kapsamı" yönergeleri yayınlanmıştır. 1990'larda, yeni gelişmelerde yağmur suyu BMP'lerinin uygulanması için İskoç Çevre Koruma Ajansı'ndan gelen güçlü bir düzenleyici baskı da dahil olmak üzere, yağmur suyu yönetiminin kabulü İskoçya'da İngiltere ve Galler'den daha hızlı ilerlemiştir. Birleşik Krallık uygulamasında SUDS, yağmur suyunu/yüzey suyunu geleneksel çözümlerden daha sürdürülebilir bir şekilde uzaklaştırmak için kullanılan bir dizi teknoloji ve teknikten oluşmaktadır (Fletcher vd., 2015).

2.2.4. Düşük Etkili Geliştirme (LID)

Düşük etkili geliştirme (LID) terimi en yaygın olarak Kuzey Amerika ve Yeni Zelanda'da kullanılmaktadır. LID terimi, saha tasarımı ve havza çapında yaklaşımı ile o zamanki yaygın yağmur suyu yönetimi yaklaşımından farklılık göstermektedir. LID, akış kaynağında veya yakınında bulunan biyotutma sistemleri, yeşil çatılar ve hendekler gibi daha küçük ölçekli yağmur suyu tutma ve arıtma ortamları ile karakterize edilmiştir (Fletcher vd., 2015). Yağmur suyu kirliliğini yönetmenin uygun maliyetli bir yolu olarak dünya çapında topluluklar arasında giderek daha popüler hale gelen bir yaklaşım olan LID'ın amacı, kentleşen peyzajlarda, yapılı ortamlarda noktasal olmayan kirletici kaynakları kontrol etmek için bitkileri, toprağı ve peyzaj tasarımını kullanmaktır (Golden ve Hoghooghi, 2018).

2.3. Yeşil Altyapı

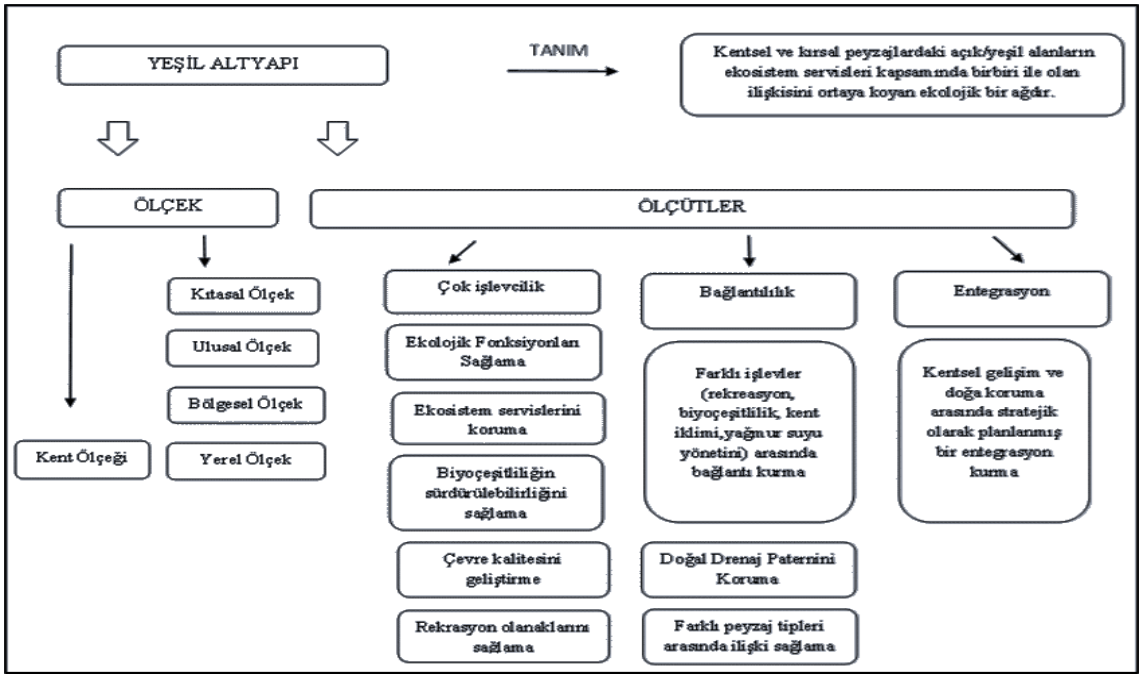
Yeşil altyapı, doğal ve yarı doğal alanların, kırsal ve kentsel alanların ve yeşil alanların, ekosistem sağlığını ve esnekliğini geliştiren, biyoçeşitliliğin korunmasına katkıda bulunan ve insan topluluklarına fayda sağlayan karasal, tatlı su, kıyı ve deniz alanlarının ağıdır (Ely ve Pitman, 2014). Avrupa Çevre Komisyonu, yeşil altyapıyı "su arıtma, hava kalitesi, rekreasyon alanı ve iklim azaltma gibi çok çeşitli ekosistem hizmetleri sunmak için tasarlanmış ve yönetilen diğer çevresel özelliklere sahip, stratejik olarak planlanmış doğal ve yarı doğal alanlardan oluşan bir ağ" olarak tanımlamaktadır (AB Komisyonu, 2016). Bu ağ, yeşil ve mavi alanları içermekte olup, kara ve su arasındaki bu yakın ilişki, yeşil altyapı sistemlerinin tasarımını etkilerken farklı yeşil atyapı tekniklerini sınıflandırmak için doğal bir unsur haline gelmektedir. En geniş ölçekte, yağmur suyu altyapısının önemli bileşenleri olan ormanlar, taşkın ovaları ve sulak alanlar gibi doğal peyzaj öğelerinin korunması ve restorasyonudur. Genel prensip,

toprak ve bitki örtüsünü kullanarak yağmur suyunun geri dönüşümünü sağlamaktır (Golden ve Hoghooghi, 2018). Yeşil altyapı, yalnızca su yönetimi paradigmasını değiştirerek değil (Morison ve Chesterfield, 2012), aynı zamanda kentsel peyzajın restorasyonu ve iyileştirilmesi gibi kentsel güçlendirme faaliyetlerinin temelini oluşturarak doğrudan arazi kullanım planlamasını etkilemektedir (Kati ve Jari, 2016).

Dünyada birçok kentte sürdürülebilir kentsel yağmur suyu yönetimi yaklaşımları çerçevesinde yeşil altyapı ile yağmur suyu yönetimi uygulaması yapılmaktadır. Yeşil altyapı kavramı, değerlendirilmekte olan ölçeğe göre değişmektedir; kent ve bölge ölçeğinde "çok işlevli bir açık alan ağı" olarak ve saha ölçeğinde "bir yağmur suyu yönetimi yaklaşımı" olarak tanımlanmaktadır (Kambites ve Owen, 2006; Fisch, 2014). Farklı ölçeklerde tasarlanan ve uygulanan sistemler, zamansal olarak yaşadığımız süreçte yeşil altyapı tasarımında yapısal ölçeğin ülke geneli ölçeğine ya da bölgesel veya kıtanın tamamını içeren ölçekteki çalışmalar görülmektedir (Wickham vd., 2010; Kilbane, 2013). Avustralya'da kıtasal ölçekte uygulanan bir yaklaşımda yeşil altyapı ölçeği kapsamında "Ulusal Yeşil Ağ" oluşturulması hedeflenmiştir (Yazgı ve Yolmaz, 2016).

Yeşil altyapı kavramı planlama geleneğinin yerleştiği ülkelerde kentsel ekolojik planlama sonuçlarına destek oluşturmakta; tedbir altına alınan bölgeleri (sulak formlar, su peyzaj alanları, doğal yaşamı oluşturan geçitler vb.), korunması gereken bölgeleri (orman alanları, zorunlu tarım parselleri vb.) ve bunların dışında kalan yeşil alanları (park alanları, yeşil caddeleri, yeşil hatları vb.) sınırları düzenlenmiş projeksiyon kapsamında değerlendirmektedir. Şehir içeriğinde ve dışında peyzaj tasarımlarında çok fazla tercih edilen "yeşil cadde, yeşil hat, yeşil koridor kavramları" gerçekte açık yeşil altyapı sisteminin asıl birimlerini teşkil etmektedir. Yeşil altyapı çalışmalarının ölçeği farklılık göstermekle birlikte, kırsal ölçekte peyzaj ekolojisine dayanan doğal alanların oluşturduğu ağlar arasındaki entegrasyonu ifade etmektedir. Şekil 2.1'de yeşil altyapı tanımı, ölçek ve ölçütleri gösterilmektedir. Kent ölçeğinde ise çok fonksiyonlu bir yeşil alan ağını; büyük parklar, yeşil alanlar, tarım ve orman arazileri kadar, küçük ölçekli yeşil çatılar, ağaçlar, yağmur bahçeleri, çiçeklikler, kentsel alanlar için daha uygun olabilecek cep sulak alanları gibi çeşitli uygulama alanlarını tanımlamaktadır (Fisch, 2014; Kambites ve Owen, 2006). Kent ölçeği gibi büyük uygulama alanlarında ifade edilirse, yağmur suyu altyapısını oluşturan ormanlar, sulak alanlar benzeri doğal manzarayı barındıran yapılardan oluşmaktadır (EPA, 2015). Hobi bahçeleri, yaban yaşam geçiş

köprü hatları, nehirlerde balık yuvası ve saz yatağı alanı, arı kovanı, biyotop park, bitkisel çitler, yol kenarı ve orta kaldırım bitki çeşitliliği gibi pek çok araçtan yararlanılmaktadır (European Commission, 2013).



Şekil 2.1. Yeşil altyapı tanımı, ölçek ve ölçütleri (Yazgı ve Yolmaz, 2016)

Kentsel yeşil altyapı ağının önemli bileşenleri olan açık-yeşil alanlar, mevcut kullanım ve ihtiyaç şekline göre kamusal, yarı-özel ve özel açık yeşil alanlar olarak üç türde değerlendirilmektedir (Önder, 1997):

Kamusal açık yeşil alanlar, toplumun yararlandığı ya da tüm insani gereksinimlerin sağlandığı kamuya mal olmuş alanları içerir. Bu alanlara, kentsel alan içeresinde cadde veya sokak alanlarında bulunan park alanları, kentsel orman alanları ve ağaçlandırılmış alanlar, mezarlık çevresi yeşil örtü, botanik bahçeleri, hayvan barınak bahçeleri, gösteri ve sunum alanları, dönemeç ve kaldırım alanları, spor tesislerine ait alanlar örnek gösterebilir.

Yarı özel açık yeşil alanlar, çoğu zaman toplumun bütünüyle yararlanamadığı yalnızca devlete ait kurumların yapılarında çalışan topluluk, bu kesmin aile fertlerinin yanında sınırları belli olan kısım aracılığıyla birtakım koşullarda kullanımına açık olan alanları içerir. Bu tür alanlar, okul alanları, askeri kışla veya tesis alanları, kamuya ait kurum ve kuruluşlar, fabrika, şantiye alanlarını çeviren noktalardır.

Özel açık yeşil alanlar ise yalnızca şahısların sahip olduğu bölgelerde, sadece sahipleri aracılığıyla kullanılacak olan alanları kapsar. Bunlara şahıslara ait özel mülkiyetli yapılar ya da toplu yaşam alanları örnek gösterilebilir.

Kent içindeki açık-yeşil alanlar, bağlı bulundukları kentsel yapı yetkinliklerine göre konut, komşuluk, mahalle ve kent düzeyinde tanımlanmaktadır. Bu tür sınıflar ise aşağıdaki biçimde özetlenebilir (Yıldızcı, 1987):

Konut düzeyinde yeşil alanlar: Yeşil alanların en ufak birimidir. Bir ya da daha fazla daire içeren apartman bahçeleri, teras ve çatı bahçeleri, balkon düzenlemeleri örnek verilebilir. Uygulamada bina yapısı ile bahçe bütün olarak değerlendirilir. Büyük ölçüde öncül, yancıl ve arka bahçe olarak tanımlanabilir.

Komşuluk ünitesi düzeyinde yeşil alanlar: Ortalama 6 ile başlayıp 400 konutu kapsayan ve 30 ile 5000 nüfusu içeren kentsel birim olarak tanımlanır. Bu düzeyde alansal çerçevede en çok 15 ha'lık bir bölgeyi çevrelediği görülmektedir. Bu düzeydeki yeşil alanlar; çocuk bahçeleri, spor faaliyet ve çocuk oyun alanları ve toplu konut sınırlarında bulunan bahçelerdir.

Mahalle düzeyinde yeşil alanlar: Bu tür alanlar üç komşuluk sistemi sınırı içeren, nüfusu en düşük 15.000 olan ve 15 ha'lık bölgeyi kapsamakta olan alanlardır. Bu sınıflandırmaya mahalle parkları, spor tesis alanları, çocuk oyun bahçeleri, okul bahçeleri gibi alanlar girmektedir.

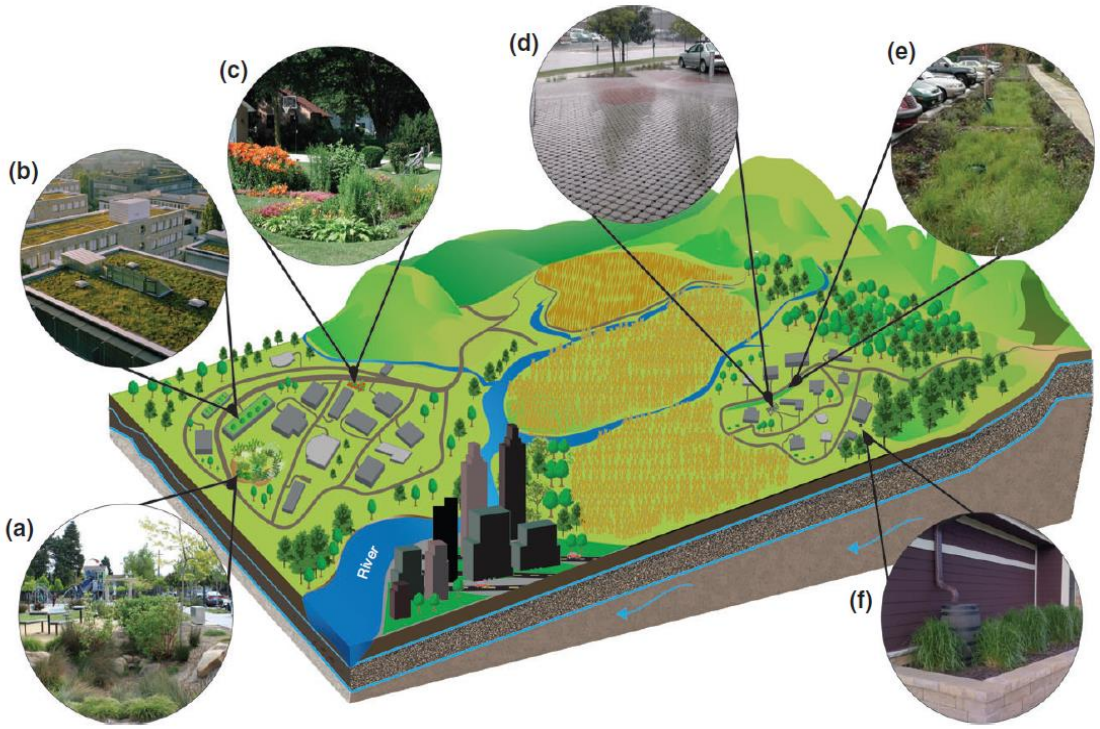
Kent düzeyinde yeşil alanlar: Kentsel düzeyde yeşil formların etki ve ilgi sınırları, şehir halkının tamamının ihtiyacını karşılayacak büyüklüğe ve fonksiyona sahip olması ile ilgilidir. Ayrıca yaşam alanlarının, nüfus düzeyi ve imar yoğunluğunda artış olukça yeşil alan ihtiyacı da artmaktadır. Bu nedenle mahalle düzeyindeki açık yeşil bölgelerin en düşük üç katı büyüklüğünde, 45.000 nüfus düzeyine, en düşük 135 ha'lık bir alanı kapsaması ve hektar başına en az 350 kişilik bir yeteneğe uygun olmaları büyük bir avantaj sağlayacaktır. Kent düzeyindeki yeşil alanlara örnek olarak; kent birimi park alanları, spor kompleks tesisleri, dinlenme alanları, hayvanat bahçeleri, botanik bitki bahçeleri, gösteri ve sunum alanları, kent içi yol-bulvar ve refüjler, yaya yürüyüş yolları, kentsel orman alanları, koruluk alanlar, yeşil yol ve mezarlıklar gösterilebilir (Türel, 1988).

2.4. Yeşil Altyapı Uygulamaları

Sürdürülebilir yağmur suyu yönetim hedefleri, yağmur suyu yüzey akış potansiyelini durdurmak, yağış suyunu depo vasfı ile biriktirmek ve yeniden kullanmayı teşvik etmektir (Demuzere vd., 2014). Sürdürülebilir yağmur suyu yönetimi için yeşil altyapı yöntemlerin uygulanabilmesi için aşağıda verilen tasarımları kapsamaktadır (Demir, 2012):

(a) Biyotuma hendekleri
(b) Yeşil çatılar
(c) Yağmur bahçeleri
(d) Geçirgen kaplamalar
(e) Çimlendirilmiş hendekler
(f) Yağmur suyu toplama sistemleri ve çiçeklikler
(g) Drenaj borusu ile ayırma
(h) Ağaç çukurları
(i) Yeşil caddeler ve sokaklar
(j) Kurakçıl peyzaj
(k) Açık yağmur olukları
(l) Yapay sulak alanları

Havza ölçeğinde yeşil altyapı uygulamaları Şekil 2.2 ve Çizelge 2.1'de gösterilmektedir.



Şekil 2.2. Havza ölçeğinde yeşil altyapı uygulamaları (Golden ve Hoghooghi, 2018)

Çizelge 2.1. Yeşil altyapı uygulamalarının özeti (Golden ve Hoghooghi, 2018)

Yeşil Altyapı Uygulamaları	Açıklama
(a) Biyotutma sistemi	Toprak infiltrasyonunu arttırmak ve hızlı akışı azaltmak için toprak filtre ortamı ve yerel bitkiler içeren küçük çöküntü alanları.
(b) Yeşil çatı	Hafif büyüme ortamı ve bitki örtüsü ile kaplı çatılar, yağmurun sızmasını ve evapotranspirasyon ile suyun geri kazanılmasını sağlar.
(c) Yağmur bahçesi	Akışı toplamak ve infiltrasyon için doğal toprak kullanan biyolojik tutma sistemlerine kıyasla sığ ve daha küçük bitki örtüsü alanları.
(d) Geçirgen kaldırımlar	Yüzeydeki açık boşluklar yoluyla yağışın yavaş yavaş infiltrasyonuna izin veren ve hızlı akışı azaltma potansiyeline sahip gözenekli malzeme.
(e) Biyohendekler	İyileştirilmiş geçirimsiz alanlardan yağış ve akışın içine sızan, mühendislik ürünü topraklara sahip bitkili kanallar.
(f) Yağmur varilleri	Düzgün kullanıldığında akışı yavaşlatabilen ve azaltabilen yağışları toplayan ve depolayan kaplar.

