



**YEŞİL ALTYAPI SİSTEMLERİ
KAPSAMINDA YAĞMURSUYU YÖNETİMİ
MALATYA KENT MERKEZİ ÖRNEĞİ**

Turgut DİNÇER

Yüksek Lisans Tezi

Peyzaj Mimarlığı Ana Bilim Dalı

2022

(Her Hakkı Saklıdır)

T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
PEYZAJ MİMARLIĞI ANA BİLİM DALI

**YEŞİL ALTYAPI SİSTEMLERİ KAPSAMINDA YAĞMURSUYU YÖNETİMİ
MALATYA KENT MERKEZİ ÖRNEĞİ**

(Stormwater Management within the Scope of Green Infrastructure Systems Malatya City
Center Example)

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Turgut DİNÇER

Danışman: Prof. Dr. Sevgi YILMAZ

Erzurum
Haziran, 2022

T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürlüğü

KABUL VE ONAY TUTANAĞI

Turgut DİNÇER tarafından hazırlanan “Yeşil Altyapı Sistemleri Kapsamında Yağmursuyu Yönetimi Malatya Kent Merkezi Örneği” başlıklı çalışması 30/06/2022 tarihinde yapılan tez savunma sınavı sonucunda başarılı bulunarak jürimiz tarafından Peyzaj Mimarlığı Ana Bilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Başkanı:	Prof. Dr. Mehmet Akif IRMAK <i>ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ</i>	Aslı Islak İmzalıdır.
Danışman:	Prof. Dr. Sevgi YILMAZ <i>ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ</i>	Aslı Islak İmzalıdır.
Jüri Üyesi:	Doç. Dr. Hilal TURGUT <i>KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ</i>	Aslı Islak İmzalıdır.

Enstitü Yönetim Kurulunun
.../.../.... tarih ve sayılı
kararı.

Bu tezin Atatürk Üniversitesi Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği'nin ilgili maddelerinde belirtilen şartları yerine getirdiğini onaylarım.

Prof.Dr. Saltuk Buğrahan CEYHUN

Enstitü Müdürü

Aslı Islak İmzalıdır.

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaklardan yapılan bildiriş, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak olarak kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU

Yüksek Lisans Tezi olarak Prof. Dr. Sevgi YILMAZ danışmanlığında sunulan “Yeşil Altyapı Sistemleri Kapsamında Yağmursuyu Yönetimi Malatya Kent Merkezi Örneği” başlıklı çalışmanın tarafımızdan bilimsel etik ilkelere uyularak yazıldığını, yararlanılan eserlerin kaynakçada gösterildiğini, Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından belirlenmiş olan Turnitin Programı benzerlik oranlarının aşılmadığını ve aşağıdaki oranlarda olduğunu beyan ederiz.

Tez Bölümleri	Tezin Benzerlik Oranı (%)	Maksimum Oran (%)
Giriş	%2	30
Kuramsal Temeller	%1	30
Materyal ve Yöntem	%2	35
Araştırma Bulguları	%1	20
Sonuç ve Öneriler	%0	20
Tezin Geneli	%1	25

Not: Yedi kelimeye kadar benzerlikler ile Başlık, Kaynakça, İçindekiler, Teşekkür, Dizin ve Ekler kısımları tarama dışı bırakılabilir. Yukarıdaki azami benzerlik oranları yanında tek bir kaynaktan olan benzerlik oranlarının %5'den büyük olmaması gerekir.

Beyan edilen bilgilerin doğru olduğunu, aksi halde doğacak hukuki sorumlulukları kabul ve beyan ederiz.

Tez Yazarı (Öğrenci)	Tez Danışmanı
Turgut DİNÇER	Prof. Dr. Sevgi YILMAZ
30/06/2022	30/06/2022
İmza: Aslı Islak İmzalıdır.	İmza: Aslı Islak İmzalıdır.

* Tez ile ilgili YÖKTEZ'de yayınlamasına ilişkin bir engelleme var ise aşağıdaki alanı doldurunuz.

☐ Tezle ilgili patent başvurusu yapılması / patent alma sürecinin devam etmesi sebebiyle Enstitü Yönetim Kurulunun/...../.... tarih ve sayılı kararı ile teze erişim 2 (iki) yıl süreyle engellenmiştir.

☐ Enstitü Yönetim Kurulunun/...../.... tarih ve sayılı kararı ile teze erişim 6 (altı) ay süreyle engellenmiştir.

TEŞEKKÜR

Tez çalışma sürecinde bilgi ve deneyimlerini benimle paylaşarak her aşamada yardımlarını eksik etmeyen sayın danışman hocam Prof. Dr. Sevgi YILMAZ'a, göstermiş olduğu ilgi, alaka ve anlayışından dolayı teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Tez çalışmamda gerekli olan verilerin temin edilmesinde desteklerini esirgemeyen Malatya Büyükşehir Belediyesi İmar ve Şehircilik Daire Başkanlığı Kent Planlama Şube Müdürlüğü'ne, Malatya Su ve Kanalizasyon İdaresi Genel Müdürlüğü'ne, Malatya Meteoroloji Bölge Müdürlüğü'ne ve çalışanlarına teşekkür ederim.