Yağmur sularının herhangi bir işlem uygulanmadan doğrudan yönlendirildiği ve üstünde yerli yurtlu bitki türlerinin dikildiği yüzeysel bölgelere "yağmur bahçesi" ya da başka bir ifadeyle "biyotutma (bioretention) bölgeleri" adı verilmektedir (Demir, 2012). Yağmur bahçesi tasarımının esas fonksiyonu; yağmur suyunun infiltrasyonunu sağlayarak doğal ekosistem için su kalitesini yükseltmektir (Jaber, Woodson, LaChance ve York, 2012). Şekil 2.3'de yağmur bahçesi örneği gösterilmektedir. Yağmur bahçeleri ile kent estetiğini koruyan ekolojik bir yapı oluşturularak olumlu çevresel değişimler hedeflenmektedir. Bu tür tasarımlarda çalışma alanının iklim değişim fonksiyonları ele alınarak alana ait doğal flora yapısı bitki türleri kullanılması, yağmur bahçeleri tasarımlarında önemlidir. Sonuç olarak yağmur bahçeleri tasarımı, ekolojik kaynak rezervlerinde olumsuz etkenleri azaltarak yağış suyunun doğal döngüsünü sağlamayı başaran, yeraltı sularına kaynak oluşturan, ayrıca enerji verimliliğine de fırsat yaratan uygulamalardır (Dunnett ve Clayden, 2007).

Yağmur bahçesinin yeri seçilirken dikkat edilen hususlar;

- Yağmur bahçeleri saçak kenarından en az 3 m kadar uzak olmalıdır.

- Yağmur bahçeleri septik sistemlerin üzerine ya da yakınlarına kurulmamalıdır.
- Yağmur bahçeleri için direk güneş alan ya da yarı gölgeli alanlar seçilmelidir.
- Yağmur bahçeleri eğimli alanlara (>%12) kurulmamalı, az eğimli alanlar seçilmelidir (Doğangönül ve Doğangönül, 2008).



Şekil 2.3. Yağmur bahçesi örneği (Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, 2018)

Yağmur bahçeleri, yağış, akış ve kar erimesinin akarsulara ve diğer su kütlelerine taşınmasını azaltma yetenekleri açısından güçlü olmakla birlikte, biyotutma sistemleri nitrat-azot ve fosfor tutma konusunda sınırlı kapasite sergilemektedir. Bununla birlikte, yağmur suyu akışları yoluyla taşınan metaller, katılar, patojenler ve petrol hidrokarbonları için verimli yutaklar olabilmektedirler (Golden ve Hoghooghi, 2018).

2.5. Yeşil Altyapı Uygulamalarının Avantaj ve Dezavantajları

Yeşil altyapı yaklaşım ve uygulamalarının birçok avantajı bulunmaktadır. Ekolojik tabanlı, rekreasyon, mühendislik, halk sağlığı, halkın bilinçlendirilmesi, eğitim konularıyla birlikte planlama ve tasarım çalışmaları yapılabilmektedir. Pratik,

uygulanabilir ve yenilikçi projeler üretilebilmekte, durum veya koşullara bağlı işlevsellik kazandırılabilmektedir. Çoklu veya farklı problemleri birlikte çözebilme imkanı ile farklı disiplinlerin birlikte çalışmasına olanak sağlamaktadır (Kaplan, 2012).

Yeşil altyapı, su, gıda, ulaşım, enerji, sağlık ve entegre sosyal-ekolojik-teknik sistemlerin arasında karşılıklı olarak güçlendirici etkiler yaratmakta ve birçok fayda sağlamaktadır (Abunnasr, 2013; Bayrak, 2021; Yiğit vd., 2015):

1. Su kalitesi ve kantitesinin kontrolü
- Yağmursuyu yönetimi,
- Sel risk ve etkilerinin azaltılması,
- Gri altyapı inşaat, işletme ve bakım maliyetlerinin azalması,
- Birleşik kanalizasyon sistemindeki yükün azaltılması yoluyla nehir suyu kalitesinin iyileştirilmesi,
- Kanalizasyon sisteminde su miktarı ve kirlilik yükünün azaltılması,
- Arıtma maliyetlerinin azaltılması,
- Yağmur suyu hasadı yoluyla su verimliliği,

2. Hava kirliliğinin azaltılması
- Kirliliğin giderilmesi yoluyla hava kalitesinin iyileştirilmesi,
- Karbon tutma/depolama ve azaltılmış sera gazı üretimi,
- Koku ve gürültü kontrolü,

3. Etkin enerji kullanımının sağlanması
- Kentsel ısı adası etkisinin azaltılması,
- Trafiğin yükünün azaltılması ve toplu taşıma araçlarının kullanılması,
- Binalarda enerji tasarrufu ve enerji verimliliği,

4. Ekosistem hizmetlerinin sağlanması
- Farklı türler için yaşam alanlarının artması,
- Biyolojik çeşitliliğin artması,

5. Sosyal-ekolojik bağlantının kurulması
- Kent estetiği ve mahalle kalitesi algısı,
- Rekreasyon fırsatları ve sosyal uyum,
- Kentsel tarım,
- Çevresel adalet (gri altyapı projelerine kıyasla sorunların azaltılması),
- Eğitim fırsatları,
- Stres yönetimi,

- Sosyo-ekonomik fayda-maliyet oranının artması (gri altyapı projelerine kıyasla).

Tüm bu avantajların yanında uygulamada karşılaşılan olumsuzluklar da bulunmaktadır. Disiplinler arası çalışmaların yürütülmesini yasal ve idari çerçeveye oturtmak ve işlerlik kazandırabilmek için belirsizliğini sürdürmekte, kurumlar arası yetki çatışmaları olmaktadır (Kaplan, 2012).

Yeşil altyapı uygulamalarının etkili bir şekilde uygulanmasında beş temel zorlukla karşılaşılmaktadır. Bunlar,

1. Tasarım Standartları
2. Düzenleyici Yöntemler
3. Sosyo-Ekonomik Kaygılar
4. Maliyet Tablosu
5. Yenilikçi Yaklaşım

olarak ele alınmaktadır. Kentsel planlamada yeşil altyapının etkili bir şekilde uygulanmasının sağlanmasında ön koşul olarak siyasi iradenin rolü, kamu desteğinin sağlanması, fonların kullanılması ve paydaş katılımının rolü ele alınmaktadır (USEPA, 2018a/b).

2.6. Yağmur Suyu Kirleticileri

Noktasal olmayan kaynak özelliklerine sahip kentsel alanlardaki yollar, otoparklar ve yapılı alanlar gibi geçirimsiz yüzeylerden gelen ve yüzeysel akışa geçen yağmur suyu, birçok kirleticiyi de alıcı ortamlara taşımaktadır. Yağmur suyu kirleticileri, büyük kirleticiler ve çözünmüş kirleticiler olarak iki grupta incelenmektedir. Hayvansal atıklar ve atıksu toplama sistemlerinden bakteri ve virüsler; otomobil ve çatı kaplamalarından metaller; tarım alanları, bahçeler ve atmosferik birikimden besi maddeleri ve pestisitler; otomobillerden yağ ve gres; inşaat alanları ve yollardan sediman; endüstriyel alanlar ve otomobillerden toksik metaller ve tüm alanlardan organik maddeler ve katı maddeler kaynaklanmaktadır (Rushton, 1999; Kloss, Calarusse ve Stoner 2006; Zhang vd., 2021; Yang ve Lusk, 2018). Çizelge 2.2'de Yağmur suyu kileticileri gösterilmektedir.

Çizelge 2.2. Yağmur suyu kirleticileri (Oliveri, Kruse, Kawata ve Smith, 1977; Characklis vd., 2005; Eriksson vd., 2007)

Tür	İsim
Temel Parametreler	Biyokimyasal oksijen ihtiyacı ($BOİ_5$), kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ), askıda katı madde (AKM), fosfor (P), azot (N), pH
Metaller	Kromat, Kadmiyum, platin, bakır, nikel, kurşun, çinko
Polisiklik Aromatik Hidrokarbon (PAH)	Benzo(a)piren, naftalin, Piren
Herbisitler	Fenmedifam, Pendimetalin, Terbütilazin, Glifosat
Çeşitli Organik Maddeler	Nonifenol etoksilatlar (e.g., nonylphenol), 2,4,4-triklorobifenil (Polychlorinated biphenyl 28), di(2-ethylhexyl) ftalat, Metil tert-bütil eter, Pentaklorofenol
Bakteriyal İndikatörler	Dışkı koliformları (Escherichia coli, Enterococci sp˙) Patojenler (Pseudomonas aeruginosa, Staphylococcus aureus, Clostridium perfringens)

Toplam askıda katı maddeler (TSS), toplam azot (TN), toplam fosfor (TP) yağmur suyunda bulunan en yaygın kirleticilerdir (Zhang vd., 2021). Jeoloji, arazi kullanımı ve hidrolojik koşullara bağlı olarak yağmur suyu akışındaki besi maddelerinin değişen oranlarda organik ve inorganik formlarının yanı sıra çözünmüş veya partikül formları da bulunur. Azot (N)' un inorganik formları nitrat azotu (NO_3–N), amonyum azotu (NH4–N) ve nitrit azotu (NO_2–N) iken, organik formları çözünmüş organik N (DON) ve partikül organik N (PON)'dur. Yağmur suyu akışında, fosfor ya çözünmüş formlar (organik P ve ortofosfat, PO_4–P) halinde bulunmakta ya da ince partiküllerce (kil ve organik madde) tutulmaktadır. Besi maddesi formlarındaki farklılıklar, mikrobiyal dönüşümleri ve iyonik formdaki besi maddelerinin tutulmasını etkilemektedir (Yang ve Lusk, 2018).

Fosfor, canlıların büyümesi için gereklidir; azot gibi birincil bir besi maddesidir. Sularda fosforun üç formu yaygındır. Orto fosfor, pH'a bağlı olarak $H_2PO_4^-$ veya HPO_4^{-2} temel fosfat formudur. Fosfor da önemli bir biyokimyasal elementtir ve çeşitli organik formlarda veya polimer fosfat formunda bulunur. Fosfatlar ayrıca toprak, sediman ve diğer partiküllerle taşınır. Toplam fosfor bu üç formun toplamıdır. Fosfor, fazla gübrelerin yıkanmasından gelen akışa girer. Fosfor, çim kırpıntıları ve yapraklar gibi bitki örtüsünün çürümesi sırasında da açığa çıkar ve hayvan atıklarında bulunur (Davis ve McCuen, 2005).

Sudaki azot çeşitli şekillerde bulunabilir ve çeşitli su kalitesi sorunlarına neden olabilir. Formlar, suyun pH'ına ve su redoks özelliklerine bağlıdır. Genel olarak redoks özellikleri, mevcut çözünmüş oksijen miktarı ile kontrol edilir. Asit/baz ve oksidasyon/redüksiyon kimyası, yağmur suyu sistemlerinde kirletici formunu ve hareketini etkilemektedir (Davis ve McCuen, 2005).

Birçok ağır metal, insanlar ve diğer flora ve fauna için yüksek konsantrasyonlarda toksiktir. Bu metaller arasında kadmiyum, krom, bakır, kurşun, cıva, nikel ve çinko bulunur. Kadmiyum, kurşun ve civa gibi bazı metaller, oldukça yüksek oranda toksik olup, çok düşük konsantrasyonlarda (ppb) etkilidirler. Farklı organizmaların metaller için farklı toleransları vardır. Örneğin bakır, insanlar için bir mikro besindir ve insanlar bakır için yüksek toleransa sahiptir, bu nedenle orta konsantrasyonlar toksik değildir. Bununla birlikte, sulardaki düşük bakır seviyeleri bile algler için oldukça zehirlidir. Metallerin çoğu, 2+ oksidasyon durumuna sahip iki değerli katyonlardır. Bunlara Cd^{+2}, Cu^{+2}, Hg^{+2}, Pb^{+2}, Ni^{+2} ve Zn^{+2} dahildir. Doğal sularda, bu ağır metaller genellikle OH^{-} veya CO_3^{-} gibi inorganik türlere veya doğal organik maddeler gibi organik bileşiklere bağlanır veya kompleks oluşturur. Bu kompleksleşme, bir arıtma uygulamasında bir metalin davranışını etkileyebilir veya çevredeki hareketini değiştirebilir. Askıda katıların mevcudiyetinde, metaller genellikle kolloidlere adsorbe edilir. Bu, metallerin askıdaki katıların inorganik veya organik bileşenleriyle kompleks oluşturması veya bağlanması ve katılarla birlikte taşınmasıyla oluşur. Sonuç olarak, çözünmüş metal konsantrasyonları düşük olabilir, ancak askıda katı maddeler yüksek metal seviyeleri içerebilir. Katılar çökeldiğinde veya işlem yoluyla uzaklaştırıldığında, metaller de onlarla birlikte giderilebilir (Davis ve McCuen, 2005).

Kentsel havzadan gelen yağmur suyu kalitesinin değerlendirilmesi genellikle "anlık ortalama konsantrasyon (Event Mean Concentration- EMC)" değerleri kullanılarak yapılmaktadır. EMC değerleri, yağış ve saha özelliklerine bağlı olarak büyük ölçüde değişiklik göstermektedir. EMC, konsantrasyonun akış ağırlıklı ortalamasıdır ve litre başına miligram (mg/L) birimleri olarak ifade edilmektedir. Bir yağış sırasında toplam kütlenin (M) toplam hacme (V) bölünmesi olarak tanımlanmaktadır. Örnekleme sırasında belirli akış koşulları hakkında bilgi olmadan konsantrasyon verilerinin toplanması, anlık ve toplam akış arasında niceliksel olarak ayrım yapmayı zorlaştırmaktadır. Literatür incelendiğinde, konsantrasyon verilerinin bazı çalışmalarda "aritmetik ortalama", bazı

çalışmalarda ise "medyan" değerleri olarak verildiği görülmektedir. Verilerdeki değer farklılıklarının etkisini azaltmak için genellikle ortalama değerler yerine medyan kullanılması önerilmektedir (Bartley, Speirs, Ellis ve Waters, 2012; Davis ve McCuen, 2005).

Çizelge 2.3. Yağmur suyundaki ağır metal konsantrasyonları (Zhang vd., 2021; Bannerman, Owens, Dodds ve Hornewer, 1993).

Kirletici (mg/L)	Çim alanlar	Çatılar	Sokaklar	Araç yolları	Caddeler
T Pb	-	21	33	17	55
T Zn	59	149	220	107	339
T Cu	13	15	24	17	56
T Cd	-	-	0.8	0.5	1.4
T Cr	-	-	5	2	12

Çizelge 2.3 ve Çizelge 2.4'de görüldüğü üzere yerleşim alanları ve ticari alanlardan, yollar ve çatı kaplamalarından gelen yağmur suyunda kirletici konsantrasyonları farklılık göstermektedir (Bannerman vd., 1993). Kentsel yüzey akışındaki kirletici madde konsantrasyonları, mevsime, konuma, trafik hacmine, yerleşimlerin sosyo-ekonomik yapısına, yağış hacmi ve yoğunluğuna göre değişmektedir (Chow vd., 2013; Goh vd., 2019).

Çizelge 2.4. Yağmur suyundaki kirletici konsantrasyonları.

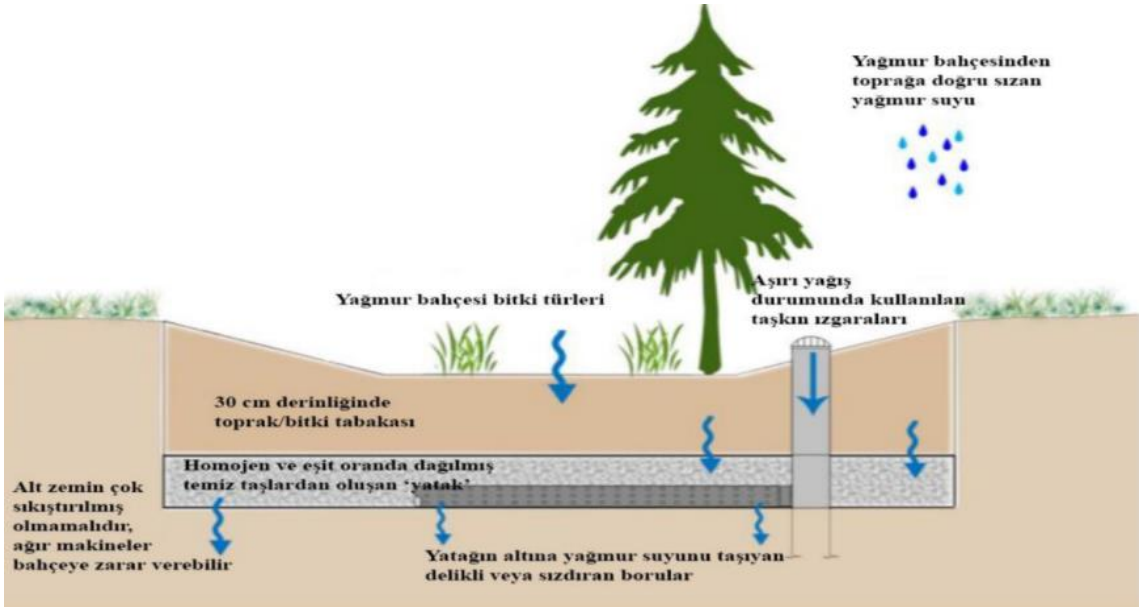
Kirletici (mg/L)	Yerleşim Alanı	Ticari Alan	Kaynak
NO_3-N	0.9	0.93	(Chow, Yusop ve Shirazi, 2013)
	2.4	2.8	(Nazahiyah, 2005)
	0.736	0.572	(Van der Tak ve Edwards, 2001)
	0.23	0.26	
NO_2-N	0.011	0.006	(Chow vd., 2013)
	0.10	0.43	(Nazahiyah, 2005)
NH_4-N	0.19	0.71	(Chow vd., 2013)
	3.50	3.80	(Nazahiyah, 2005)
TN	0.50-18.30		(Göbel, Dierkes ve Coldeway, 2007)
	2.53	1.82	(Van der Tak ve Edwards, 2001)
TP	0.38	0.69	(Chow vd., 2013)
		0.15	(Francey vd., 2010)
	0.35		(Francey, Fletcher, Deletic ve Duncan, 2010)
	0.23-0.34		(Göbel vd., 2007)
		0.45	(McLeod vd., 2006)
	0.53		(McLeod, Kells ve Putz 2006)
	263	201	(Stephan ve Endreny, 2016)
	0.383	0.201	(Van der Tak ve Edwards, 2001)
	0.57	0.32	

2.7. Kirletici Giderim Süreçleri

Biyotutma tesisleri veya yağmur bahçeleri, bitki ve toprak kompleksinde meydana gelen fiziksel ve biyolojik arıtma süreçleri aracılığıyla gerçekleştirilen sızma ve kirleticilerin uzaklaştırılması için bir mekanizma olarak kullanılmaktadır. Bu işlemler arasında filtrasyon, ayrıştırma, iyon değişimi, adsorpsiyon ve buharlaşma yer almasktadır (Dept. of Env. Resources, 1993). Kirletici yükleri, yüzeydeki akışın "ilk yıkamasında" yoğunlaşmakla birlikte biyotutma sistemleriyle akış hacmi kontrolü ile yüksek düzeyde su arıtımı sağlanmaktadır (Coffman, 2000).

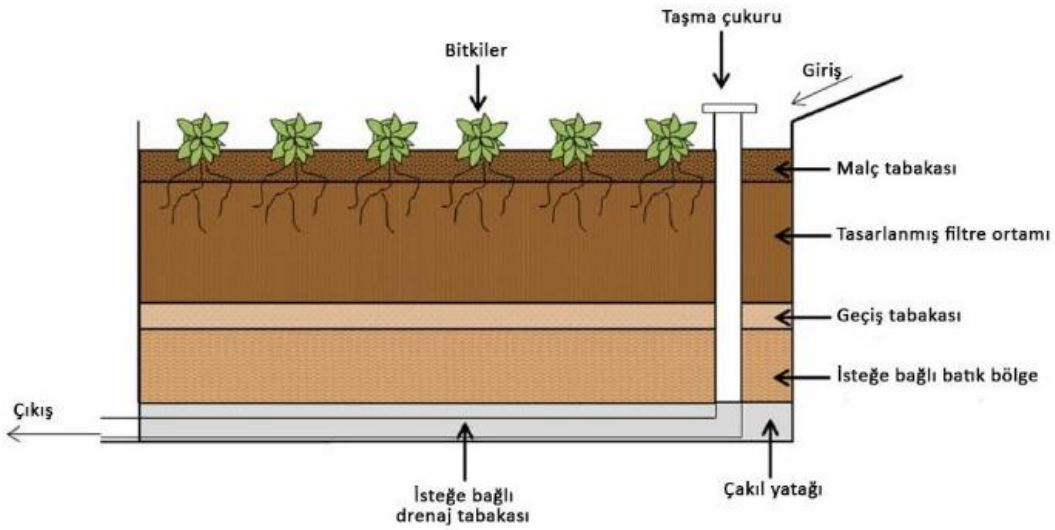
Çatı oluklarından ve geçirimsiz yüzeylerden toplanan yağmur suları, yağmur bahçelerinde tüm yüzeyin yağmur suyu ile kaplanması sağlanmakta, su yüksekliği artmakta ve göllenme meydana gelmektedir. Yağış şiddeti, suyun zemine sızma

kapasitesi, bitki örtüsü ve yağmur bahçesinin yapısına bağlı olarak göllenme derinliği ve süresi değişim göstermektedir. Göllenen su, yavaş bir şekilde toprağa infiltre olmaktadır (Doğangönül ve Doğangönül, 2008). Bir yağmur bahçesinde su emilim süreçleri Şekil 2.4'de gösterilmiştir.



Şekil 2.4. Yağmur bahçesinde su emilim süreçlerini gösteren diyagram (The City of Lancaster, 2011)

Biyotutma sistemleri ve yağmur bahçeleri, yüzeysel akışla kirleticileri taşıyan yağmur suyunu infiltre ederken aynı zamanda filtrelemekte, adsorbe etmekte, bitki kökleriyle tutmaktadır. Şekil 2.5'de biyotutma sistemi bileşenleri gösterilmektedir.



Şekil 2.5. Biyotutma sistemi bileşenleri (Goh vd., 2019)

Biyotutma hücrelerinde çim tampon şeritleri, akış hızını azaltır ve partikül maddeyi filtrelemekte, kum yatağı ekim toprağının havalanmasını, drenajı ve toprak malzemelerinden kirleticilerin yıkanması sağlamaktadır. Göllenme alanı, fazla akışın depolanmasını sağlar ve partiküllerin yerleşmesini ve fazla suyun buharlaşmasını kolaylaştırır. Organik katman, biyolojik büyüme için bir ortam sağlayarak organik malzemenin ayrışma işlevini yerine getirir. Ayrıca kirleticileri filtreler ve toprak erozyonunu önler. Dikim toprağı, bitkiler tarafından yağmur suyu depolama ve besin alımı için alan sağlar. Dikim toprakları hidrokarbonlar, ağır metaller ve besinler gibi kirleticileri adsorbe eden bazı killer içerir. Bitki örtüsü (bitkiler), evapotranspirasyon yoluyla suyun uzaklaştırılmasında ve besin döngüsü yoluyla kirleticilerin uzaklaştırılmasında işlev görmektedir.

Biyotutma alanının bileşenleri, mümkün olan en verimli sistemi sağlamak için gerekli yönergeleri karşılamalıdır. Malç tabakası yaklaşık 5-8 cm kalınlığında olmalı ve yıllık olarak değiştirilmelidir. Biyotutma, kullanılan toprak karışımı ve bitkiler ile kirletici arasında gerçekleşen bir süreçler bütünüdür. Bunlar (Manual, 2007; Chow vd., 2013):

Tutma: Yağmur suyuyla gelen akışın bitkiler ve toprak tarafından tutulmasıdır.

Sedimantasyon: Askıda katı maddelerin akıntının yavaşlamasıyla çökelmesidir. Biyotutma tesisinin yüzeyinde meydana gelmekte ve filtre ortamına girmeden önce ön işlem sağlayarak yüksek yoğunluklu partiküllerin, etkin bir şekilde uzaklaştırılması sağlanmaktadır.

Evaporasyon: Suyun buharlaşmasıdır.

Transpirasyon: Yapraklarda gerçekleşen terleme olayıdır. Bir bitkinin kökleriyle alınan suyun %90'ından fazlası su buharı olarak havaya geri dönmektedir.

Evapotranspirasyon: Bitkinin su tüketimi (terleme) ve buharlaşma ile birlikte su toplamıdır. Biyotutma tesisi tasarımı, bu işlemin gerçekleşme potansiyelini en üst düzeye çıkarmaktadır.

İnfiltrasyon: Suyun toprağın boşluklarından aşağı doğru geçişidir.

Termal Azalma: Akış suyu sıcaklığının toprakta azalmasıdır.

Filtrasyon: Partiküllerin malç ve topraktan geçerken akıştan filtrelenmesi olayıdır. Sahada uygulanan biyotutma sistemlerinde askıda katıların mükemmel şekilde uzaklaştırıldığı kaydedilmiştir.

Adsorpsiyon: Kil ya da organik maddenin dış yüzeyindeki negatif yük nedeniyle sıvı, gaz veya çözünmüş bir maddeyi tutmasıdır. Malç ve bitki maddesinin parçalanmasıyla biyotutma tesislerinde bulunabilen humus, metalleri, nitratları ve ortofosfatları adsorbe etmektedir.

Absorpsiyon: Suyun bitki kök kılları ve mantarlar tarafından alınmasıdır.

Volatilizasyon: Bir maddenin daha uçucu forma dönüştürülmesidir.

Asimilasyon: Canlıların dış ortamdan aldıkları inorganik maddelerden organik maddeleri üretmeleridir. Bitki kökleri doğrudan çözünmüş inorganik azotu asimile etmektedir. Belirli türdeki kirleticiler için biyotutma tesislerinde uygun bitkiler seçilmelidir.

Degradasyon: Organik bileşiklerin toprak ortamındaki mikroorganizmalar tarafından ayrıştırılmasıdır. Degradasyon uygun nem ve sıcaklık koşullarında ve fizikokimyasal süreçlere kıyasla genellikle yavaş gerçekleşmektedir.

Nitrifikasyon: Amonyak ve amonyum iyonlarınının bakteriler tarafından önce nitrite (NO_2) sonra da nitrata (NO_3) oksitlenmesidir.

Denitrifikasyon: Nitrat ve nitrit bileşiklerinin, anaerobik koşullarda mikroorganizmalar tarafından redüksiyona uğratılarak elementer azota dönüştürülmesidir. Denitrifikasyon, suya doygun, anaerobik ortamlarda gerçekleşmektedir.

2.8. Kirletici Giderim Verimleri

Verimlilik, bir BMP sisteminin kirleticileri ne kadar iyi ortadan kaldırdığını veya kontrol ettiğini ölçüsü olarak tanımlanmaktadır. Verimlilik tipik olarak "yüzde giderim" ile ölçülmektedir. Ancak yüzde giderim tek başına bir BMP'nin işlevsel verimliliğinin geçerli bir ölçüsü değildir (Strecker, Quigley, Urbonas, Jones ve Clary, 2001). Tarihsel olarak, araştırmacılar tarafından BMP verimliliğini hesaplamak için altı yöntemden biri kullanılmıştır:

- Verimlilik oranı
- Yüklerin toplamı
- Yüklerin gerilemesi
- Ortalama konsantrasyon
- Tekil yağış yüklerinin verimliliği
- Referans su havzaları ve öncesi/sonrası çalışmaları.

Bu yöntemlerin her birinin kullanımı, belirli bir kirleticinin giderilmesinde BMP'nin etkinliğini özetleyen tek bir sayı sağlasa da, gidermeye istatistiksel olarak bakmak için tasarlanmamıştır ve bu nedenle, giriş ve çıkıştaki farklılıkların olup olmadığını belirlemek için yeterli bilgi sağlanmamaktadır. Su kalitesi ölçümleri istatistiksel olarak önemlidir.

Matematiksel olarak kirletici tutma verimi, bir arıtma ortamı tarafından tutulan kirletici miktarının girişteki miktara oranıdır. Çıkıştaki kirletici miktarını ölçmek, tutulan miktarı ölçmekten daha kolay olduğundan, kütle dengesi ilkeleri kullanılarak tutma verimi TE Formül 1' de gösterilmektedir (Davis ve McCuen, 2005):

$$TE = 1 - Cçıkış/Cgiriş \quad (1)$$

TE, giderim verimi; Cçıkış, biyotutma alanından çıkan yağmur suyundaki kirletici konsantrasyonu; Cgiriş, biyotutma alanına gelen çıkan yağmur suyundaki kirletici konsantrasyonudur (Davis ve McCuen, 2005).

Kirletici giderim v nerimlerinin değerlendirilmesinde, kararlı bir durumdan söz edilemediği için sadece yüzdeye veya kısmi giderime odaklanmak, zamanla değişen bir süreci yeterli şekilde açıklamamaktadır. Yağmur suyu miktarının hem de kirletici konsantrasyonlarının girdi ve çıktı oranları bir olayın zamanına göre ve her olayda değiştiği için giderimler de EMC' de bir değişiklik olarak sunulmalı ve tartışılmalıdır (Davis ve McCuen, 2005).

Kimyasal ve biyolojik süreçler sonucu bir kirletici formu başka bir forma dönüşebilmekte, bu da giderime ya da negatif giderime neden olmaktadır. Negatif giderim kirletici maddelerin ortamda birikmesi ve sonraki yağış olayı sırasında bu kirleticilerin yıkanması ile çıkış değerlerinin giriş konsantrasyonlarından daha yüksek olması olarak tanımlanmaktadır. Bu durum azot bileşiklerinde yaygın olarak görülmektedir (Ahiablame, Engel ve Chaubey, 2012).

Biyotutma sistemlerinde kirletici giderim verimlerinin belirlenmesi amacıyla birçok saha ve laboratuvar çalışması yapıldığı görülmektedir. Çizelge 2.5'de bazı ağır metal giderim verimleri, Çizelge 2.6'da sahada uygulanan biyotutma sistemlerinde giderim verimleri gösterilmektedir.

Çizelge 2.5. Sahada uygulanan biyotutma sistemlerinde ağır metal giderim verimleri (%)

Pb	Zn	Cu	Kaynak
31-98	62-99	43-99	(Ahiablame vd., 2012)
74-99	73-99	20-99	
75	68-93		
70-95	64-95	-43-97	(Davis vd., 2003)
	54-99		(Davis, Hunt, Traver ve Clar, 2009)
70-100	64-100	43-99	(Dietz, 2007)
>90	>90	>90	
81	98	99	(Hunt, Jarret, Smith ve Sharkey, 2006)
31-100	50-99	-9-99	(LeFevre vd., 2015)
32-100	60-99	65-98	(Liu, Sample, Bell ve Guan, 2014)
91,80	85,10		(Macnamara ve Derry, 2017)
76,10	71,30		(Raspati, Azrague ve Jotte, 2017)
>95	99	97	(Roseen vd., 2006)

Çizelge 2.6. Sahada uygulanan biyotutma sistemlerinde kirletici giderim verimleri (%)

NOx-N	NH_4-N	NO_2	NO_3	TN	TP	Kaynak
1-83	-65-82			32-99		(Ahiablame vd., 2012)
				14-61	-3-99	
-209	82			21		(Brown ve Hunt III, 2011)
-477	74			75		
				19.9-90.8	-2-19	(Carpenter ve Hallam, 2010)
43	72			20		(Chen, Peltier, Sturm ve Young, 2013)
				90-95	31.4	(Davis, 2007)
				49-59	77-79	(Davis vd., 2006)
				30-99	24-99	(Davis vd., 2009)
15-16				4-99		(Davis vd., 2003)
87	79			79	-240-99	(De Rozari, Greenway ve El Hanandeh, 2018)
13-75	-1-86			40-59	10-78	(Dietz, 2007)
24	87				70-85	

67	82			51		(Dietz, 2006)
				58.6	86	(Geronimo, Maniquiz-Redillas ve Kim, 2013)
				37	36.42-75.33	(Hatt vd., 2009)
				40	65-87	(Hunt vd., 2006)
13-75	-1-86			40	-108	
				32.2	76.9-97.2	(Hunt vd., 2008)
4.9	70.6			32.1		
-3.3	-1.9			72.5		(Jiang vd., 2017)
				39.8-76.67	65-87	
42.3	64.6			50.7		(Jiang vd., 2018)
				29.5	46	(LeFevre vd., 2015)
-766-96	-136-96				-240-87	
				56	55.1	(Li ve Davis, 2014)
-120				4.3		
		82	-137	9.7		
				41		(Liu ve Davis, 2014)
				-3-99		(Liu vd., 2014)
				89,00	61.10	(Macnamara ve Derry, 2017)
				38.70-47.93	-65-240	(Mangangka, Liu, Egodawatta ve Goonetilleke, 2015)
33	70			54		(Passeport, Hunt, Line, Smith ve Brown, 2009)
8	84			54		(Peterson, 2016)
78.5	82.4			72.5		
16-27				49	-240-65	(Roseen vd., 2006)
32.1	82.9			68.1		
-97	-			33		(Singh, Zhao, Sararvanan ve Fu, 2019)
			43.1	60.9		(Smith ve Hunt, 2007)
19	47			34		(Wan, Li ve Liu, 2018)
		-56	9	25		(Wang, Chuo ve Shanahan, 2017)
				25	74.1	(Wang vd., 2017)
3.2	10			25		
16.7	86			34		(Zhou, Li, Song, Cao ve Zhou, 2017)

2.9. Kirletici Giderimini Etkileyen Etmenler

Kirletici maddelerin etkili bir şekilde giderildiği ve akış hacminin azaltıldığı biyotutma sisteminin performansı, farklı bölgelerin farklı akış özelliklerine, yağış

rejimlerine, nüfus yoğunluğuna ve arazi kullanımına bağlı olarak değişiklik göstermektedir (Goh vd., 2019):

Toprak karışımı, biyotutmanın çok önemli bir parçasıdır. Kum, yüksek oranda hidrolik iletkenlik sağlar, üst topraktaki yumuşak kil, özellikle ağır metaller olmak üzere yüksek düzeyde kirleticiyi adsorbe eder ve organik maddeler (kompost) mikrobiyal gelişim ve bitki örtüsü için gereklidir. Yağmur suyunu tutma, kirleticiyi giderme ve bitki yetiştirme ortamı olarak hazırlanan toprak karışımının, geçirgenliğin arttırılması için 75-120 cm derinliğinde olması önerilmektedir (Zhang vd., 2021; Goh vd., 2019).

Biyotutma alanlarının tasarımında kirleticilerin tür ve miktarına uygun bitki ve türleri seçilmelidir. Bitki türlerinin seçimi için ana kriterler, yerel peyzaj ve ekoloji için uygunluk, aşırı koşullar altında hayatta kalma yeteneği ve hızlı ancak istilacı olmayan gelişimdir (Goh vd., 2019).

Yeşil altyapı uygulamaları yapan birçok ülkede (Amerika Birleşik Devletleri, Kanada, Malezya), biyotutma sistemlerinde standardizasyon için kılavuzlar hazırlanmakta, farklı konumdaki alanların toprak ve iklim özelliklerine göre değişen farklı toprak kompozisyonları önerilmektedir. Çeşitli kılavuzlarda, biyotutma alanlarının genellikle TSS için %75-97, TN için %30-66 ve TP için %35-85 giderim verimi sağlanacak şekilde tasarlanması önerilmektedir (Goh vd., 2019).

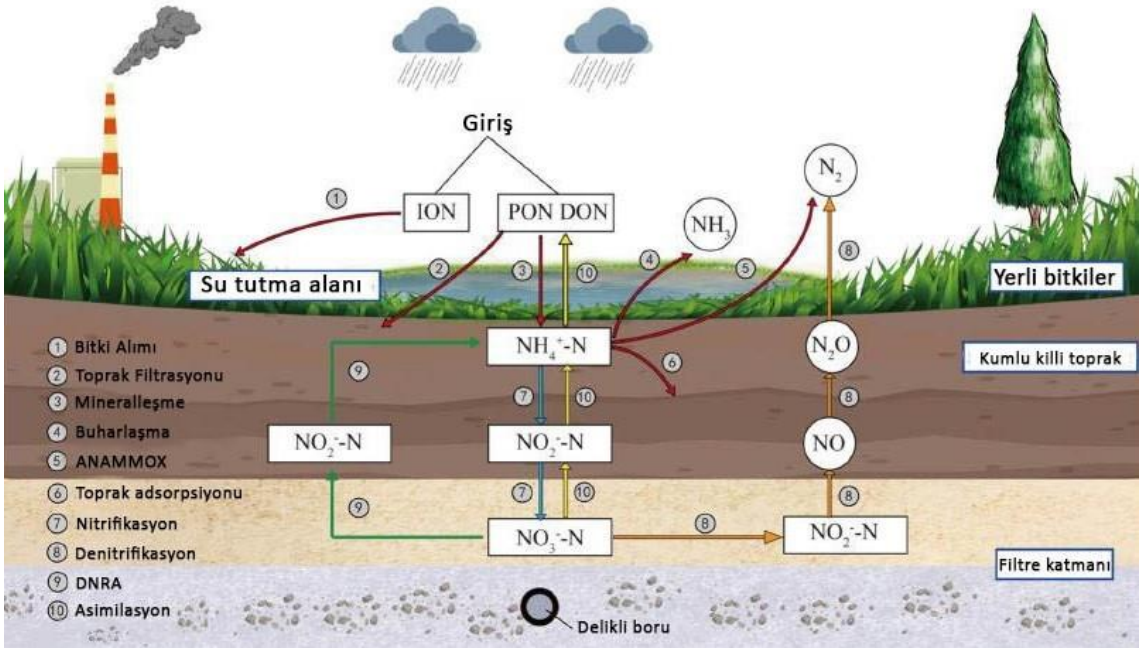
Kirletici gideriminde ortamın giderim kapasitesi, adsorpsiyonun gücüne ve gelen kirleticilerin konsantrasyonuna bağlıdır. Ortamın giderim kapasitesi fosfor için birkaç yıl veya daha kısa bir zaman diliminde tükenirken metaller ve hidrokarbonlar için uzun yıllar devam etmektedir (Chow vd., 2013).