Tez çalışma sürecinde bilgi ve deneyimlerine başvurduğum ve hiçbir zaman yardımlarını eksik etmeyen İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa İnşaat Mühendisliği Hidrolik Anabilim Dalı öğretim üyeleri sayın Prof. Dr. Cevza Melek Kazezyılmaz ALHAN'a ve sayın Doç. Dr. Sezar GÜLBAZ'a, ODTÜ Çevre Mühendisliği Bölümü öğretim üyesi sayın Doç. Dr. Emre ALP'e ve İnönü Üniversitesi öğretim üyesi sayın Prof. Dr. Sevgi GÖRMÜŞ' e teşekkürlerimi iletirim.

Çalışmalarım sırasında yardımlarını eksik etmeyen ve her konuda destek olan değerli arkadaşlarım Mehmet Emin DAŞ'a, Murat ÇAKIR'a, Arş. Gör. Oğuzhan DİKMEN'e, Mahmut KURT'a ve değerli abim Ahmet Duran Tarhan AKÇADAĞ'a teşekkür ederim.

Son olarak, yüksek lisans eğitimim boyunca her an yanımda olan sevgili aileme, desteklerinden ötürü sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Turgut DİNÇER

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

YEŞİL ALTYAPI SİSTEMLERİ KAPSAMINDA YAĞMURSUYU YÖNETİMİ MALATYA KENT MERKEZİ ÖRNEĞİ

Turgut DİNÇER

Danışman: Prof. Dr. Sevgi YILMAZ

Amaç: Aşırı kentleşme sebebiyle şehirlerde meydana gelen ve yoğun yapılaşma sonucu gün geçtikçe daha da artan geçirimsiz alanların oluşturduğu yağmur suyu yüzey akışlarına ve beraberinde getirdiği çevresel sorunlara Yeşil Altyapı (YA) / Düşük Etkili Gelişim (DEG) bileşenleri gibi sürdürülebilir yenilikçi yaklaşımlarla çözüm bulmak ve yetersiz kalan geleneksel kanalizasyon ağı veya diğer bir adıyla gri altyapı sistemleri üzerindeki baskıyı azaltarak alternatif çözümler üretmektir.

Yöntem: Amerika Birleşik Devletleri Çevre Koruma Ajansı (USEPA) tarafından geliştirilen ve yağmur suyundan kaynaklı yüzeysel akışları sisteme girilen bir takım veriler (altyapı, yağış ve alan verileri) ışığında simüle eden, aynı zamanda Yeşil Altyapı/Düşük Etkili Gelişim bileşenleri gibi sürdürülebilir yaklaşımların etkinliğini ölçmeye imkân tanıyan süreç tabanlı bir yağmur suyu yönetim modeli, Stormwater Managemant Model (SWMM) uygulanmıştır.

Bulgular: Dört farklı Düşük Etkili Gelişim (DEG) bileşeninin (yeşil çatı, yağmur varilleri, geçirimli kaplamalar ve yağmur bahçeleri) etkinliğinin ölçüldüğü simülasyon çalışmalarında toplam yüzeysel akışlarda; yeşil çatı sistemlerinin kullanılmasıyla %2,15, yağmur varilleri kullanılmasıyla %8,10 ve eşit oranda geçirimli kaplama sistemleri ve yağmur bahçeleri kullanılmasıyla ise her iki bileşen için %6,60 oranında bir düşüş meydana gelmiştir.

Sonuç: Düşük Etkili Gelişim (DEG) bileşenlerinin geleneksel altyapı sistemleriyle birlikte kullanılmasıyla yağmur suyundan kaynaklı yüzeysel akışlarda %22,20 oranında bir azalma meydana gelerek bu sistemlerin kentsel alanlarda geleneksel altyapı sistemlerine alternatif olarak kullanılabileceği ve aynı zamanda sistemler tarafından tutulan yağmur sularının uygun koşullarda depolanmasıyla içilemez su ihtiyaçları için alternatif su temini sağladığı tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Yağmursuyu Yönetimi, Yeşil Altyapı, Düşük Etkili Gelişim, Yağmur Suyu Yönetim Modeli (YSYM) , Yüzeysel Akışlar

Haziran 2022, 126 sayfa

ABSTRACT

MASTER'S THESIS

STORMWATER MANAGEMENT WITHIN THE SCOPE OF GREEN INFRASTRUCTURE SYSTEMS; MALATYA CITY CENTER EXAMPLE

Turgut DİNÇER

Advisor: Prof. Dr. Sevgi YILMAZ

Purpose: To find solutions to the storm water runoff and environmental problems caused by the impermeable areas that occur in cities due to excessive urbanization and increase day by day as a result of intense construction, with sustainable innovative approaches such as Green Infrastructure / Low Impact Development components, and to find solutions to the inadequate traditional sewer network or otherwise known as the traditional sewer network is to produce alternative solutions by reducing the pressure on gray infrastructure systems.

Method: A process-based stormwater management model (SWMM), developed by the United States Environmental Protection Agency (USEPA), has been implemented, which simulates runoff from rainwater with a set of data (infrastructure, precipitation and area data) entered into the system, and also allows to measure the effectiveness of sustainable approaches such as Green Infrastructure (GI) / Low Impact Development (LID) components.

Findings: In simulation studies where the effectiveness of four different Low Impact Development (LID) components (green roof, rain barrels, permeable pavements and rain gardens) were measured, total runoff was 2.15% with the use of green roof systems and 8.10% with the use of rain barrels and equally permeable coating systems and rain gardens. A decrease of 6.60% occurred for both components.