Biyotutma sistemini tasarlamadan önce yağmur suyu akışındaki azot kirleticilerinin bileşiminin ve oranının belirlenmesi gerekmektedir. Biyotutma sistemindeki azot giderimi, organik, inorganik, partikül ve çözünmüş azot dahil olmak üzere çeşitli azot formlarının farklı kimyasal özellikleri ve azot dönüşümü için mevcut biyotutma sisteminin sınırlamaları nedeniyle değişkendir. Farklı iklim koşulları, kirletici yükleri ve toprak özelliklerine bağlı olmakla birlikte yüzeyde bitkilerin kullanılması azot giderimini arttırmaktadır (Zhang vd., 2021; Li ve Davis, 2014). Dolgu malzemeleri azot giderimi üzerinde farklı etkilere sahiptir. Talaş, gazete ve biyokömür azot giderimini arttırmakta, yalnızca kum ve toprak karışımı zayıf bir performans göstermektedir.

Aerobik koşullar altında biyotutma üst katmanında organik ve inorganik azotun bazı dönüşüm ve uzaklaştırma süreçleri bulunmaktadır. Biyotutma sistemindeki azot giderimi ve dönüşümünün ana süreçleri şunları içermektedir (Zhang vd., 2021):

1. PON sedimantasyonu/filtrasyonu,
2. Organik azotun mineralizasyonu,
3. NH_4^+-N fiksasyonu (iyon değişimi),
4. Mikrobiyal azot alımı,
5. Mikrobiyal azot dönüşümü (yani nitrifikasyon ve denitrifikasyon).

Şekil 2.6'da biyotutma sistemlerinde azot giderim süreçleri gösterilmektedir.



Şekil 2.6. Biyotutma sistemlerinde azot giderim süreçleri (Zhang vd., 2021)

PON, toprak filtrasyonu ile uzaklaştırılmakta ve yağmur suyu akışındaki DON, mikrobiyal mineralizasyon yoluyla NH_4^+-N'e dönüştürülmektedir. NH_4^+-N, negatif yüklü toprak kolloidleri tarafından adsorbe edilmekte; NH_4^+-N ve NO_3-N bitkiler tarafından absorblanmakta ve asimile edilmektedir. Asimilasyon, NH_4^+-N ve NO_3-N'nun mikrobiyal hücre kütlesine veya bitki biyokütlesine dönüştürüldüğü, burada geçici olarak organik azot olarak depolandığı bir süreçtir. $NH4^+$-N, biyotutma sisteminden mikrobiyal nitrifikasyon ile uzaklaştırılmaktadır. Bunun için NH_4^+-N, aerobik koşullar altında önce NO_2-N'a ve ardından NO_3-N'a dönüştürülmektedir. Mikroorganizmalar tarafından asimilasyon veya adsorpsiyon yoluyla azot tutulumu, kalıcı uzaklaştırmadan ziyade

geçici azot uzaklaştırılmasına neden olmakta ve koşulların değişmesiyle azotun geri salımı gerçekleşmektedir. NH_4^+-N'ndan farklı olarak NO_x-N negatif yüklü olup toprak parçacıkları tarafından adsorbe edilmemekte, biyotutma sisteminde hareketli hale gelmektedir. Nitrat, biyotutma sisteminde denitrifikasyon yoluyla N_2 formunda kalıcı olarak uzaklaştırılmaktadır. Denitrifikasyon anoksik veya anaerobik koşullar altında oluşmakta, organik karbon kaynağı, kükürt veya demir gibi substratlar gerektirmektedir (Zhang vd., 2021).

Li ve Davis (2014)'e göre, 16 yağış olayı sırasında konvensiyonel biyotutma alanında TN, PON, NO_3-N, NO_2-N, NH_3-N ve DON analiz etmişlerdir. PON'un sedimantasyon/filtrasyon, NH_3-N'nin iyon değişimi/sorbsiyon ve NO_2-N'nin oksidasyon yoluyla etkin bir şekilde uzaklaştırıldığını, ancak, biyotutma hücresinden önemli miktarda DON ve NO_3-N'nin filtrasyonu ile TN konsantrasyonda sadece %9 azalma sağlandığını belirtmişlerdir. Biyotutma hücresinde tutulan PON ve bitki artıkları, DON olarak süzülmekte veya NO_3-N'ye mineralize edilmektedir. Azotun çıkış formlarına NO_3-N (%46) ve DON (%42) hakimdir. Bu nedenle biyotutma sistemlerinde etkili azot giderimi için, NO_3-N için denitrifikasyon koşullarının yaratılmasına ek olarak, DON sızıntısının önlenmesi gerekmektedir (Li ve Davis, 2014).

İklimsel koşullar, biyotutma sistemindeki azot giderme verimini etkilemekte; bu etki, biyotutma sistemindeki mikrobiyal büyüme ve nitrifikasyon/denitrifikasyon süreçleri üzerinde önemli bir etkiye sahip olan sıcaklık değişimi ile gerçekleşmektedir. Uygun bir aralıkta sıcaklık artışı ile denitrifikasyon verimi, bitki büyümesi ve bitkiler tarafından besin alımı artmaktadır. Kurak dönemlerden sonra gerçekleşen yağışlı dönemlerde, toprakta azot ve fosfor içeren besi maddeleri yeniden ortama salınmaktadır. Kuru ve havalandırılmış topraklarda organik azotun mineralleşme oranını ve inorganik azot içeriği artmaktadır. Ayrıca, havada kurutmanın neden olduğu kuruma ile mikrobiyal ölüm gerçekleşmekte ve azot içeren kimyasallar salınmaktadır. Biyotutma sistemi kuruma sürecine girdikçe denitrifikasyon verimi düşmekte ve yüksek çözünürlüğe ve hareketliliğe sahip nitrat birikimi gerçekleşmektedir (Zhang vd., 2021). Ayrıca, biyotutma sistemine giren azot konsantrasyonu da azot giderme verimliliği üzerinde etkilidir. Düşük giriş konsantrasyonu ile giderim veriminin yüksek giriş konsantrasyona göre daha yüksek olduğu gösterilmiştir (Goh vd., 2019).

Ortam reaksiyonu incelendiğinde; pH 7.5-8 aralığında optimum giderim gerçekleştiği, pH 6.5 ve altındaysa sürecin inhibe olduğu ve pH yükseldikçe nitrit gideriminin arttığı belirtilmektedir. Hidrolik kalma süresi (HRT), azot biyotransformasyonunu etkilemektedir (Zhang vd., 2021).

TP'nin uzaklaştırılması, filtreleme, adsorpsiyon ve mikrobiyal aktivite süreçleriyle gerçekleşmektedir. TP giderimini etkileyen faktörler arasında bitkilerin varlığı, filtre ortamı karışım oranları ve toprak iletkenliği yer almaktadır. TP giderimi, bitki kullanılan biyotutma ortamlarında bitkisiz ortamlara göre daha yüksektir ve düşük sıcaklıkta yüksek oranda gerçekleşmektedir. Tanecik boyutu büyüdükçe tutulumun azalmakta, ayrıca, fosfor içeriği yüksek toprakların kullanıldığı biyotutma sistemlerinde çıkış suyunda TP artışı gerçekleşmektedir (Goh vd., 2019).

Kluge vd. (2018)'e göre, uzun süreli biyotutma sistemlerinde (11-22 yıl) metal birikimini incelemişlerdir. Toprağın üst tabakasında (0-20 cm) önemli miktarda metal birikimi görülmüş, tüm metallerin ortalama konsantrasyonları toprak yüzeyinde (0-10 cm) en yüksek değerlere ulaşırken, artan derinlikte metal konsantrasyonlarının azaldığı gözlenmiştir. Akan suyun giriş noktalarında yüksek metal konsantrasyonları bulunmuş, giriş noktasından 1,5 m' den daha fazla bir mesafede, metal konsantrasyonlarının başlangıçtaki toprak konsantrasyonlarına kıyasla arttığı ve biriken metallerin çoğunun suda az çözünür olduğunu belirlemişlerdir (Kluge vd., 2018).

BÖLÜM 3

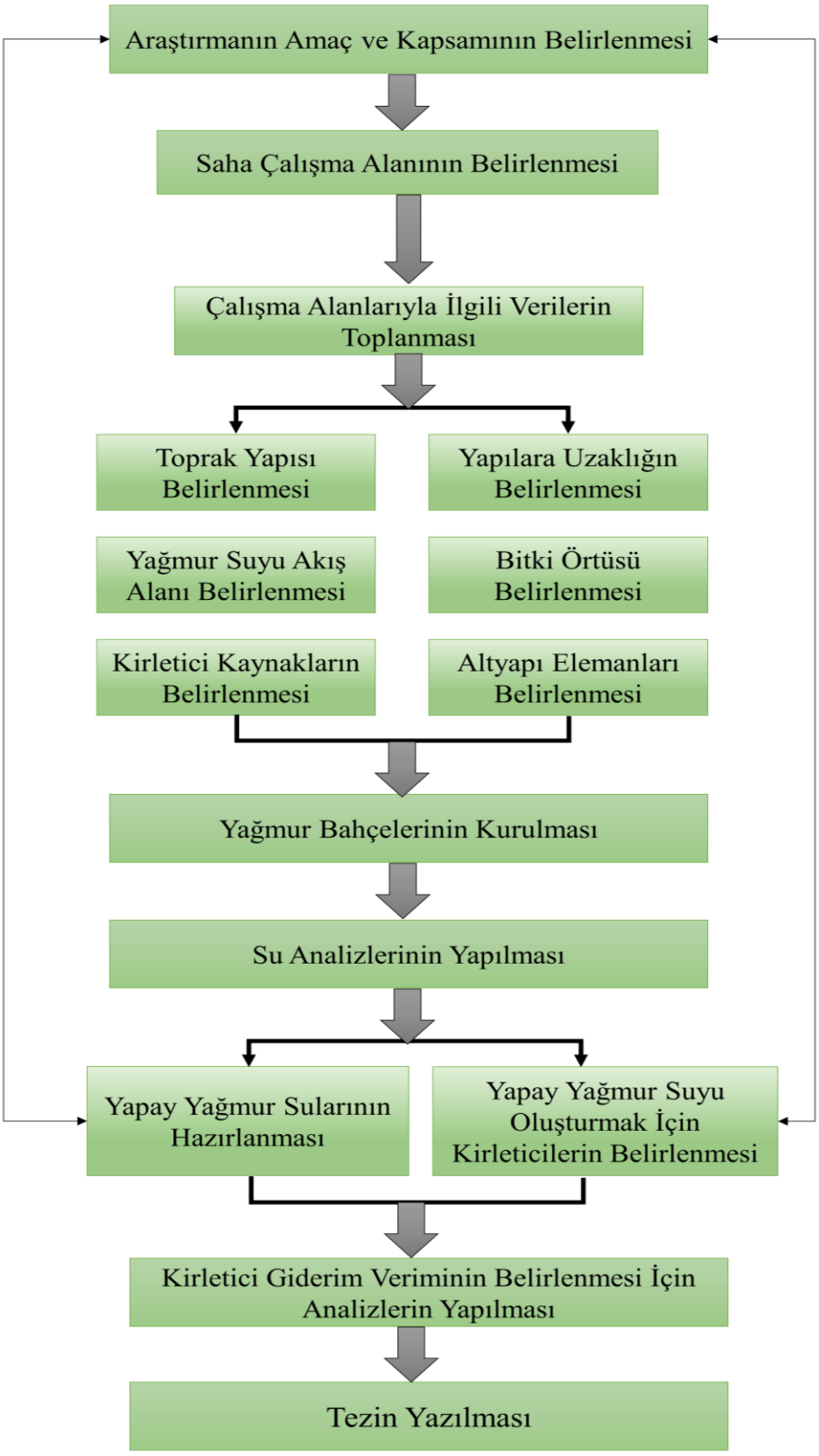
MATERYAL VE YÖNTEM

Bu bölümde tez çalışmasında, kullanılan materyal ve araştırmada verilerin değerlendirilip sentezlenmesinde izlenen yöntemler açıklanmaktadır.

Tez çalışması dört ana aşamadan oluşmaktadır:

1. Literatür taraması ve literatürde yer alan çalışmaların değerlendirilerek tez çalışmasının kapsam ve yönteminin belirlenmesi,
2. Saha çalışması için yer seçimi yapılması ve seçilen alanın fiziksel özelliklerinin belirlenmesi,
3. Yağmur bahçelerinin kurulması,
4. Kirletici giderim verimlerinin belirlenmesi için süzüntü sularının analiz edilmesi ve sonuçların değerlendirilmesi.

Çalışmanın akış şeması Şekil 3.1'de gösterilmiştir.



Şekil 3.1. Tez çalışması akış şeması

Çalışma konusunun değerlendirilmesi aşamasında, sürdürülebilir kentsel yağmur suyu yönetimi, yeşil altyapı, yağmur bahçeleri ve biyotutma sistemlerinin kirletici giderim verimleri ile ilgili ulusal ve uluslararası literatür incelenmiştir. Çalışma alanı olarak Edirne İli Merkez İlçesi Belediye sınırında ve Trakya Üniversitesi'nin üç farklı yerleşkesinde bulunan alanlar (Yarı-özel açık-yeşil alanlar içermesi nedeniyle) seçilmiştir. Seçilen alanların ve yağmur suyu havzalarının gösterilmesinde Google Earth görüntülerinden yararlanılmıştır.

Farklı derinlik ve miktarlarda biyotutma ortamları hazırlanarak, iklim ve toprak yapısında uygun yerel bitkiler seçilerek ve yağmur bahçelerine dikilmiştir. Bu kapsamda, öncelikle yer seçiminin yapılması aşamasında, daha sonra bahçelerin kurulması ve kirletici gideriminin incelenmesi aşamalarında; bölgenin topoğrafik, meteorolojik, hidrolojik yapısı, arazi kullanımı, toprak yapısı, mevcut altyapı durumu, yapılaşmış alanlarda geçirimli ve geçirimsiz yüzey vb. analizleri yapılmıştır.

Bir yıllık bir süreçte, alan seçimi sırasında belirlenecek olan çevresel kirleticilere bağlı olarak, yağmur bahçelerine akan yağmur suyundaki kirleticilerin bitkiler ve topraktaki tutulma miktarlarını belirlemek amacıyla drenaj borularıyla toplanan sızıntı suyunda nitrit, nitrat, sülfat, fosfat, çinko, bakır, kurşun ve kadmiyum miktarları belirlenmiştir. Mevsimsel yağışların gerçekleşmemesi nedeniyle, bahçelere giren ve toplanan yağmursularının analiz çalışmaları tamamlanamamıştır. Bu nedenle projenin tamamlanabilmesi için belirli miktarlarda kirleticileri içeren yapay yağmur suyu ile sulama yapılarak, farklı bekletme sürelerinin sonunda süzüntü numunelerinin analizi TÜTAGEM'den hizmet alımı ile yapılmıştır.

Çalışmanın yapılacağı alanlarda, doğal yağmur suyu deney süresince gerekli miktarda ve sabit su kalitesinde bulunmadığından ve kalitesinde önemli değişiklikler olmaksızın depolanamadığından, yapay yağmur suyu oluşturulmuştur. Yapay yağmur suyu, çeşme suyunun deklorinasyon olması ve sıcaklığının dengelenmesi amacıyla 24 saat dinlendirilmiştir. Çizelge 3.1' de yapay yağmur suyunda hedeflenen kirletici konsantrasyonları, Çizelge 3.2' de yapay yağmur suyu oluşturmak için kullanılan maddeler ve Çizelge 3.3' de yapay yağmur suyu oluşturulurken kullanılan tuz miktarları, Şekil 3.2.' de yapay yağmur suyu çözeltisi hazırlanırken kullanılan tuzlar, tuzların hassas terazide tartımı, çözelti hazırlanırken kullanılan tuzlar, laboratuvar ortamında steril beher içerisinde çözeltinin hazırlanması gösterilmektedir.

Çizelge 3.1. Yapay yağmur suyunda hedeflenen kirletici konsantrasyonları

İyon	Kabul edilen ve uygulanan madde konsantrasyonu (mg/L)
Cu^{+2}	14.0
Pb^{+2}	20.0
Cd^{+2}	0.7
Zn^{+2}	100
NO_2^-	0.5
NO_3^-	269,4
SO_4^{2-}	2.0
PO_4^{3-}	0.5

Çizelge 3.2. Yapay yağmur suyu oluşturmak için kullanılan maddeler

Ürün	Kullanım Amacı	
$Cu(NO_3)_2$ – Bakır (II) Nitrat	Bakır ilavesi	Nitrat ilavesi
$Pb(NO_3)_2$ – Kurşun (II) Nitrat	Kurşun ilavesi	
$Cd(NO_3)_2$ – Kadmiyum (II) Nitrat	Kadmiyum ilavesi	
$Zn(NO_3)_2$ – Çinko Nitrat Hegzahidrat	Çinko ilavesi	
$NaNO_2$ – Sodyum Nitrit	Nitrit ilavesi	
Na_2SO_4 – Sodyum Sülfat (Sususz)	Sülfat ilavesi	
KH_2PO_4 – Potasyum Dihidrojen Fosfat	Fosfat ilavesi	

Çizelge 3.3. Yapay yağmur suyu oluşturulurken kullanılan tuz miktarları

İyon	200 L için 1 L'de çözülen tuz miktarı
Cu^{+2}	1820 mg
Pb^{+2}	2040 mg
Cd^{+2}	86.1 mg
Zn^{+2}	13600 mg
NO_2	50 mg
NO_3	269.4 mg
SO_4^{-2}	200 mg
PO_4^{-3}	50 mg



(a)


(b)


(c)



(d)

Şekil 3.2. (a) Yapay yağmur suyu çözeltisi hazırlanırken kullanılan tuzlar, (b) Tuzların hassas terazide tartımı, (c) Çözelti hazırlanırken kullanılan tuzlar, (d) Laboratuvar ortamında steril beher içerisinde çözeltinin hazırlanması

Yapay yağmur sularının hazırlanması için öncelikle çeşme suları analiz edilmiş, hedeflenen kirletici konsantrasyonuna ulaşmak için 24 saat dinlendirilmiş çeşme suyuna tuzlar ilave edilmiştir. Haftada 6 kez yağmur suyu dozlaması yapılmıştır. 1 haftalık çalışma döneminde yağmur suyu dozlaması yapıldıktan sonraki 24. Saatte süzüntü numuneleri alınmış ve analiz edilmiştir.

Yağmur bahçelerinden alınan su örneklerinin bakır, çinko, kadmiyum, kurşun içeriklerinin belirlenmesinde EPA 200.8 ve ICP-MS (Inductively Coupled Plasma – Mass Spectrometer) cihazı kullanılmıştır. Su örnekleri TÜTAGEM Laboratuvarında 50 mL'lik falkonlara alınarak 1+1 HNO_3 ile asitlendirilmiş ve filtreleme işlemleri yapılarak analize hazır hale getirilmiştir. EPA 200.8 metodu baz alınarak 0-1000 ppb aralığında kalibrasyon basamakları hazırlanmış ve Agilent Technologies 7700 ICP-MS System cihazında okunmuştur. Ayrıca yağmur bahçelerinden alınan her bir su örneğinin analizi ICP-MS cihazında, dört kez tekrarlanmıştır. 100 ppb karışım hazırlanarak cihaz iç kontrol çalışması yapılmıştır.