Results: With the use of Low Impact Development (LID) components together with traditional infrastructure systems, there is a 22.20% reduction in runoff from rainwater, and these systems can be used as an alternative to traditional infrastructure systems in urban areas, and at the same time, alternative water supplies for non-potable water needs are achieved by storing the rainwater held by the systems under appropriate conditions. Supply has been found.

Keywords: Stormwater Management, Green Infrastructure, Low Impact Development, Stormwater Management Model (SWMM), Surface Runoff

June 2022, 126 pages

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY TUTANAĞI.....	i
ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU	ii
TEŞEKKÜR	iii
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
İÇİNDEKİLER.....	vi
TABLolar DİZİNİ.....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	x
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	xii
GİRİŞ.....	1
Amaç ve Kapsam	3
KURAMSAL TEMELLER.....	4
Doğal ve Kentsel Alanlardaki Su Döngüsü.....	10
Yüzeysel akış	10
Geleneksel Altyapı ve Yeşil Altyapı Kavramları	12
Yeşil Altyapı Ölçek ve Ölçütleri	14
Yağmur Suyu Yeşil Altyapı Uygulamalarının Fayda Maliyet Analizi.....	14
Düşük Etkili Geliştirme Yaklaşımı	15
Yağmur Bahçeleri (Bioretention)	17
Yağmur bahçelerinin uygulama alanları	18
Parsel içinde uygulanan yağmur bahçeleri	19
Yol kenarı ve refüjlerde uygulanan yağmur bahçeleri	19
Yağmur bahçelerinde bulunması gereken yüzey katmanları.....	20
Yağmur Bahçelerinin Sağladığı Faydalar	21
Yağmur Bahçeleri Üzerine Yapılan Çalışmalar.....	21
Yeşil Çatılar	22
İntensif Yeşil Çatı	23
Ekstensif Yeşil Çatı	24
Yeşil Çatılar Üzerine Yapılan Çalışmalar.....	25
Yeşil Çatıların Sağladığı Faydalar	28
Geçirgen Kaplamalı Yüzeyler.....	29
Geçirgen betonlar	29
Geçirgen betonların çevreye sağladığı faydalar	30
Geçirgen betonlar üzerine yapılan çalışmalar	30

Geçirgen asfalt yüzeyler.....	32
Geçirgen asfaltlar üzerine yapılan çalışmalar.....	33
Yağmur Hendekleri.....	33
Standart nakil hendekleri.....	34
Kuru yağmur hendekleri.....	34
Islak yağmur hendekleri	35
Yağmur hendekleri üzerine yapılan çalışmalar	37
Yağmur hendeklerinin avantaj ve dezavantajları.....	38
Biyolojik Filtreleme Kanalları (Bioswales)	38
Biyolojik filtreleme kanalları üzerine yapılan çalışmalar.....	39
Biyolojik filtreleme sistemlerinde kullanılan ağaçların su döngüsü üzerindeki rolü.	40
Yağmur Varilleri ve Sarnıçlar	40
Yağmur varilleri	40
Sarnıçlar.....	41
Yağmur varilleri ve sarnıçlar üzerine yapılan çalışmalar	42
Yağmur Suyu Yönetim Modelleri	46
Yağmur Suyu Yönetim Modellerinin Tarihçesi.....	46
Yağmur Suyu Yönetim Modeli (SWMM).....	49
Kentsel Orman Etkileri-Hidroloji Modeli (Ufore-Hydro)	49
Recarga Modeli	50
Kentsel Yağmur Suyu Arıtma ve Analiz Entegrasyonu (Sustain).....	50
Kentsel Havza Modeli (P8).....	51
Entegre Kentsel Su Modellemesi (Mike Urban).....	51
Kaynak Yükleme ve Yönetim Modeli (WinSLAMM)	51
Tüm Yaşam Döngüsü Maliyet Modelleme Aracı (Select Werf)	52
Yeşil Değerler Ulusal Yağmur Suyu Yönetimi Hesaplayıcısı (CNT)	53
Kentsel Yağmur Suyu İyileştirme ve Kavramsallaştırma Modeli (MUSIC)	53
MATERYAL VE YÖNTEM	54
Materyal	54
Malatya'nın Konumu	54
İklim ve Bitki Örtüsü	55
Toprak Yapısı	56
Yüzey Kaplama Türleri	56
Yöntem	58
Çalışmada İzlenen Yöntem Akış Şeması	58
Yağmur Suyu Yönetim Modelinin (SWMM) Tanıtımı	59

Değiştirilmiş Green-Amp Denklemleri.....	65
Dinamik Dalga Teoremi.....	66
ARAŞTIRMA BULGULARI	68
Yağmur Suyu Yüzey Akışlarını Belirlemede Kullanılan Parametreler.....	68
Çalışma Alanına Ait Alan Verileri	68
Zemin Analizi	68
Eğim Analizi	77
Yükselti Analizi.....	77
Bakı Analizi	78
Çalışma Alanına Ait Yağış Verileri	79
Çalışma Alanına Ait Yağmursuyu Altyapı Verileri	83
Düşük Etkili Gelişim Parametreleri.....	83
Farklı Senaryolara Göre Yağmur Suyu Yüzey Akışlarının Hesaplanması	85
Senaryo 1: Mevcut Altyapı Analizi	86
Senaryo 2: Havzalara Yeşil Çatı Entegre Edilmesi	88
Senaryo 3: Havzalara Yağmur Varili Entegre Edilmesi:	89
Senaryo 4: Havzalara Geçirimli Kaplama Entegre Edilmesi:	90
Senaryo 5: Havzalara Yağmur Bahçesi Entegre Edilmesi:	91
Senaryo 6: Tüm Sistemlerin Bir Arada Değerlendirilmesi.....	93
SONUÇ VE ÖNERİLER	96
Sonuçlar.....	96
Tartışma.....	97
KAYNAKÇA	99