BÖLÜM 4

SONUÇLAR

4.1. Çalışma Alanı Özellikleri

4.1.1. Coğrafi Konum

Çalışma alanlarının bulunduğu olan Edirne kent merkezinin, Marmara Bölgesi, Trakya Alt Bölgesi'nde bulunmaktadır. Edirne İli'nin kuzey yönünde Istıranca Dağları, güney yönünde Koru Dağları ve Ege Denizi- Saroz Körfezi, batı yönünde Meriç Nehri ve Meriç Ovası, doğu yönünde ise Ergene Ovası yer almaktadır. Edirne İli 41º 40' kuzey enlem derecesi ile 26º 30' doğu boylam derece aralığında bulunmaktadır. Edirne İli, doğusunda Kırklareli ve Tekirdağ illeri, batısında Yunanistan ve kuzeyinde Bulgaristan ülkeleri, güneyinde ise Çanakkale İli ile kuşatılmıştır. Edirne İlinin deniz seviyesinden yüksekliği 51,19 m'dir (Edirne İli Tabiat Turizmi Master Planı, 2013).

Şekil 4.1' de yağmur bahçelerinin kent içindeki konumu gösterilmektedir.

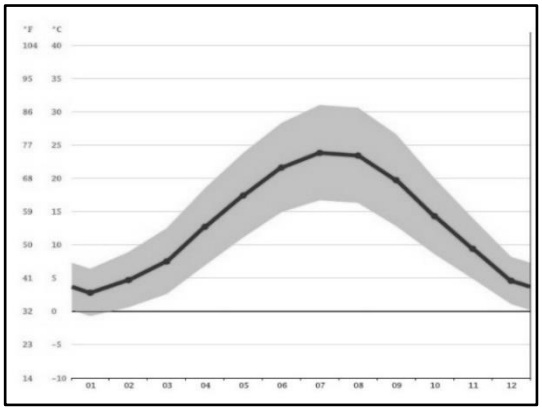


Şekil 4.1. Yağmur bahçelerinin kent içindeki konumu

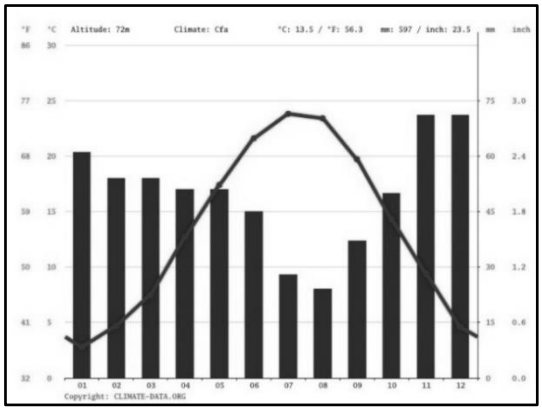
4.1.2. İklim

Edirne ili Marmara Bölgesi'nde olup ilde Akdeniz iklimi hüküm sürmektedir. İklim şartlarına bakıldığında, kışların serin ve yağışlı, yazların sıcak ve kurak geçtiği gözlemlenmektedir. Mevsimsel olarak mevcut senelik yağış miktarı ortalama 600 mm civarıdır. İlde en fazla yağış miktarı ise Kasım, Aralık ve Ocak aylarında ölçülmüştür. Ayrıca ilde aylık yağış miktarı ortalama 43,1 mm, senelik sıcaklık ortalama değeri 13,8 ºC, nem oransal yüzdeliği %70'tir. Rüzgâr hızı ortalamasının senelik 1,9 m/s, basınç ortalamasının senelik 1011,7 mb/hg ve hakim rüzgârın kuzey yönünde olduğu görülmektedir. İlde 24 mm yağmur yağışı ile Ağustos ayı senenin en kurak ayıdır. En çok yağış ortalama 71 mm yağış seviyesiyle Kasım ayında gerçekleşmektedir. İlde 23,8 °C sıcaklık derecesi ile Temmuz ayı senenin en sıcak ayı olmaktadır. Meteorolojik verilere göre Ocak ayı ortalama sıcaklık değeri 2,8 °C civarıdır. Bu değerin senenin en düşük ortalaması olduğu görülmektedir (MGM, 2019).

Meteoroloji Genel Müdürlüğü'nün Edirne İline ait verilerine dayanılarak aylık ve yıllık bazda ortalama sıcaklık Şekil 4.2, ortalama yağış miktarı ve yağış gün sayıları Şekil 4.3' de, 2021 su yılına ait aylık toplam yağış miktarları Çizelge 4.1' de gösterilmiştir.



Şekil 4.2. Edirne ili aylara ait ortalama sıcaklık grafiği (MGM, 2019)



Şekil 4.3. Edirne ili aylara ait ortalama yağış grafiği (MGM, 2019)

Çizelge 4.1. Edirne Merkez İlçe'de yıllara göre aylık toplam yağış miktarları (MGM, 2022)

İstasyon No	İstasyon Adı	Yıl	Ay	Aylık Toplam Yağış (mm)
17050	EDİRNE	2020	10	65,6
17050	EDİRNE	2020	11	4,4
17050	EDİRNE	2020	12	92,0
17050	EDİRNE	2021	1	209,6
17050	EDİRNE	2021	2	52,6
17050	EDİRNE	2021	3	37,6
17050	EDİRNE	2021	4	66,4
17050	EDİRNE	2021	5	29,6
17050	EDİRNE	2021	6	71,0
17050	EDİRNE	2021	7	24,0
17050	EDİRNE	2021	8	12,0
17050	EDİRNE	2021	9	10,0
Toplam				674,8

4.1.3. Hidroloji

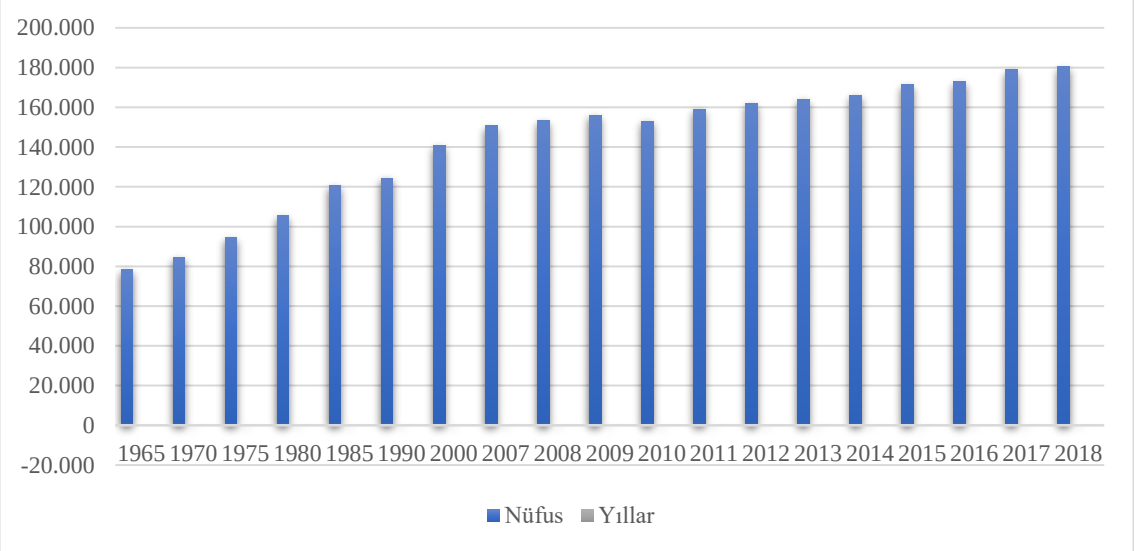
Edirne'de Meriç Nehri ve kolları olan Tunca, Arda ve Ergene Nehirleri yer almaktadır. Yunanistan ile sınır oluşturan Meriç Nehri'nin Türkiye toprakları ve sınır boyunca uzunluğu 187 km olup Karaağaç üçgeni içinde Türkiye toprakları içinden geçen kısmı yaklaşık 13 km'dir. Toplam uzunluğu 56 km olan Tunca Nehri'nin 12 km'lik bölümü Bulgaristan ile sınır oluşturmaktadır (Edirne Belediye Başkanlığı, 2017).

4.1.4. Toprak Yapısı

Edirne İli, toprak özellikleri açısından değerlendirildiğinde öncelikle toprak çeşitliliği dikkati çekmektedir. Edirne ili arazisinde Alüvyal Topraklar, Hidromorfik Alüvyal Topraklar, Kahverengi Orman Toprakları, Kireçsiz Kahverengi Orman Toprakları, Kireçsiz Kahverengi Topraklar ve Vertisoller olmak üzere altı büyük toprak grubu bulunmaktadır (Tarım ve Köy İşleri Bakanlığı, 2005).

4.1.5. Demografik Yapı

Edirne ilçe merkezi 2018 yılı verilerine göre 180327 nüfusu ile Trakya Alt Bölgesinde sosyal, kültürel ve ekonomik açıdan öneme sahiptir. İl merkezinin yıllık nüfus hızı artışı ele alındığında bu değerin binde 15.32 olduğu görülmektedir. Edirne ilçe merkezi yıllara göre nüfus dağılımı Şekil 4.4' de verilmektedir (TUİK, 2019).



Şekil 4.4. Edirne kent merkezi yıllara göre nüfus dağılımı (TUİK, 2019)

4.1.6. Edirne Kent Merkezi Atıksu Uzaklaştırma, Arıtma ve Yağmur Suyu Tesisleri

Edirne İli Merkez İlçesini kapsayan 1980li yıllarda planlanan, 1990lı yıllarda inşa edilmiş, 2007 yılında iyileştirmeler yapılmış fenni kanalizasyon şebekesi bulunmaktadır. Mevcut kanalizasyon ve yağmur suyu birleşik sistemde çalışır olup, yağışlarda taşmalar yaşandığı rapor edilmektedir (EB Faaliyet Raporu, 2017). Kanalizasyon sistemi, günlük 120 lt/gün/kişi, yağışlarla birlikte 150lt/gün/kişi kapasiteyle çalışmakta olup mevcut

altyapı hizmetinin 2030 yılında 300lt/gün/kişi ve 2050 yılında 490lt/gün/kişi ihtiyaca hizmet verebilecek şekilde iyileştirileceği belirtilmektedir. Edirne İli Merkez İlçe kanalizasyon şebekesi 5 bölgeye ayrılıp projelendirilmiş, bölgelerin nüfusları, içme suyu ihtiyaçları ve atıksu üretim miktarları hesaplanmıştır. Proje kapsamında, projeksiyon yılı olan 2028 yılında oluşacak atıksu debisine göre 3 adet kanalizasyon terfi merkezi, taşıyıcı hatlar, toplayıcı hatlar ve kolektör hatları inşa edilmiş ve işletmeye alınmıştır (EBB Atıksu Arıtma Tesisi Kesin Proje Raporu, 2013).

Edirne İli Merkez İlçesi için hazırlanmış olan yağmur suyu projesi kapsamında inşaatlar, 2008 yılında Edirne (Merkez) Kanalizasyon ve Yağmur Suyu İnşaatı işi kapsamında yapılmıştır. Proje kapsamında Yalnızgöz Yağmur Suyu Terfi Merkezi (Çavuşbey Mahallesi), Demirköprü Yağmur Suyu Terfi Merkezi (Kaleiçi Darülhadis Caddesi), Mezbaha Yanı Yağmur Suyu Terfi Merkezi (Talatpaşa Mahallesi) ve Uzunkaldırım Yağmur Suyu Terfi Merkezi (Abdurrahman Mahallesi) inşaa edilmiştir (EBB İçmesuyu Ön Proje Raporu, 2015).

4.1.7. Edirne Kent Merkezi Açık Yeşil Alanları

Edirne'de 1995 yılında kent merkezinde kişi başına düşen aktif yeşil alan miktarı 26 m² iken, 2011 yılında yapılmış revizyon ve ilave imar planı açıklama raporuna göre bu oran 23,91 m² olmuştur (EBB, 2011). Yapılaşma ile birlikte yeşil alanların azalması, özellikle sonbahar, kış ve ilkbahar aylarında yoğun yağışların görüldüğü kentte yağış sularının kontrolüyle ilgili sorunlara yol açmaktadır. Kent topoğrafik olarak nehirlere doğru eğilimli olduğundan, yağışın çok olduğu zamanlarda bazı mahallelerde göllenmeler görülmektedir (Bayrak, Keleş ve Ölmez, 2019).

Edirne Belediyesi İmar Notlarından alınan verilere göre; belediye mücavir alanı içerisinde alanın büyük çoğunluğunu konut alanlarının oluşturduğu görülmektedir. %44,74'lük değer ile konut alanlarının alanın yaklaşık yarısını kapladığı görülmektedir. Toplam alanın sadece %3,03 'lük bir alanı açık yeşil alanları kaplamaktadır. Edirne Belediyesi imar notlarına göre belediye müvavir alan olan 473,51 ha alanın sadece 7,89 ha alanı açık yeşil alanları oluşturmaktadır (EBB, 2018). Ülkemizde 3194 sayılı İmar Yasası kapsamınca tasarlanan ve 2 Kasım 1985 tarih, 18916 sayılı Resmî Gazetede yayınlanarak yürürlüğe giren "İmar Planı Yapılması ve Değişikliklerine Ait Esaslara Dair Yönetmelik" çerçevesinde yeşil alanlar ile ilgili standartlar belirlenmiştir. Bu belirlenen

hükümlere göre belediye sınır alanı içeresinde 10 m^2/kişi, belediye ve mücavir alan sınırları dışında kalan alanlarda ise 14 m^2/kişi potansiyel yeşil alan bırakılması gerektiği görülmektedir (Aksoylu vd., 2005). Edirne Belediyesi 1/1000 Uygulama İmar Planı üzerinden alınan verilere göre kişi başı yeşil alan miktarı 10,2 m^2'dir (EBB, 2018).

4.2. Yağmur Bahçeleri için Yer Seçimi

Yer seçimi aşamasında, toprak yapısı, yağmur suyu akış alanı vb. saha gözlemleri ile belirlenmiştir. Toprak yapısı, yapılara uzaklık, yeraltı suyu mevcudiyeti, altyapı elemanları, bitki örtüsü, kirletici kaynaklar dikkate alınarak yer seçimi yapılmıştır.

Çalışma alanlarındaki toprakların tekstürü el ile muayene edilerek kumlu-tınlı toprak tekstür sınıfında olduğu belirlenmiştir. Şekil 4.5' de el ile toprak tekstür muayenesi gösterilmektedir. Toprakların kolaylıkla parçalanabilir ve yumuşak olduğu, nemli toprağın plastiklik özelliğinin az olduğu gözlemlenmiş ve toprağın drenaj kapasitesinin iyi ve toprak yapısının yağmur bahçesinin yapımına elverişli olduğu belirlenmiştir (Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, 2018).



Şekil 4.5. Toprak tekstür muayenesi

Yağmur bahçelerinin yapılara uzaklığını belirlerken en az 3m, en fazla 10m mesafe uygunluğu dikkate alınmıştır. Yağmur bahçelerinin yer seçiminde yapılara uzaklığı Şekil 4.6' da gösterilmektedir. Çalışma alanlarının eğiminin %2 olduğu belirlenmiştir.


(a)

(b)

(c)

Şekil 4.6. Yağmur bahçelerinin yapılara uzaklığı

(a) Makedonya Yerleşkesi (b) Balkan Yerleşkesi (c) Teknopark bahçesi

4.3. Yağmur Bahçelerinin Boyutlandırılması

Yağmur suyu toplama havzaları, su akış yönleri gözlemlenmiş, fotoğraf ve haritalardan alan ölçümleri yapılmış ve toplanan yağmur suyu miktarı belirlenmiştir. Su toplama alanları; kısaca çatıların kapladığı alanların yatay düzlemdeki izdüşümleridir. Çatının şekline bakılmaksızın alan önemlidir. Dikkat edilmesi gereken nokta, çatının yağmur bahçesi kurulacak alan tarafına doğru oluklu olup olmadığıdır.

Biyotutma alanları, havza alanlarının %2.5-5'i kadar boyutlandırılmaktadır. Yağmur bahçelerinin verimli çalışabilmesi için 10-30 m^2 aralığında boyutlandırılması önerilmektedir. Hesaplanan yağmur suyu miktarı ve boyutlandırma koşulları dikkate alınarak, üç yağmur bahçesi de su toplama havzalarının %5-6 büyüklüğünde inşa edilmiştir. Çizelge 4.2' de yağmur bahçesi havzalarında toplanacak yağmur suyu miktarları gösterilmektedir.

Çizelge 4.2. Yağmur bahçesi yağmur suyu miktarları

	Teknopark Bahçesi	Balkan Yerleşkesi	Makedonya Yerleşkesi
Havza alanı - Çim alan (m^2)	174,86	151,38	120,43
Havza alanı - Çatı kaplaması (m^2)	12,40	138,04	184,51
Havza alanı - Tuğla (m^2)	-	-	13,42
Toplanan yağmur suyu (m^3/yıl)	18	76	60
Bahçe alanı (m^2)	12	18	12
Bahçe derinliği (cm)	30	50	50
Yapay yağmur suyu dozlaması (L)	94	396	312

Klasik hidrolojik hesaplama yöntemlerine göre; yağmur bahçesi havzasında tutulacak suyun miktarı Formül 2' de, yağışın akışa çevrilme katsayıları Çizelge 4.3' de gösterilmektedir;

$$Q = C \times i \times A \qquad (2)$$

Q : Oluğa gelen su (m^3/süre yada lt/süre)

C : Akış katsayısı (birimsiz). Yağışın yüzeyin yapısına bağlı olarak suya dönüştürülme katsayısı.

i : m^2'ye düşen yağışın şiddeti (mm/saat)

Çizelge 4.3. Yağışın akışa çevrilme katsayıları (Doğangönül ve Doğangönül, 2008)

Su Tutma Yüzeyi Tipi	**Akış Katsayısı (c)**	**Su Tutma Yüzeyi Tipi**	**Akış Katsayısı (c)**
Kiremitler	**0.75-0.90**	**Kaplamalar**	**0.50-0.80**
Eski kiremit, yıpranmış	0.75	Beton kaplama	0.60-0.80
Eski kiremit yıpranmamış	0.75-0.80	Tuğla kaplama	0.50-0.60
Yeni kiremit	0.80-0.90	**Zeminler**	**0.01-0.30**
Metal Çatılar	**0.70-0.90**	%10 dan az eğimli toprak zemin (sıkıştırılmamış)	0.01-0.10
Dalgalı eski metal çatı	0.70-0.75	%10 dan az eğimli toprak zemin (sıkıştırılmış)	0.15-0.30
Dalgasız eski metal çatı	0.75-0.80	Doğal kaya döşeme	0.20-0.50
Dalgalı yeni metal çatı	0.80-0.85	Yeşil sahalar	0.05-0.10
Dalgasız yeni metal çatı	0.85-0.90		

1.3.1. Makedonya Yerleşkesi

Yağışın akışa çevrilme katsayıları baz alınarak, çatının su tutma yüzey tipine göre %10 dan az eğimli toprak zemin (sıkıştırılmamış) 0.10, kiremitler 0.80, ve tuğla kaplama 0.50 akış katsayıları C seçilmiştir. Makedonya yerleşkesi için Google Map üzerinden su toplama havzaları; çim alan 120 m^2, kiremit yüzey alan 185 m^2 ve tuğla döşeme tretuvar alan 27 m^2 olarak ölçülmüştür. Metrekareye düşen yıllık ortalama yağışın şiddeti 700 mm olarak alınmıştır. Şekil 4.7' de su toplama alanları gösterilmektedir.