TABLÖLER DİZİNİ

Tablo 1. Literatür Özetleri	5
Tablo 2. Alan türlerine göre akış katsayıları	11
Tablo 3. Kullanım alanlarına göre geçirimli beton kaplama ve temel kalınlıkları	30
Tablo 4. Asfalt yüzey tabakasının temel özellikleri	33
Tablo 5. Biyolojik filtreleme kanallarının en uygun tasarım ölçüleri.....	38
Tablo 6. Yeşil Altyapı Bileşenlerini Modelleyebilen 10 Farklı Yağmur Suyu Yönetim Modelleme Aracı.....	47
Tablo 7. 2012-2021 yılları arasındaki Malatya ili nüfus sayısı ve yıllara göre nüfus artış hızı.....	55
Tablo 8. İlde görülen toprak türleri ve kapladığı alanlar	56
Tablo 9. Yüzey kaplamalarına göre akış katsayıları.....	57
Tablo 10. Geçirimli ve geçirimsiz alan miktarları ve yüzdeleri	69
Tablo 11. ArcGIS yazılımında elde edilen alana ait istatistiksel veriler	70
Tablo 12. Yağış sınıfı basamaklarına göre yağışlı günler	79
Tablo 13. Yeşil çatılar için kullanılan parametreler	84
Tablo 14. Geçirimli kaplama için kullanılan parametreler	84
Tablo 15. Yağmur bahçesi için kullanılan parametreler.....	85
Tablo 16. Yağmur varili için kullanılan parametreler	85
Tablo 17. Geliştirilen senaryolara göre bileşenlerin eklenme oranları ve yüzeysel akış yüzdeleri	96

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. 1960-2019 yılları arasındaki Dünya ve Türkiye’deki kentsel nüfus oranları	2
Şekil 2. Doğal ve kentsel alanlardaki su döngüsü.....	10
Şekil 3. Yüzey akışlarının kavramsal görüntüsü.....	11
Şekil 4. Yeşil altyapı sistemlerinde su döngüsü.....	13
Şekil 5. Yeşil altyapı ölçek ve ölçütleri	14
Şekil 6. Kentsel alanlardaki düşük etkili geliştirme/yeşil altyapı bileşenleri.....	16
Şekil 7. Yağmur bahçesinin şematik bir gösterimi	18
Şekil 8. Parsel içerisinde kullanılan yağmur bahçesi örneği.....	19
Şekil 9. Yol kenarı ve refüjlerde uygulanan yağmur bahçesi örnekleri	20
Şekil 10. Yağmur bahçesi kesit görüntüleri	21
Şekil 11. Yeşil bir çatının enine kesiti	23
Şekil 12. İntensif (yoğun) bir yeşil çatı örneği.....	24
Şekil 13. Ekstensif (seyrek) bir yeşil çatı örneği.....	24
Şekil 14. Geleneksel bir çatı ile yeşil bir çatının yüzey akış grafiği	25
Şekil 15. Yeşil Çatı Hidrolojik Süreçleri	26
Şekil 16. Bir yağmur sırasında meydana gelen yüzey akış grafiği	27
Şekil 17. Geçirgen beton kesiti	29
Şekil 18. Geçirgen kaldırım ve yollar	31
Şekil 19. Bir yağış sonrası geçirgen asfalt ile geçirgen olmayan asfaltın görüntüsü	32
Şekil 20. Kuru yağmur hendeği plan ve kesit görüntüleri	35
Şekil 21. Islak yağmur hendeği plan ve kesitleri	36
Şekil 22. Biyolojik filtreleme kanalının şematik bir gösterimi	39
Şekil 23. Yağmur suyu hasat sisteminin şematik gösterimi.....	41
Şekil 24. Tipik bir sarnıç görüntüsü.....	41
Şekil 25. Yağmur suyu toplama sisteminin bileşenleri.....	42
Şekil 26. Genel İtibari ile Yeşil Altyapı Bileşenlerinin Sağladığı Faydalar	45
Şekil 27. Çalışma alanı	54
Şekil 28. Geçirimli ve geçirimsiz yüzey kaplama türleri.....	57
Şekil 29. Yöntem Akış Şeması.....	59
Şekil 30. Yağmur Suyu Yönetim Modeli.....	60
Şekil 31. Yağmur Suyu Yönetim Modelinde (SWMM) oluşturulmuş ve kimlik numaralarının yer almadığı alanın planlı görüntüsü.....	61
Şekil 32. Alanların alt havza düğümlerinin yer aldığı planlı tasarımı	62
Şekil 33. Alanların kavşak düğümlerinin ve çıkış düğümlerinin yer aldığı planlı tasarımı.....	63
Şekil 34. Alanların kanal kimliklerinin yer aldığı planlı tasarımı.....	64
Şekil 35. ArcGIS yazılımında oluşturulmuş alanın zemin analiz görüntüsü	68