Çatıda tutulacak suyun formülü; Q = C x i x A

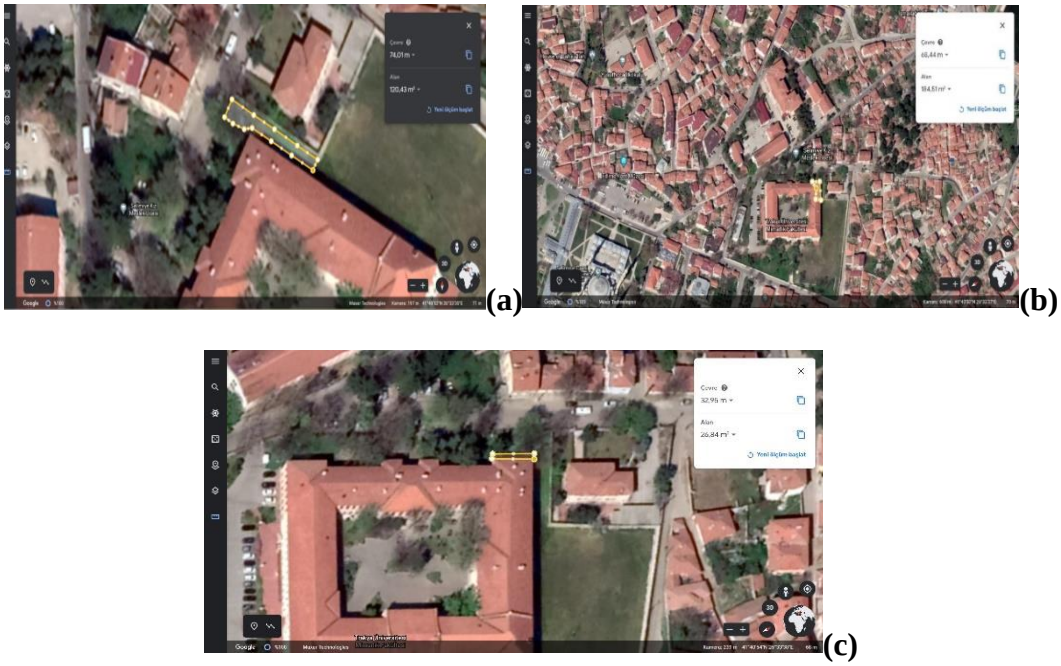
Q_1 = 0.10 x 0.7 m/yıl x 120 m^2 = 8,4 m^3/yıl

Q_2 = 0.80 x 0.7 m/yıl x 185 m^2 = 103,6 m^3/yıl

Q_3 = 0.50 x 0.7 m/yıl x (27/2) m^2 = 4,7 m^3/yıl

Çatıda tutulacak suyun aylık miktarı;

$Q_1 + Q_2 + Q_3$ = 8,4 + 103,6 + 4,7 = 116,7 m^3/yıl = 9,7 m^3/ ay



Şekil 4.7. (a) Google Map üzerinden çim alan, (b) Google Map üzerinden kiremit yüzey alanı, (c) Google Map üzerinden tuğla döşeme tretuvar alanı

1.3.2. Balkan Yerleşkesi

Yağışın akışa çevrilme katsayıları baz alınarak, çatının su tutma yüzey tipine göre %10 dan az eğimli toprak zemin (sıkıştırılmamış) 0.10 ve metal çatılar 0.80 akış katsayıları C seçilmiştir. Balkan yerleşkesi için Google Map üzerinden su toplama havzaları; çim alan 152 m^2, metal çatı yüzey alan 138 m^2 olarak ölçülmüştür. Metrekareye düşen yıllık ortalama yağışın şiddeti 700 mm olarak alınmıştır. Şekil 4.8' de su toplama alanları gösterilmektedir.

Çatıda tutulacak su;

Q_1 = 0.10 x 0.7 m/yıl x 152 m^2 = 10,6 m^3/yıl

Q_2 = 0.80 x 0.7 m/yıl x 138 m^2 = 77,3 m^3/yıl

Çatıda tutulacak suyun aylık miktarı;

$Q_1 + Q_2$ = 10,6 + 77,3 = 87,9 m^3/yıl = 7,3 m^3/ ay



(a)



(b)

Şekil 4.8. (a) Google Map üzerinden metal çatı yüzey alan, (b) Google Map üzerinden çim alan

1.3.3. Teknopark Bahçesi;

Yağışın akışa çevrilme katsayıları baz alınarak, çatının su tutma yüzey tipine göre %10 dan az eğimli toprak zemin (sıkıştırılmamış) 0.10 ve kiremitler 0.80 akış katsayıları C seçilmiştir. Teknopark Bahçesi için Google Map üzerinden su toplama havzaları; çim alan 175 m^2, kiremit yüzey alan 25 m^2 olarak ölçülmüştür. Metrekareye düşen yıllık ortalama yağışın şiddeti 700 mm olarak alınmıştır. Şekil 4.9' da su toplama alanları gösterilmektedir.

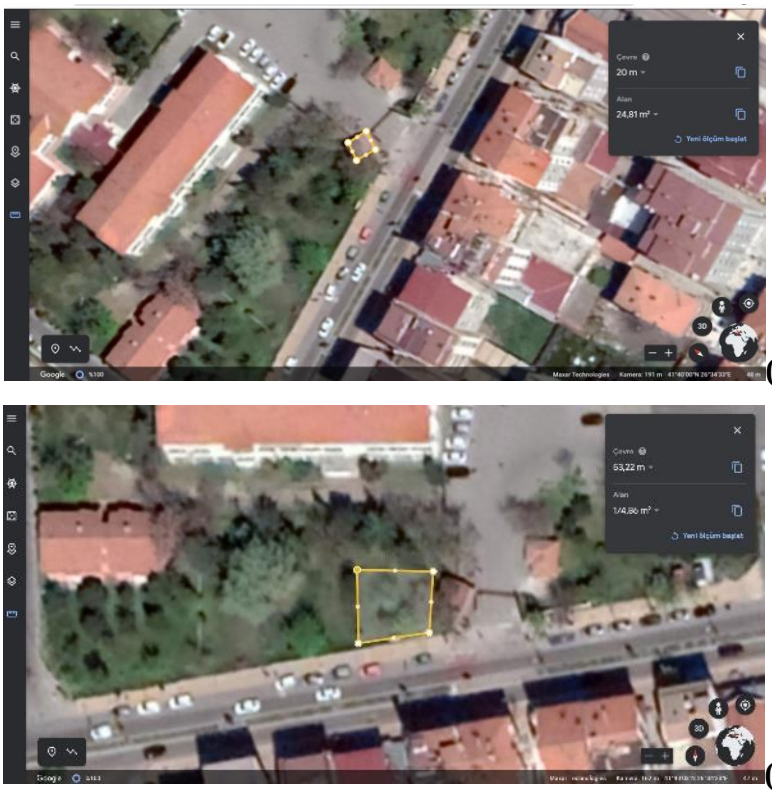
Çatıda tutulacak su;

$Q_1 = 0.10 \times 0.7$ m/yıl x 175 $m^2 = 12{,}3$ m^3/yıl

$Q_2 = 0.80 \times 0.7$ m/yıl x (25/2) $m^2 = 7{,}0$ m^3/yıl

Çatıda tutulacak suyun aylık miktarı;

$Q_1 + Q_2 = 12{,}3 + 7{,}0 = 19{,}3$ m^3/yıl = 1,6 m^3/ ay



(a)

(b)

Şekil 4.9. (a) Google Map üzerinden kiremit yüzey alanı, (b) Google Map üzerinden çim alan

4.4. Yağmur Bahçesi Bitki Seçimi

Yağmur bahçelerinin ekim alanı 3 bölgeden oluşmaktadır. Göllenme bölgesi, su birikiminin olduğu ve suya dayanıklılığı yüksek bitkilerin dikildiği; nemli bölge, hem kurak hem de nemli ortama uyum sağlayabilen türde bitkilerin dikildiği; kuru bölge ise daha kuru toprakta yaşayabilecek bitkilerin dikildiği bölümdür (Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, 2018). Çizelge 4.4' de yağmur bahçelerinde bölgelere göle kullanılan bitkiler gösterilmektedir.

Çizelge 4.4. Yağmur bahçesi bitki düzeni

Ekim Alanı Bölgeleri	**Bitkiler**
Göllenme bölgesi	*Imperata cylindrica*
Nemli bölge	*Rosa sp., Chrysanthemum sp., Gaura lindheimeri, Allium sp.,*
Kuru bölge	*Salvia rosmarinus, Iris germanica, Canna sp., Salvia officinalis, Hydrangea macrophyll, Lavandula sp.*

Makedonya Yerleşkesi, Balkan Yerleşkesi ve Teknopark bahçesi bitkilendirilmesi yapılırken her bitki için çukur kazılıp, çukura bitki yerleştirildikten sonra hava boşluğu kalmayacak şekilde toprakla doldurularak zemin sıkıştırılmıştır. Edirne iklim yapısına uygun bitkiler seçilerek, yağmur bahçelerine dikilmiştir.

Yağmur bahçelerinde kullanılan bitkiler Şekil 4.10' da gösterilmektedir.

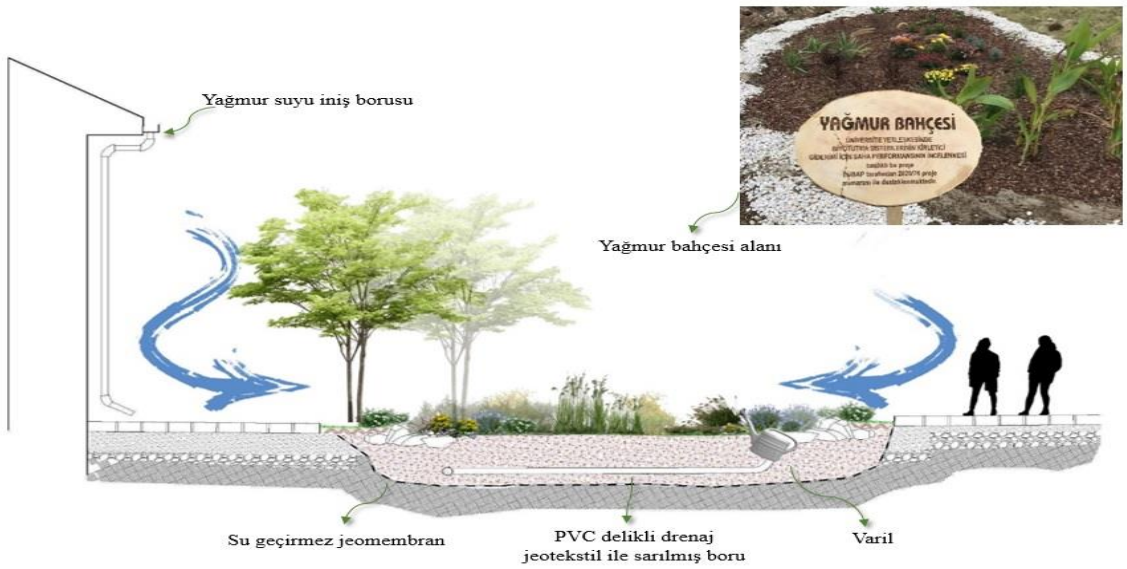


Şekil 4.10. (a) *Rosa sp.,* (b) *Salvia officinalis,* (c) *Chrysanthemum sp.* (ç) *Gaura lindheimeri,* (d) *Canna sp.,* (e) *Iris germanica* (f) *Imperata cylindrica,* (g) *Allium sp.,* (ğ) *Salvia rosmarinus* (h) *Lavandula sp.* (ı) *Hydrangea macrophyll*

4.5. Yağmur Bahçelerinin Kurulum Aşaması

Trakya Üniversitesi Balkan ve Makedonya Yerleşkelerinde ve Trakya Teknopark bahçesinde birer yağmur bahçesi kurulmuştur. Bahçeler, farklı güneşlenme ve yağmur suyu toplama alanlarına bağlı olarak farklı derinlik ve büyüklükte kurulmuştur. Toprak (kum, torf, silt ve gübre karışımı) içeren yağmur bahçesinin alt kısmı, geçirgen jeotekstile sarılmış ve bir çakıl tabakası ile kaplanmış PVC delikli drenaj borusu (d = 75 mm) ve su geçirmez jeomembran ile kaplanmış, drenaj borusunun ucuna varil yerleştirilmiştir. Uygun bitki seçimi ve dikimi yapıldıktan sonra yüzey malç ile örtülmüştür. Her yağmur bahçesinde farklı derinlik ve miktarlarda biyotutma ortamları hazırlanmıştır. İklim ve toprak yapısında uygun bitkiler seçilmiş ve yağmur bahçelerine dikilmiştir (*Ek*). Yağmur

bahçelerinin detayları Şekil 4.11’ de ve Çizelge 4.5’ de yağmur bahçesi bileşenleri gösterilmektedir.



Şekil 4.11. Yağmur bahçesi bileşenleri

Çizelge 4.5. Yağmur bahçesi detayları

Konum	Yüzey alanı	Biyotutma ortamları toprak özellikleri (Derinlik ve karışım miktarı)	Bitkiler
Makedonya Yerleşkesi	12 m²	50 cm derinlik %57 kum %18 torf %15 silt %10 gübre	*Rosa sp. (2 adet), Salvia officinalis (2 adet), Chrysanthemum sp. (6 adet), Gaura lindheimeri (2adet), Canna sp. (2 adet), Iris germanica (2 adet), Imperata cylindrica (2 adet), Allium sp. (3 adet), Salvia rosmarinus (3 adet), Lavandula sp. (3 adet), Hydrangea macrophyll (3 adet)*
Balkan Yerleşkesi	18 m²	50 cm derinlik %45 kum %21 torf %21 silt %13 gübre	*Rosa sp.* (3 adet), *Salvia officinalis* (3 adet), *Chrysanthemum sp.* (7 adet), *Gaura lindheimeri* (5 adet), *Canna sp.* (3 adet), *Iris germanica* (3 adet), *Imperata cylindrica* (4 adet), *Allium sp.* (3 adet), *Salvia rosmarinus* (4 adet), *Lavandula sp.* (4 adet), *Hydrangea macrophyll* (4 adet)
Teknopark Bahçesi	12 m²	30 cm derinlik %46 kum %20 torf %21 silt %15 gübre	*Rosa sp. (2 adet), Salvia officinalis (2 adet), Chrysanthemum sp. (6 adet), Gaura lindheimeri (2 adet), Canna sp. (2 adet), Iris germanica(2 adet), Imperata cylindrica(2 adet), Allium sp. (3 adet), Salvia rosmarinus (3 adet), Lavandula sp.(3 adet), Hydrangea macrophyll (3 adet)*

Yağmur bahçelerinin kurulum aşamaları Şekil 4.12’de gösterilmektedir.


(a)

(b)

(c)

(ç)

(d)

(e)

(f)


(g)


(ğ)

Şekil 4.12. (a) Yağmur bahçesinin şeklinin belirlenmesi, (b) Yağmur bahçesinin istenilen derinliğe göre açılması (c) Yağmur bahçesinin su geçirmez jeomembran ile kaplanması (ç) Yağmur bahçesine geçirgen jeotekstil kaplı PVC delikli drenaj borusunun yerleştirilmesi, (d) Yağmur bahçesinin toprakla doldurulması (kum, turba, silt ve gübre karışımı) (e) Yağmur bahçesinin bitkilendirilmesi, (f) Teknopark bahçesi yağmur bahçesi (g) Balkan yerleşkesi yağmur bahçesi, (ğ) Makedonya yerleşkesi yağmur bahçesi

4.6. Yağmur Bahçelerinde Su Analizleri

Bir yıllık bir süreçte, yağmur bahçelerine akan yağmur suyundaki kirleticilerin bitkiler ve topraktaki tutulma miktarlarını belirlemek amacıyla drenaj borularıyla toplanan sızıntı suyunda nitrit, nitrat, sülfat, fosfat, çinko, bakır, kurşun ve kadmiyum miktarlarının belirlenmesi amaçlanmıştır. Yağmur suyu ve süzüntü örneklerinin analizi TÜTAGEM'den hizmet alımı ile yapılmıştır.

Ancak, beklenen mevsimsel ağışların gerçekleşmemesi ve yağış şiddetlerinin çoğu yağışta az olması nedeniyle bahçelere giren ve toplanan yağmursularının analiz çalışmaları tamamlanamamıştır. İlkbahar yağışlarının da beklenen miktarda gerçekleşmemesi nedeniyle yağmur suyu ve süzüntü örneği alınamamıştır. Bahçelerin kurulumu sırasında ve Ocak-Şubat aylarında alınan örneklerin analiz sonuçları Çizelge 4.6' da gösterilmektedir.

Çizelge 4.6. Yağmur Bahçelerinden alınan örneklerin analiz sonuçları

			Ppm			
Tarih		Yer	Cu	Zn	Cd	Pb
13.10.2020	Giriş suyu	Makedonya Yerleşkesi	0,0003	0,0009	0,0000	0,0006
13.10.2020		Teknopark Bahçesi	0,0012	0,0015	0,0001	0,0004
21.01.2021	Süzüntü Suyu	Makedonya Yerleşkesi	0,0016	0,0353	0,0001	0,0012
21.01.2021		Teknopark Bahçesi	0,0074	0,0016	0,0000	0,0006
21.01.2021		Balkan Yerleşkesi	0,0010	0,5876	0,0001	0,0009
19.02.2021		Makedonya Yerleşkesi	-	0,0262	0,0006	0,0035
19.02.2021		Teknopark Bahçesi	-	0,0086	0,0008	0,0057
19.02.2021		Balkan Yerleşkesi	-	0,0097	0,0008	0,0554

Çalışmanın yapılacağı alanlarda, doğal yağmur suyu deney süresince gerekli miktarda ve sabit su kalitesinde bulunmadığından ve kalitesinde önemli değişiklikler olmaksızın depolanamadığından, yapay yağmur suyu oluşturulmuştur. Yapay yağmur suları, Makedonya Yerleşkesi ve Teknopark bahçesinde dağıtım şebekesine bağlı çeşmelerden, Balkan Yerleşkesi' nde kuyuya bağlı çeşmeden temin edilen sular ile hazırlanmıştır. Yağmur bahçelerinin sulanmasında kullanılan çeşme suyu analiz sonuçları Çizelge 4.7' de gösterilmektedir.

Çizelge 4.7. Yağmur bahçelerinin sulanmasında kullanılan çeşme suyu analiz sonuçları **(**ppm**)**

Tarih	Yer	Cu	Zn	Cd	Pb	NO_2^-	NO_3^-	PO_4^{3-}	SO_4^{2-}
03.09.21	Makedonya Yerleşkesi	0,0093	0,0127	0,0002	0,0020	0,32	7,16	0,31	30,8
03.09.21	Teknopark Bahçesi	0,0097	0,0140	0,0001	0,0001	<0,32	5,83	<0,31	29,9
03.09.21	Balkan Yerleşkesi	0,0057	0,0884	0,0000	0.0011	<0,32	11,8	<0,31	32,2

Çeşme suyu analizlerinde elde edilen değerler ihmal edilecek kadar düşük olduğundan çözeltilerin hazırlanması sırasında bu değerler dikkate alınmamıştır.

Çeşme suyunun deklorinasyon olması ve sıcaklığının dengelenmesi amacıyla 24 saat dinlendirilmiştir. Yapay yağmur suyunda kabul edilen kirletici konsantrasyonlarına ulaşmak için çeşitli tuzlar kullanılmıştır. Yapay yağmur suyunda olması hedeflenen kirletici konsantrasyonları Çizelge 4.8' de gösterilmektedir.

Çizelge 4. 8. Yapay yağmur suyunda kirletici konsantrasyonları

İyon	Kabul edilen ve uygulanan madde konsantrasyonu (mg/L)
Cu^{+2}	14.0
Pb^{+2}	20.0
Cd^{+2}	0.7
Zn^{+2}	100
NO_2^-	0.5
NO_3^-	0.6 – 269,4
SO_4^{2-}	2.0
PO_4^{3-}	0.5

Yağmur bahçelerinde süzüntü suyu analiz sonuçları ve giderim verimleri Çizelge 4.9' da, en düşük-en yüksek-ortalama giderim verim değerleri Çizelge 4.10' da sunulmaktadır.

Çizelge 4.6. Yağmur bahçelerinde süzüntü suyu analiz sonuçları **(**ppm**)** ve giderim verimleri **(**%**)**

Tarih	**Yer**	Cu	Zn	Cd	Pb	NO_2^-	NO_3^-	PO_4^{3-}	SO_4^{2-}
Yapay yağmur suyu konsantrasyonları **(**ppm**)**		14,0000	100,0000	0,7000	20,0000	0,5	270	0,5	2,0
04.10.21	Makedonya Yerleşkesi	0,1549	0,0474	0,0003	0,0006	1,26	1641	33,8	215
Giderim verimi		98,89	99,95	99,96	100,00	-152,00	-507, 78	-6660,00	-10650,00
04.10.21	Teknopark Bahçesi	0,1112	0,0353	0,0004	0,0007	0,573	1329	11,5	278
Giderim verimi		99,89	99,96	100,00	100,00	-14,60	-392,22	-2200,00	-13800,00
04.10.21	Balkan Yerleşkesi	0,0875	0,0684	0,0008	0,0010	<0,32	44,7	3,43	77,9
Giderim verimi		99,91	99,93	100,00	100,00	>36,00	83,44	-586,00	-3795,00
05.10.21	Makedonya Yerleşkesi	0,1868	0,0552	0,0004	0,0009	0,525	988	47,3	172
Giderim verimi		99,81	99,94	100,00	100,00	-5,00	-265, 93	-9360,00	-8500,00
05.10.21	Teknopark Bahçesi	0,1075	0,0321	0,0005	0,0010	<0,32	701	23,4	183
Giderim verimi		99,89	99,97	100,00	100,00	>36,00	-159,63	-4580,00	-9050,00
05.10.21	Balkan Yerleşkesi	0,2279	0,3067	0,0035	0,0028	<0,32	134	7,36	154
Giderim verimi		99,77	99,69	100,00	100,00	>36,00	50,37	-1372,00	-7600,00
06.10.21	Makedonya Yerleşkesi	0,2139	0,1647	0,0014	0,0040	0,32	549	52,4	144
Giderim verimi		99,79	99,83	100,00	100,00	36,00	-103,33	-1038,00	-7100,00
06.10.21	Teknopark Bahçesi	0,1099	0,0172	0,0004	0,0008	<0,32	536	18,8	188
Giderim verimi		99,89	99,98	100,00	100,00	>36,00	-98,52	-3660,00	-9300,00
06.10.21	Balkan Yerleşkesi	0,2424	0,2039	0,0027	0,0035	<0,32	110	6,45	143
Giderim verimi		99,76	99,80	100,00	100,00	>36,00	59,26	-1190,00	-7050,00
07.10.21	Makedonya Yerleşkesi	0,1815	0,1043	0,0011	0,0040	0,32	309	51,8	108
Giderim verimi		99,82	99,90	100,00	100,00	36,00	-14,44	-10260,00	-5300,00

07.10.21	Teknopark Yerleşkesi	0,1034	0,0184	0,0003	0,0013	0,521	317	13,7	148
Giderim verimi		99,90	99,98	100,00	100,00	-4,20	-17,41	-2640,00	-7300,00
07.10.21	Balkan Yerleşkesi	0,2791	0,1389	0,0024	0,0026	<0,32	89,6	6,04	137
Giderim verimi		99,72	99,86	100,00	100,00	>36,00	66,82	-1108,00	-6750,00
08.10.21	Makedonya Yerleşkesi	0,1647	0,1540	0,0013	0,0043	0,32	162	46,9	78,1
Giderim verimi		99,83	99,85	100,00	100,00	36,00	40,00	-9280,00	-3805,00
08.10.21	Teknopark Yerleşkesi	0,0797	0,0124	0,0003	0,0011	<0,32	101	21,4	83,9
Giderim verimi		99,92	99,99	100,00	100,00	>36,00	62,59	-4180,00	-4095,00
08.10.21	Balkan Yerleşkesi	0,2501	0,1301	0,0024	0,0029	<0,32	73,0	6,95	135
Giderim verimi		99,75	99,87	100,00	100,00	>36,00	72,96	-1290,00	-6650,00
09.10.21	Makedonya Yerleşkesi	0,1588	0,1090	0,0012	0,0026	0,32	160	48,3	75,9
Giderim verimi		99,84	99,89	100,00	100,00	36,00	40,74	-9560,00	-3695,00
09.10.21	Teknopark Yerleşkesi	0,0777	0,0115	0,0002	0,0009	<0,32	104	23,2	84,7
Giderim verimi		99,92	99,99	100,00	100,00	>36,00	61,48	-4540,00	-4135,00
09.10.21	Balkan Yerleşkesi	0,2496	0,1436	0,0024	0,0022	<0,32	76,2	6,32	140
Giderim verimi		99,75	99,86	100,00	100,00	>36,00	71,78	-1164,00	-6900,00

Çizelge 4.7. Yağmur bahçelerinde en düşük-en yüksek-ortalama giderim verim değerleri **(%)**

Giderim verimi	Cu	Zn	Cd	Pb	NO_2^-	NO_3^-	PO_4^{3-}	SO_4^{2-}
Ortalama	99,78	99,90	100,00	100,00	18,23	-9,78	-4148,22	-6970,83
En düşük	98,89	99,69	99,96	100,00	-152,00	-507,78	-10260,00	-13800,00
En yüksek	99,92	99,99	100,00	100,00	36,00	83,44	-586,00	-3695,00

BÖLÜM 5

TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu çalışmada, biyotutma alanları ve yağmur bahçelerinin saha uygulamalarında, noktasal olmayan kirletici kaynaklardan taşınan nitrit, nitrat, fosfat, sülfat, bakır, kurşun, çinko ve kadmiyum giderim verimlerinin değerlendirilmesi için öncelikle yağmur suyu kirleticileri, biyotutma alanlarının bileşenleri ve biyotutma süreçleri incelenmiştir. Değerlendirme sonucunda; yağmur suyunda bulunan en yaygın kirleticilerin, TSS, TN, TP ve ağır metaller olduğu, yağmur suyu akışında hem N hem de P'nin inorganik veya organik formlarının yanı sıra çözünmüş veya partikül formlarda bulunduğu belirlenmiştir.

Literatür incelendiğinde, biyotutma sistemlerinin yağmur suyu akışındaki kirletici maddeleri değişken oranlarda (NO_x-N %-477 ile 96, NH_4-N %-136 ile 96, TN %-3 ile 99, TP %-240 ile 99, Pb %31-100, Zn %50-99, Cu %20-99) azalttığı görülmektedir. Söz konusu kirleticilerin bazı uygulamalarda neredeyse tamamı giderilirken, negatif giderim oranları da dikkat çekicidir. Çalışmalar, biyotutma sistemlerinin metallerin tutulması için yüksek giderim verimlerine sahip olduklarını göstermektedir.

Trakya Üniversitesi yerleşkelerinde kurulan yağmur bahçelerinde; ağır metal gideriminde Cu için %98,89-99,92, Zn için %99,69-99,99, Cd için %99,96-100,00 ve Pb için %100,00 oranında, yüksek değerler hesaplanmıştır. Verim değerleri NO_2-N için %-152-36 arasında, NO_3-N için %-507,78-83,44 arasında geniş bir aralıkta değişim göstermiştir. PO_4^{3-} ve SO_4^{2-} için ise giderim sözkonusu olmadığı gibi negatif giderim ile yüksek konsantrasyonlara ulaşıldığı görülmüştür.

Sonuçlar, benzer çalışmaların da gösterdiği gibi ağır metal gideriminde yüksek giderim verimi, azot formlarında negatif giderim ile değişken aralıklarda giderim

gözlenmiştir. Fosfor gideriminin benzer çalışmalarda olduğu gibi düşük olması beklenmiş ancak negatif giderim gözlenmiştir. Sülfat giderimi gerçekleşmediği gibi negatif giderim söz konusu olmuştur.

Farklı derinlik, biyotutma ortamı karışım oranı ve yüzey alanı ile uygulanan yağmur bahçelerinin giderim verimleri ve Çizelge 4.5 incelendiğinde;

- Metal giderimlerinin tüm bahçelerde benzer olduğu,
- Yarı güneşli alanda kurulan Makedonya Yerleşkesi yağmur bahçesinde toplanan yağmur suyu miktarı 9,7 m^3/ay iken nitrit ve nitrat gideriminin diğer bahçelere oranla en düşük olduğu,
- Yarı güneşli alanda kurulan Teknopark Bahçesi yağmur bahçesinde toplanan yağmur suyu miktarı 1,6 m^3/ay iken nitrit ve nitrat gideriminin Makedonya Yerleşkesi yağmur bahçesinden yüksek, Balkan Yerlekşesi yağmur bahçesinden düşük olduğu,
- Güneşli alanda kurulan Balkan Yerleşkesi yağmur bahçesinde toplanan yağmur suyu miktarı 7,3 m^3/ay iken nitrit ve nitrat gideriminin diğer bahçelere oranla en yüksek olduğu,

belirlenmiştir. Kum oranının yüksek olması, infiltrasyonu hızlandırmaktadır. Ancak, kirletici giderim verimleri değerlendirildiğinde, organik kolloid miktarını arttıran torf ve ahır gübresi miktarının da giderimde etkili olduğu düşünülmektedir.

Nitrit ve nitrat azotunun giderim verimlerindeki değişkenlik; suyun pH'ına, su redoks özelliklerine, çözünmüş oksijen miktarına, sıcaklık değişimine, hidrolik kalma süresine, ortam reaksiyonuna, yağmur suyundaki azot formları ve oranlarına, biyotutma alanlarında kullanılan karbon kaynaklarının varlığına, denitrifikasyon sürecini etkileyen faktörlere bağlı olarak gerçekleşmektedir. Biyotutma sistemindeki mikrobiyal büyüme ve nitrifikasyon/denitrifikasyon süreçleri üzerinde önemli bir etkiye sahip olan sıcaklık değişimi biyotutma sistemindeki azot giderme verimini etkilemektedir. Kurak dönemlerden sonra gerçekleşen yağışlı dönemlerde, toprakta azot ve fosfor içeren besi maddeleri yeniden ortama salınmaktadır. Kuru ve havalandırılmış topraklarda organik azotun mineralleşme oranını ve inorganik azot içeriği artmaktadır. Biyotutma sistemi kuruma sürecine girdikçe denitrifikasyon verimi düşmekte ve yüksek çözünürlüğe ve hareketliliğe sahip nitrat birikimi gerçekleşmektedir. Çalışmada, yapay yağmur suyu ile

gerçekleştirilen sulama, kısa bir zaman diliminde gerçekleştirilmiş, topraktaki ve havadaki sıcaklık değişimine bağlı etkileri değerlendirilememiştir.

Fosfor giderimini etkileyen faktörler arasında bitkilerin varlığı, filtre ortamı karışım oranları ve toprak iletkenliği yer almaktadır. Fosfor giderimi, bitki kullanılan biyotutma ortamlarında bitkisiz ortamlara göre daha yüksektir ve düşük sıcaklıkta yüksek oranda gerçekleşmektedir. Fosforun uzaklaştırılması, filtreleme, adsorpsiyon ve mikrobiyal aktivite ve asimilasyon süreçleriyle gerçekleşmektedir. Yapay yağmur suyu ile yapılan sulamada, bitki gelişimine bağlı asimilasyon olayının tamamlanması nedeniyle fosfat gideriminin gerçekleşmediği düşünülmektedir.

Yüksek metal giderim veriminin, biyotutma ortamında bulunan inorganik ve organik kolloidlerin metalleri adsoblaması nedeniyle belirlendiği düşünülmektedir.

Yağmur suyunda sülfat kaynaklarının ve yağmur bahçelerinde tutulma mekanizmasının belirlenmesi için detaylı çalışmaların yapılması gerektiği düşünülmektedir.

Bu çalışma kapsamında, süre ve bütçe kısıtı nedeniyle gerçekleştirilemeyen analiz ve izlemenin yeni çalışmalarda yapılması ile değişimin hangi koşullarda oluştuğunun belirlenmesinin özgün çalışmalar oluşturacağı düşünülmektedir.

Yapılan çalışmalar incelendiğinde biyotutma sisteminin performansının; yeterli geçirgenliği olan toprak karışımına, arazi kullanımına, nüfus yoğunluğuna, yağış rejimlerine, kirletici giriş konsantrasyonuna, biyotutma alanlarında kullanılan bitki türlerine, sıcaklığa ve ortam reaksiyonuna bağlı olarak değiştiği görülmektedir.

Sonuç olarak, yeşil altyapı uygulamalarından olan, kentsel alanlarda yüzeysel akışla taşınan kirleticilerin, yapısal çözümler yerine ekolojik olarak giderildiği biyotutma sistemleri ve yağmur bahçelerinin, alıcı su kaynaklarının su kalitesinde bozulmaları azaltacak, kanalizasyon sistemi ve arıtma tesisi su ve kirletici yükünü azaltacak, çevresel faydası yüksek olan uygulamalar olduğu düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

Ahiablame, L. M., Engel, B. A., & Chaubey, I. (2012). Effectiveness of low impact development practices: literature review and suggestions for future research. *Water, Air, & Soil Pollution, 223*(7), 4253-4273.

Bannerman, R. T., Owens, D. W., Dodds, R. B., & Hornewer, N. J. (1993). Sources of pollutants in Wisconsin stormwater. *Water Science and technology, 28*(3-5), 241-259.

Bartley, R., Speirs, W. J., Ellis, T. W., & Waters, D. K. (2012). A review of sediment and nutrient concentration data from Australia for use in catchment water quality models. *Marine pollution bulletin, 65*(4-9), 101-116.

Bayrak, G. (2021) "Theories, Techniques, Strategies" or Spatial Planners & Designers. Murat Özyavuz (Ed.), How to Integrate Green and Grey Infrustructure (s. 235-247). Berlin.

Bayrak, G., Keleş, E., ve Ölmez, Z. (2019), "*Edirne Kent Merkezinde Yeşil Altyapı Uygulanabilirliğinin İncelebmesi*", XI. Mimar Sinan Sempozyumu, Trakya Üniversitesi, 11-12 Nisan 2019, Edirne.

Blecken G.T., Marsalek J., & Viklander M. (2011). Laboratory study on stormwater biofiltration in cold temperatures: metal removal and fates. Water Air Soil Poll 219:303–317.

Brown, R. A., & Hunt III, W. F. (2011). Impacts of media depth on effluent water quality and hydrologic performance of undersized bioretention cells. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 137*(3), 132-143.

Butler, D. & Davies, J. W. (2004). Urban Drainage, 2nd edition, Spon Press Taylor & Francis Group, London and New york, (1-5).

Carpenter, D. D., & Hallam, L. (2010). Influence of planting soil mix characteristics on bioretention cell design and performance. *Journal of Hydrologic Engineering, 15*(6), 404-416.

Characklis, G. W., Dilts, M. J., Simmons III, O. D., Likirdopulos, C. A., Krometis, L. A. H., & Sobsey, M. D. (2005). Microbial partitioning to settleable particles in stormwater. *Water Research, 39*(9), 1773–1782.

Chen, X., Peltier, E., Sturm, B. S., & Young, C. B. (2013). Nitrogen removal and nitrifying and denitrifying bacteria quantification in a stormwater bioretention system. *Water Research, 47*(4), 1691-1700.

Chow, M. F., Yusop, Z., & Shirazi, S. M. (2013). Storm runoff quality and pollutant loading from commercial, residential, and industrial catchments in the tropic. *Environmental monitoring and assessment, 185*(10), 8321-8331.

Coffey, S.W. & Smolen, M.D. (1990). The Nonpoint Source Manager's Guide to Water Quality Monitoring - Draft. Developed under EPA Grant Number T-9010662. U.S. Environmental Protection Agency, Water Management Division, Region 7, Kansas City, MO.

Coffman, L. (2000). Low-impact development design strategies, an integrated design approach. *Prince George's County, Maryland: Department of Environmental Resources, Programs and Planning Division.*

Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, (2018). Yağmur Bahçesi Hazırlama Kılavuzu. 25 Ağustos 2021 tarihinde http://www.cevresehirkutuphanesi.com/assets/files/slider_pdf/dG8NBCmfp8Dh.pdf adresinden erişilmiştir.

Davis, A. P. (2007). Field performance of bioretention: Water quality. *Environmental Engineering Science, 24*(8), 1048–1064.

Davis, A. P., & McCuen, R. H. (2005). *Stormwater management for smart growth.* Springer Science & Business Media.

Davis, A. P., Hunt, W. F., Traver, R. G., & Clar, M. (2009). Bioretention technology: Overview of current practice and future needs. *Journal of environmental engineering, 135*(3), 109-117.

Davis, A. P., Shokouhian, M., Sharma, H., & Minami, C. (2001). Laboratory study of biological retention for urban stormwater management. *Water Environment Research, 73*(1), 5-14.

Davis, A. P., Shokouhian, M., Sharma, H., & Minami, C. (2006). Water quality improvement through bioretention media: Nitrogen and phosphorus removal. *Water Environment Research, 78*(3), 284-293.

Davis, A. P., Shokouhian, M., Sharma, H., Minami, C., & Winogradoff, D. (2003). Water quality improvement through bioretention: Lead, copper and zinc removal. *Water Environment Research, 75*(1), 73–82.

De Rozari, P., Greenway, M. & El Hanandeh, A. (2018). Nitrogen removal from sewage and septage in constructed wetland mesocosms using sand media amended with biochar. *Ecological Engineering, 111,* 1-10.

Demir, D. (2012). Konvansiyonel Yağmur Suyu Yönetim Sistemleri ile Sürdürülebilir Yağmur Suyu Yönetim Sistemlerinin Karşılaştırılması: İTÜ Ayazağa Yerleşkesi Örneği. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı, Çevre Bilimleri ve Mühendisliği Programı, İstanbul, 191 s.

Dietz, M. E. (2007). Low impact development practices: A review of current research and recommendations for future directions. *Water, air, and soil pollution, 186*(1), 351-363.