Şekil 36. ArcGIS yazılımında oluşturulmuş alana ait eğim analizi görüntüsü.....	77
Şekil 37. ArcGIS yazılımında oluşturulmuş alana ait yükseklik analizi görüntüsü.....	78
Şekil 38. ArcGIS yazılımında oluşturulmuş alana ait bakı analizi görüntüsü.....	78
Şekil 39. 1929-2020 yılları arasında kentte meydana gelen aylık yağış ortalamaları.....	80
Şekil 40. 2019 yılında kentte meydana gelen aylık toplam yağış miktarı.....	80
Şekil 41. 2020 yılında kentte meydana gelen aylık toplam yağış miktarı.....	81
Şekil 42. 2021 yılının ilk sekiz ayında kentte meydana gelen aylık toplam yağış miktarı	82
Şekil 43. T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı Meteoroloji Genel Müdürlüğü'nün 1929/2020 yılları arasındaki verileriyle çalışma dönemine (2019-2020-2021/8ay) ait aylık toplam yağış(mm) verilerinin karşılaştırılması.	82
Şekil 44. Yağmursuyu drenaj hattı genel şablonu.....	83
Şekil 45. Mevcut altyapı verileriyle SWMM programında oluşturulmuşmuş özet sonuçları.....	86
Şekil 46. DEG bileşenleri olmadan meydana gelen yüzeysel akış-yağış grafiği	87
Şekil 47. DEG bileşenleri olmadan meydana gelen olayların aşım sıklığı-günlük tepe akışları grafiği.....	87
Şekil 48. Yeşil çatı bileşenlerinin yer aldığı durum rapor özeti.....	88
Şekil 49. Yeşil Çatı sistemlerinin eklenmesiyle oluşan yüzeysel akış-yağış grafiği	89
Şekil 50. Yağmur varili sistemlerinin yer aldığı durum raporları.....	90
Şekil 51. Yağmur varili sistemlerinin eklenmesiyle oluşan yüzeysel akış-yağış grafiği	90
Şekil 52. Geçirimli kaplama sistemlerinin yer aldığı durum ve özet raporları	91
Şekil 53. Geçirimli kaplama sistemlerinin eklenmesiyle oluşan yüzeysel akış-yağış grafiği.....	91
Şekil 54. Yağmur Bahçesi sistemlerinin yer aldığı simülasyon durum raporları.....	92
Şekil 55. Yağmur bahçesi sistemlerinin eklenmesiyle oluşan yüzeysel akış-yağış grafiği.....	92
Şekil 56. Tüm sistemlerin entegreli bir şekilde yer aldığı simülasyon durum raporları	93
Şekil 57. Tüm bileşenlerin eklenmesiyle meydana gelen yüzeysel akış-yağış grafiği	94
Şekil 58. Tüm sistemlerin kullanılmasıyla tespit edilen özet istatistikleri.....	94

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

C	: Akış Katsayısı
°C	: Santigrat Derece
Cm	: Santimetre
CMS	: Metreküp/Saniye
Cu	: Bakır
Ha	: Hektar Alan
L/S	: Litre/Saniye
M	: Metre
Mm	: Milimetre
Mm/S	: Milimetre/Saniye
M²	: Metrekare
M³	: Metreküp
Pb	: Kurşun
Zn	: Çinko

Kisaltmalar

ABD	: Amerika Birleşik Devletleri
APAO	: Asphalt Pavement Association of Oregon (Oregon Asfalt Kaldırım Derneği)
CBS	: Coğrafi Bilgi Sistemleri
CNT	: Center for Neighborhood Technology (Komşuluk Teknolojisi Merkezi)
CSB	: T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı
CTCN	: Climate Technology Centre and Network (İklim Teknoloji Merkezi Ağı)
DHI	: Denmark Hydrology Institute (Danimarka Hidroloji Enstitüsü)
DSİ	: Devlet Su İşleri
EEA	: European Environment Agency (Avrupa Çevre Ajansı)
KTB	: Kültür ve Turizm Bakanlığı
NWRM	: Natural Water Retention Measures (Doğal Su Tutma Önlemleri)
SCS	: Sentetik Birim Hidrograf Yöntemi
SDKT	: Suyu Duyarlı Kentsel Tasarım
SKDS	: Sürdürülebilir Kentsel Drenaj Sistemleri
SWMM	: StormWater Management Model (Yağmur Suyu Yönetim Modeli)
TDK	: Türk Dil Kurumu
TÜİK	: Türkiye İstatistik Kurumu
USEPA	: United States Environmental Protection Agency (Amerika Birleşik Devletleri Çevre Koruma Ajansı)
YA	: Yeşil Altyapı
YSYM	: Yağmur Suyu Yönetim Modeli
WERF	: WaterResearch Foundation (Su Araştırma Vakfı)

GİRİŞ

Birleşmiş Milletler' in verilerine göre küresel çapta kentleşme oranları her geçen gün atmaktadır. Dünya genelinde kentsel nüfus oranı 2007 yılı itibariyle kırsal nüfus oranını geride bırakarak günümüzde %55 gibi bir seviyeye kadar ulaşmıştır. Bu oran uzun süreli beklentiler dikkate alındığında 2050 yılında %68' e kadar ulaşacağı tahmin edilmektedir (Un 2018).

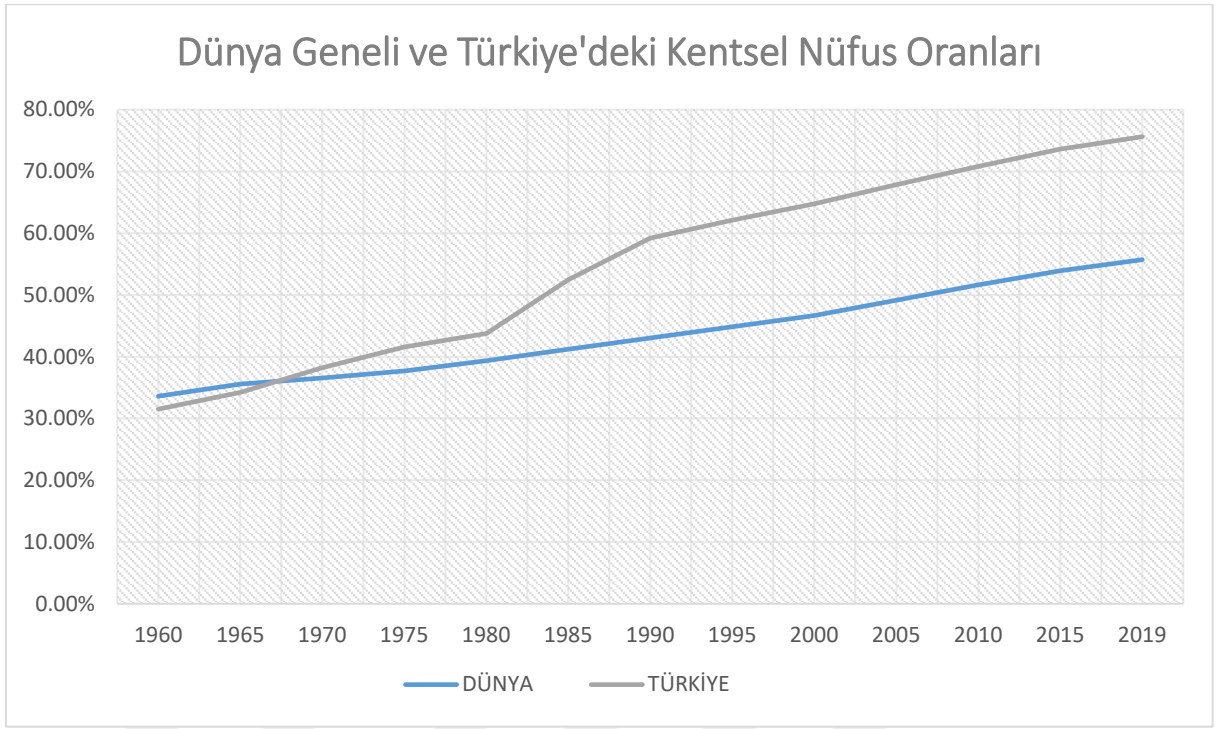
Kentleşme oranlarının artması nüfus yoğunluğuyla birlikte kentsel alanlarda geçirimsiz yüzeylerin artmasına ve buna bağlı olarak da bitki örtüsü gibi geçirgen yüzeylerin azalmasına neden olmaktadır. Geçirimsiz yüzeylerin artması sonucunda yağmur suları toprağın derinliklerine sızamayarak yüzeysel akışlara sebep olmakta ve bunun sonucunda sel ve taşkın gibi çevresel felaketlerin ortaya çıkmasına yol açmaktadır (Yeh and Labadie, 1997; Hsieh and Davis, 2005; Raei et al., 2019).

Bitki örtüsünün azalması sonucunda ise, daha önceden geçirgen olan alanlar birer geçirimsiz yüzeyler haline gelmekte ve buna bağlı olarak kentleşmeyle ilişkili arazi kullanım değişikliklerinde, şehirlerin yüzey akış hidrografının özelliklerinde, doğal su ve evapotranspirasyon döngüsünde geri dönüşü mümkün olmayan değişikliklere yol açmaktadır (Goonetilleke et al., 2005; Abi Aad et al., 2010).

AmericanRivers' da yayınlanan bir raporda; bir zamanlar ormanları, tarlaları ıslatan yağmur şimdilerde çatılar, otoparklar ve yollar gibi sert yüzeylerden akıyor diyerek kentleşmenin meydana getirdiği etkilere vurgu yapılmıştır(AmericanRivers, 2012).

Kentleşme ile ilgili arazi kullanım değişiklikleri, özellikle sanayi devriminin yaşanmasından itibaren kırsal alanlardan şehirlere doğru göçlerin yaygınlaşmasıyla artış göstermektedir(Es ve Ateş, 2004). Kentsel alanlarda nüfus yoğunluğunun artması aynı zamanda altyapı, konut, sanayi ve enerji ihtiyaçlarının artmasına ve buna paralel olarak da yeşil alan miktarlarının büyük ölçüde azalmasına neden olmaktadır.