Dietz, M. E., & Clausen, J. C. (2005). A field evaluation of rain garden flow and pollutant treatment. *Water, Air and Soil Pollution, 167*(1–4), 123–138.

Dietz, M. E., & Clausen, J. C. (2006). Saturation to improve pollutant retention in a rain garden. *Environmental science & technology, 40*(4), 1335-1340.

Doğangönül, C. & Doğangönül, Ö. (2008). Küçük ve Orta Ölçekli Yağmursuyu Kullanımı, Teknik Yayınevi, Ankara.

Dunnett, N., & Clayden, A. (2007). Rain gardens. *Managing water sustainably in the garden and designed landscape.*

Edirne Belediye Başkanlığı, (2017). Edirne'nin Tarihçesi ve Genel Bilgiler. 30 Kasım 2021 tarihinde https://www.edirne.bel.tr/s/genel-bilgi-8.html adresinden erişildi.

Edirne Belediyesi, (2013). *Edirne Merkez Atıksu Arıtma Tesisi Ön Proje Raporu*. Edirne: Edirne Belediye Başkanlığı.

Edirne Belediyesi, (2015). *Edirne Merkez İçme suyu Kesin Projesi*. Edirne: Edirne Belediye Başkanlığı.

Ely, M., & Pitman, S. D. (2014). Green Infrastructure: Life support for human habitats.

EPA. (1983). Results of the Nationwide Urban Runoff Program, volume I – Final Report. U.S. Environmental Protection Agency, Water Planning Division, Washington D.C.

Erdoğan Reyhan, Doç. Dr. Sürdürülebilir yağmur suyu yönetimi ve yağmur bahçeleri, Genel Yazılar, Nisan 2017

Eriksson, E., Baun, A., Scholes, L., Ledin, A., Ahlman, S., Revitt, M., Noutsopoulos, C., & Mikkelsen, P. S. (2007). Selected stormwater priority pollutants: A European perspective. *Science of the total environment, 383*(1-3), 41–51.

EU Commission (2016) Green infrastructure. European Commission – Environment. 20 Kasım 2021 tarihinde https://ec.europa.eu/environment/nature/ecosystems/index_en.html adresinden erişildi.

Fisch, J. (2014). *Green Infrastructure and the Sustainability Concept: A Case Study of the Greater New Orleans Urban Water Plan.* University of New Orleans, University of Florida, United States, s.3.

Fletcher, T.D., Shuster, W., Hunt, W.F., Ashley, R., Butler, D., Arthur, S., ve Viklander, M. (2015). SUDS, LID, BMP'ler, WSUD ve daha fazlası – Kentsel drenajı çevreleyen terminolojinin gelişimi ve uygulaması. *Kentsel su günlüğü, 12* (7), 525-542.

Francey, M., Fletcher, T. D., Deletic, A., & Duncan, H. (2010). New insights into the quality of urban storm water in South Eastern Australia. *Journal of Environmental Engineering, 136*(4), 381-390.

Geronimo, F. K. F., Maniquiz-Redillas, M. C., & Kim, L. H. (2013). Treatment of parking lot runoff by a tree box filter. *Desalination and water treatment, 51*(19-21), 4044-4049.

Glass, C., & Bissouma, S. (2005). Evaluation of a parking lot bioretention cell for removal of stormwater pollutants. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, 81.

Goh, H. W., Lem, K. S., Azizan, N. A., Chang, C. K., Talei, A., Leow, C. S., & Zakaria, N. A. (2019). A review of bioretention components and nutrient removal under different climates—future directions for tropics. *Environmental Science and Pollution Research, 26*(15), 14904-14919.

Golden, H. E., & Hoghooghi, N. (2018). Green infrastructure and its catchment-scale effects: an emerging science. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, *5*(1), e1254.

Göbel, P., Dierkes, C., & Coldewey, W. G. (2007). Storm water runoff concentration matrix for urban areas. *Journal of contaminant hydrology, 91*(1-2), 26-42.

Gülbaz, S., Kazezyılmaz-Alhan, C. M., & Copty, N. K. (2015). Evaluation of heavy metal removal capacity of bioretention systems. *Water, Air, & Soil Pollution, 226*(11), 1-14.

Hacettepe Üniversitesi, ICP-MS nedir?. 25 Kasım 2021 tarihinde http://www.icp.hacettepe.edu.tr/nedir.shtml adresinden erişildi.

Hatt, B. E., Fletcher, T. D., & Deletic, A. (2009). Hydrologic and pollutant removal performance of stormwater biofiltration systems at the field scale. *Journal of Hydrology, 365*(3-4), 310-321.

Hunt, W. F., Jarrett, A. R., Smith, J. T., & Sharkey, L. J. (2006). Evaluating bioretention hydrology and nutrient removal at three field sites in North Carolina. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 132*(6), 600-608.

Hunt, W. F., Smith, J. T., Jadlocki, S. J., Hathaway, J. M., & Eubanks, P. R. (2008). Pollutant removal and peak flow mitigation by a bioretention cell in urban Charlotte, NC. *Journal of Environmental Engineering, 134*(5), 403-408.

Jaber, F., Woodson, D., LaChance & C., York, C. (2012). *Stormwater Management: Rain Gardens, The Department of Soil and Crop Sciences and Texas A&M AgriLife Communications,* The Texas A&M System, USA, s. 20.

Jiang, C. B., Li, J. K., Zhang, B. H., Ruan, T. S., Li, H. E., & Dong, W. (2018). Design parameters and treatment efficiency of a retrofit bioretention system on runoff nitrogen removal. *Environmental Science and Pollution Research, 25*(33), 33298-33308.

Jiang, C., Li, J., Li, H., Li, Y., & Chen, L. (2017). Field performance of bioretention systems for runoff quantity regulation and pollutant removal. *Water, Air, & Soil Pollution, 228*(12), 1-13.

Kambites, C. & Owen, S. (2006). Renewed prospects for green infrastructure planning in the UK. *Planning Practice and Research 21* (94), s. 483–496.

Kaplan, A. (2012-2013). Planlama ve Tasarımda Yeni Anlayışlar ve Pratikler: Yeşil Altyapı Peyzaj Bağlamında Şehircilik, *Peyzaj Mimarlığı Dergisi,* 23-30.

Kati V., & Jari N. (2016). Bottom-up thinking-identifying socio-cultural values of ecosystem services in local blue-green infrastructure planning in Helsinki, Finland. *Land Use Policy 50*:537–547. https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2015.09.031

Kloss, C., Calarusse, C., & Stoner, N. (2006). *Rooftops to rivers: Green strategies for controlling stormwater and combined sewer overflows.* Natural Resources Defense Council.

Kluge, B., Markert, A., Facklam, M., Sommer, H., Kaiser, M., Pallasch, M., & Wessolek, G. (2018). Metal accumulation and hydraulic performance of bioretention systems after long-term operation. *Journal of soils and sediments, 18*(2), 431-441.

LeFevre, G. H., Paus, K. H., Natarajan, P., Gulliver, J. S., Novak, P. J., & Hozalski, R. M. (2015). Review of dissolved pollutants in urban storm water and their removal and fate in bioretention cells. *Journal of Environmental Engineering, 141*(1), 04014050.

Li, L., & Davis, A. P. (2014). Urban stormwater runoff nitrogen composition and fate in bioretention systems. *Environmental science & technology, 48*(6), 3403-3410.

Liu, J., Sample, D. J., Bell, C., & Guan, Y. (2014). Review and research needs of bioretention used for the treatment of urban stormwater. *Water, 6*(4), 1069-1099.

Macnamara, J., & Derry, C. (2017). Pollution removal performance of laboratory simulations of Sydney's street stormwater biofilters. *Water, 9*(11), 907.

Mangangka, I. R., Liu, A., Egodawatta, P., & Goonetilleke, A. (2015). Performance characterisation of a stormwater treatment bioretention basin. *Journal of environmental management, 150*, 173-178.

Manual, B. (2007). Environmental Services Division. Department of Environmental Resources, Prince George's County, Maryland: Largo, MD, USA.

McLeod, S. M., Kells, J. A., & Putz, G. J. (2006). Urban runoff quality characterization and load estimation in Saskatoon, Canada. *Journal of environmental engineering, 132*(11), 1470-1481.

Meteoroloji Genel Müdürlüğü, (1988-2022). 2 Ocak 2022 tarihinde https://www.mgm.gov.tr/site/urunler.aspx?u=tum adresinden erişildi.

Morison, P. J., & Chesterfield, C. (2012). Enhancing the management of urban stormwater in a new paradigm. *In WSUD 2012: Water sensitive urban design; Building the water sensitive community; 7th international conference on water sensitive urban design* (p. 910). Engineers Australia.

Nazahiyah, R. (2005). Modeling of non-point source pollution from residential and commercial catchments in Skudai, Johor. *Unpublished Master of Engineering (Hydrology and Water Resources), Universiti Technologi Malaysia, Skudai, Johor Bahru.*

Oliveri, V. P., Kruse, C. W., Kawata, K., & Smith, J. E. (1977). Microorganisms in urban stormwater. USEPA Report no EPA-600/2-77-087.

Onat, İ. (2013). Yağmur Suyu, Park ve Bahçeler Daire Başkanlığı Yayını.

Oswald, G.E. & Mattison R. (1994). Protocols for Monitoring the Effectiveness of Structural Stormwater Treatment Devices. In Proceedings of the Engineering Foundation Conference on Storm Water Monitoring. August 7-12, Crested Butte, CO.

Önder, S. (1997). Konya Kenti Açık ve Yeşil Alan Sisteminin Saptanması Üzerinde Bir Araştırma. Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Peyzaj Mimarlığı Anabilim Dalı Doktora Tezi. Ankara.

Passeport, E., Hunt, W. F., Line, D. E., Smith, R. A., & Brown, R. A. (2009). Field study of the ability of two grassed bioretention cells to reduce storm-water runoff pollution. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 135*(4), 505-510.

Perini, K., & Sabbion, P. (2017). *Urban sustainability and river restoration: green and blue infrastructure*. John Wiley & Sons.

Peterson, M. A. (2016). *The effect of the antecedent dry conditions on nitrogen removal for a modified bioretention system* (Doctoral dissertation, University of South Florida).

Raspati, G. S., Azrague, K., & Jotte, L. (2017). Review of stormwater management practices. *Klima 2050 Report.*

Roseen, R. M., Ballestero, T. P., Houle, J. J., Avelleneda, P., Wildey, R., & Briggs, J. (2006). Storm water low-impact development, conventional structural, and manufactured treatment strategies for parking lot runoff: Performance evaluations under varied mass loading conditions. *Transportation research record, 1984*(1), 135-147.

Rushton, B.T. (1999). Low Impact Parking Lot Design Reduces Runoff and Pollutant Loads. Annual Report # 1. Aquarium Parking Lot, Tampa, Florida.

Shakouri N., (2016). Kentlerde Yağmursuyu Yönetimi Kapsamında Yeşil Altyapı peyzaj Planlama Ve Tasarım Yaklaşımı: Sakarya-Hendek Örneği. Doktora Tezi, Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Peyzaj Mimarlığı Anabilim Dalı, Ankara, 27 s.

Singh, R. P., Zhao, F., Ji, Q., Saravanan, J. & Fu, D. (2019). Design and performance characterization of roadside bioretention systems. *Sustainability, 11*(7), 2040.

Smith, R. A. & Hunt, W. F. (2007). Pollutant Removal in Bioretention Cells with Grass Cover. World Environmental and Water Resources Congress *2007: Restoring Our Natural Habitat* (pp. 1-11).

Søberg L.C., Blecken G.T., Viklander M., Hedström A. (2014a). Metal uptake in three different plant species used for cold climate biofilter systems. In: Proceedings of the 13th International Conference on Urban Drainage, Kuching, Sarawak, Malaysia.

Stephan, E. A., & Endreny, T. A. (2016). Weighting nitrogen and phosphorus pixel pollutant loads to represent runoff and buffering likelihoods. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, *52*(2), 336-349.

Strecker, E.W. (1994). Constituents and Methods for Assessing BMPs. In *Stormwater NPDES related monitoring needs* (pp. 329-348). ASCE.

Strecker, E.W., M.M. Quigley, B.R. Urbonas, J.E. Jones, & J.K. Clary (2001). Determining Urban Storm Water BMP Effectiveness. *Journal of Water Resources Planning and Management, 127*(3), 144-149.

Tarım ve Köy İşleri Bakanlığı, (2005). Edirne Tarım Master Planı. Ankara.

The City of Lancaster, **(**2011). Green Infrastructure Plan, Lancaster.

Türel, G.D. (1988). Ankara Kenti Yeşil Alanlarının Kullanım Etkinliklerinin Bugünkü Durumu ve Yeterliliği İçin Alınması Gereken Önlemler, Doktora Tezi (Yayımlanmamış), A.Ü. Ziraat Fakültesi Peyzaj Mimarlığı Bölümü, Ankara, 1988.

UNEP (2012). Environment Fund: Resource mobilization. http://www.unep.org/rms/en/ Financing_of_UNEP/Environment_Fund/index.asp (accessed 19 May 2019).

Urbonas, B.R. (1994). Parameters to Report with BMP Monitoring Data. In Proceedings of the Engineering Foundation Conference on Storm Water Monitoring. August 7-12, Crested Butte, CO.

USEPA (2000). Low Impact Development (LID) A Literature Review. United States Office of Water (4203) EPA-841-B-00-005 Environmental Protection Agency Washington, DC 20460.

Van der Tak, L. & Edwards, C. (2001). An ArcView GIS tool to calculate nonpoint sources of pollution in watershed and stormwater projects. USEPA: Washington, DC, USA.

Wan, Z., Li, T., & Liu, Y. (2018). Effective nitrogen removal during different periods of a field-scale bioretention system. *Environmental Science and Pollution Research, 25*(18), 17855-17861.

Wang, J., Chua, L. H., & Shanahan, P. (2017). Evaluation of pollutant removal efficiency of a bioretention basin and implications for stormwater management in tropical cities. *Environmental Science: Water Research & Technology, 3*(1), 78-91.

Yang, Y. Y., & Lusk, M. G. (2018). Nutrients in urban stormwater runoff: Current state of the science and potential mitigation options. *Current Pollution Reports, 4*(2), 112-127.

Yazgı, D., Yolmaz, T. (2016). *Yeşil Altyapı Kavramının İlgili Yasal Düzenlemeler İçerisindeki Yeri Ve Uygulamaya Yönelik Öneriler*. 6. Peyzaj Mimarlığı Kongresi Söylem ve Eylem, Antalya, s. 4.

Yıldızcı, A.C. (1987). Kentsel Yeşil Alanlar, Yüksek Lisans Ders Notları, İstanbul.

Yiğit, Avdan Z., Yıldız, D. & Çabuk, A. (2015) *Yağmur Suyu Yönetimi Açısından Yeşil Altyapı Sistemlerinin Değerlendirilmesi*. Anadolu Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Eskişehir, s. 735.

Zhang, H., Ahmad, Z., Shao, Y., Yang, Z., Jia, Y., & Zhong, H. (2021). Bioretention for removal of nitrogen: processes, operational conditions, and strategies for improvement. *Environmental Science and Pollution Research,* 1-17.

Zhou, Z., Li, H., Song, C., Cao, X. & Zhou, Y. (2017). Prevalence of ammonia-oxidizing bacteria over ammonia-oxidizing archaea in sediments as related to nutrient loading in Chinese aquaculture ponds. *Journal of Soils and Sediments, 17*(7), 1928-1938.

EK



Makedonya yerleşkesi yağmur bahçesinin konumunun belirlenmesi



Makedonya yerleşkesi yağmur bahçesinin şeklinin belirlenip, istenilen derinliğe göre açılması





Makedonya yerleşkesi yağmur bahçesinin su geçirmez jeomembran ile kaplanması






Makedonya yerleşkesi yağmur bahçesinin geçirgen jeotekstil kaplı PVC delikli drenaj borusunun yerleştirilmesi



Makedonya yerleşkesi yağmur bahçesinin toprakla doldurulması



Makedonya yerleşkesi yağmur bahçesi



Teknopark bahçesi yağmur bahçesinin şeklinin belirlenmesi



Teknopark bahçesi yağmur bahçesinin istenilen derinliğe göre açılması




Teknopark bahçesi yağmur bahçesinin su geçirmez jeomembran ile kaplanması




Teknopark bahçesi yağmur bahçesinin geçirgen jeotekstil kaplı PVC delikli drenaj borusunun yerleştirilmesi






Teknopark bahçesi yağmur bahçesinin bitkilendirilmesi



Balkan yerleşkesi yağmur bahçesinin istenilen derinliğe göre açılması



Balkan yerleşkesi yağmur bahçesinin su geçirmez jeomembran ile kaplanması



Balkan yerleşkesi yağmur bahçesinin geçirgen jeotekstil kaplı PVC delikli drenaj borusunun yerleştirilmesi



Balkan yerleşkesi yağmur bahçesi



(a)



(b)



(c)

(a) Makedonya yerleşkesi yağmur bahçesi mevsimlik durumu, (b) Balkan yerleşkesi yağmur bahçesi mevsimlik durumu, (c) Teknopark bahçesi yağmur bahçesi mevsimlik durumu (Haziran, 2021)


(a)


(b)



(c)

(a) Makedonya yerleşkesi yağmur bahçesi mevsimlik durumu, (b) Teknopark yerleşkesi yağmur bahçesi mevsimlik durumu, (c) Balkan yerleşkesi yağmur bahçesi mevsimlik durumu (Şubat, 2021)

ÖZGEÇMİŞ

08.06.1994 Edirne'de doğdu. 2017 yılında Namık Kemal Üniversitesi Çorlu Mühendislik Fakültesi Çevre Mühendisliği Bölümü'nden mezun oldu. 2019'da Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Uygulamalı Bilimler ve Teknoloji Anabilim dalı yüksek lisans eğitimine başlamış olup halen yüksek lisans eğitimine devam etmektedir. Türkiye Eğitim Gönüllüleri Vakfı gönüllü çalışmalarına katılarak çocukların eğlenerek öğrenmesini, TEMA Vakfı Gönüllülüğü ve Let's Do It Türkiye Tekirdağ İl Temsilciliği yaparak da sürdürülebilir yarınlar için katkı sağlamıştır. 2021 yılında Ekomer Mühendislik'de Çevre Mühendisi olarak çalışmaya başlamış olup, hala devam etmektedir.

Yayınlar : Küp, C. & Bayrak, G., 2019, Evaluatıon Of Green Infrastructure Legıslatıon In The Scope Of Raınwater Management, 15th Internatıonal Conference "Standardızatıon, Protypes And Qualıty": A Means of Balkan Countries' Collaboration Proceedings, p.399-407, October 24-25, 2019, Edirne.

Bayrak, G., & Küp, C. 2021, Yeşil Altyapı Uygulamaları Kapsamında Biyotutma Sistemlerinin Yağmur Suyu Kirletici Giderim Verimlerinin Değerlendirilmesi. Kent Akademisi, 14 (3), 853-866.

TEZ ÖĞRENCİSİNE AİT TEZ İLE İLGİLİ BİLİMSEL FAALİYETLER

Küp C., (2021). Establishment Of Rain Gardens In Trakya University Campuses. III. International Agricultural, Biological & Life Science Conference 1-3 September, Poster Presentation, Edirne, Turkey.