Dünya bankasının güncel verilerine göre günümüzde dünya nüfusunun yaklaşık %56'sı, Türkiye nüfusunun ise yaklaşık %76'sı gibi yüksek bir oranı kentlerde yaşamaktadır. Birleşmiş Milletler' in küresel çaptaki beklentileri dikkate alındığında şu anda Türkiye'deki kentsel nüfus oranları küresel çaptaki beklentileri aşmış durumdadır. Aşağıdaki şekil(şekil 1.)1960-2019 yılları arasında dünya ve Türkiye'deki kentsel nüfus oranlarını göstermektedir.



Şekil 1. 1960-2019 yılları arasındaki Dünya ve Türkiye’deki kentsel nüfus oranları TheWorldBank (2021)’ in sayısal verilerinden faydalanılarak oluşturulmuştur.

Grafikte de görüldüğü üzere hem dünya genelinde hem de Türkiye’de 1960 yılından itibaren kentsel nüfus oranları sürekli olarak artış göstermiştir. 1960’lı yıllarda Türkiye’de ki kentsel nüfus oranı toplam nüfusun yaklaşık %30’u civarındayken aradan geçen 60 yıllık bir süreçte bu oran %76 gibi yüksek bir değere kadar ulaşmıştır. Özellikle 1980 ve 1990 yılları arasındaki 10 yıllık bir süreçte bu artış daha da fazla yaşanmıştır. Yılmaz M (2015)’e göre 1980 ila 1985 yılları arasında kırsal nüfusla kentsel nüfus arasındaki makas hızla daralarak 1985 yılında ilk kez kentsel nüfus oranı kırsal nüfus oranını geçmiştir. Bundaki en büyük etken olarak bazı beldelerin ilçe merkezi haline getirilmesi ve bazı köylerin ise büyükşehir belediyesi sınırlarına dâhil edilmesi olarak gösterilmiştir.

Kırsal alanlardan kentsel alanlara doğru göçlerin yaygınlaşması, artan nüfus oranlarına paralel olarak kentleşme oranlarının artması ve şehirlerimiz birer beton yüzeyler haline dönüşmesi beraberinde getirdiği altyapı sorunları ilerleyen zamanlarda yağmurdan kaynaklı yüzey akışlarının ve bunun sonucunda da sel ve taşkın gibi çevresel felaketlerin daha fazla yaşanmasına neden olacaktır.

DSİ (2020)’nin verilerine göre; ülkemizde ortalama yıllık yağış miktarı 450 milyar m³ iken bu miktarın 186 milyar m³ ü yaklaşık %41,33’ü yüzeysel akışa neden olmaktadır. Kentleşmenin artmasıyla bu oranın da aynı hızda artması öngörülmektedir.

Küresel çapta kentleşmenin meydana getirdiği bu çevresel problemler, aynı zamanda kentsel ve kırsal alanlarda doğal dengenin bozulmasına ve biyolojik çeşitliliğin zarar görmesine de neden olmaktadır. Günümüzde bu zararları ortadan kaldırmak veya çevreye zarar vermeyecek şekilde mümkün olduğu oranda en az seviyeye düşürmek için yenilikçi yaklaşımlara ağırlık verilmesi gerektiği fikri ağırlık kazanmaktadır. Bu yaklaşım fikirlerinin en başında ise “yeşil altyapı” sistemleri gelmektedir(Aslan ve Yazıcı, 2016)

Kentsel yüzey akışı yönetimi için birçok ülkede yeşil altyapı bileşenleri gibi sürdürülebilir uygulamaları hem yağmur hacimlerini azaltmak hem de su kalitesini iyileştirmek için planlanmaktadır.

Düşük etkili geliştirme (DEG) uygulamaları olarak da bilinen yeşil altyapılar, kentsel alanlarda meydana gelen doğal hidrolojik süreçlerin planlanmasında ve yağmur sularının kaynağında yönetilmesinde yaygın olarak kullanılan, sağlıklı çevreler oluşturmayı amaçlayan teknolojilerdir(Liu et al., 2015)

Amaç ve Kapsam

Bu çalışmanın temel amacı; aşırı kentleşme sebebiyle şehirlerde meydana gelen ve yoğun yapılaşma sonucu gün geçtikçe daha da artan geçirimsiz alanların oluşturduğu yağmur suyu yüzey akışlarına ve beraberinde getirdiği çevresel sorunlara Yeşil Altyapı (YA) / Düşük Etkili Gelişim (DEG) bileşenleri gibi sürdürülebilir yenilikçi yaklaşımlarla çözüm bulmak ve yetersiz kalan geleneksel kanalizasyon ağı veya diğer bir adıyla gri altyapı sistemleri üzerindeki baskıyı azaltarak alternatif çözümler üretmektir.

Bu bağlamda çalışma alanı olan ve her geçen gün gelişmekte olan Malatya kent merkezinin geçirimsiz alan yüzdesi (Bina çatı yüzeyleri, araç yolları, kaldırımlar, otoparklar, meydanlar ve diğer sert zeminler) ve geçirimli yüzeyleri (Yeşil alanlar ve toprakla kaplı bitkisel olmayan alanlar) ArcGis programı yardımıyla belirlenmiş ve elde edilen veriler Amerika Birleşik Devletleri Çevre Koruma Ajansı (USEPA) tarafından geliştirilen Yağmur suyu yönetim modeli (SWMM) programına yüklenerek yıllık yağış oranının hangi miktarda yüzeysel akışa neden olduğu tespit edilmiştir. Daha sonra programa entegre edilmiş olan yeşil altyapı bileşenleri belirlenen oranda geçirimsiz alanların belli bir kısmına uygulanması sonucunda yüzeysel akışların ne kadar azaltıldığı yapılan simülasyon çalışmalarıyla tespit edilmiştir.

Çalışma alanı olarak Malatya ili, bölgenin iyi bir şekilde tanınması ve çeşitli kurumlardan bir takım verilerin elde edilme kolaylığından dolayı pilot bölge olarak seçilmiştir.

Tez konusu belirlenirken ise yağmur suyunun meydana getirdiği sorunların giderilmesine olan ihtiyaçlar göz önünde bulundurulmuş ve dünya genelinde yağmursuyu yönetimi konusunda sürdürülebilir alternatif yaklaşımlara olan eğilimin yaygın olmasına karşın ülkemizde bu konuda henüz yaygın olarak yer verilmediği görülmüştür. Bu sebeple ki ulusal basında, su baskınlarından muzdarip olan şehirlerimize ve meydana gelen çevresel problemlerden kaynaklı ülke ekonomisine büyük bir yük oluşturduğuna dair sürekli olarak haberlere rastlanılmaktadır. İlerleyen zamanlarda iklim değişikliğinin meydana getirdiği etkiler ve artan nüfus oranlarına paralel olarak yapılaşma oranlarının artmasının daha fazla olacağı göz önünde bulundurulduğunda geleneksel altyapı sistemlerine karşı sürdürülebilir alternatif yaklaşımlara ihtiyacın da aynı oranda artacağı düşünülmektedir.

Yağmur suyu yönetiminde alternatif sistemlerin yaygınlaşması ve getireceği yeniliklerle hem geleneksel altyapı sistemleri üzerindeki baskı daha da azalacak hem de yoğun yağış olayları sırasında bu sistemler tarafından tutulan yağmur suları içilemez su ihtiyaçlarında kullanılarak alternatif su temini sağlanmasına yardımcı olacaktır. Ayrıca şehirlerimizde yoğun yapılaşmadan dolayı her geçen gün azalan yeşil alan miktarları bu sistemler sayesinde yeniden tesis edilebilecek ve görsel açıdan estetik alanların oluşması sağlanabilecektir.

KURAMSAL TEMELLER

Yapılan literatür taramasında elde edilen bulgular konuların dağılmaması ve ilgili konunun daha iyi irdelenmesi amacıyla Düşük Etkili Geliştirme Yaklaşımı bölümünün alt başlıkları altında yapılan çalışmalar kısmında verilmiştir ancak istatistiksel değerlerin yer aldığı literatür çalışmaları özet şeklinde aşağıdaki tabloda (**Tabla 1.**) verilmiştir.



Tablo 1. Literatür Özetleri

ÇALIŞMA KONUSU	ŞEHİR	METHOD	ARAŞTIRMA BULGULARI	REFERANS
Yağmur suyu yönetiminde alternatif yaklaşımların maliyeti	ABD geneli	Analiz	Yeşil altyapı uygulamaları gri altyapı maliyetlerini yılda 120 milyon dolar azalttığı atık su ve pompalama maliyetlerini ise 661 milyon dolar azalttığı tespit edilmiştir.	(Mittman and Kloss, 2015)
Yağmur suyu yönetiminde alternatif yaklaşımların maliyeti	Michigan	Analiz	Yeşil çatılar hariç diğer yeşil altyapı bileşenlerinin gri altyapıya göre daha az maliyetli olduğu ancak yeşil çatıların bir yaşam döngüsü içerisinde gri altyapıya göre daha uygun maliyetli olabileceği tespit edilmiştir.	(Nordman et al., 2018)
Yeşil çatıların fayda ve maliyeti	Michigan	Analiz	Yeşil çatıların ortalama maliyetinin geleneksel çatılara kıyasla %39 daha fazla olduğu ancak yeşil çatıların ömür boyu sağladığı faydalar göz önünde bulundurulduğunda sağladığı faydaların maliyetten daha ağır bastığı belirlenmiştir.	(Clark et al., 2008)
Yeşil çatıların fayda ve maliyeti	Atlanta	Analiz	Yeşil çatıların geleneksel çatılara göre %10-14 daha masraflı olduğu ancak sağladığı sosyal faydalar ve enerji tasarrufundan dolayı bir yaşam döngüsü (40 yıl) içerisinde daha az masraflı olabileceği tespit edilmiştir.	(Carter and Keeler, 2008)
Düşük Etkili Gelişim bileşenlerinin kentsel sel üzerindeki etkileri	Shenzhen	Simülasyon (SWMM)	Düşük Etkili Gelişim tekniklerinin geleneksel sistemlere göre daha sürdürülebilir bir çözüm olduğu ve kentsel sel olaylarını azaltmada daha etkili olduğu tespit edilmiştir.	(Qin et al., 2013)
Yeşil altyapı sistemlerinin hidrolojik potansiyeli	Pekin	Simülasyon (SWMM)	Yeşil altyapı bileşenlerinden depolama havuzlarının yüzey akışlarını %100 oranında, geçirimli kaplamalar ve yeşil alan kombinasyonun ise %95 oranında önlediği tespit edilmiştir.	(Liu et al., 2015)
Düşük Etkili Geliştirme sistemlerinin hidrolojik performansı	Connecticut	Analiz	Düşük Etkili Gelişim uygulamalarının yağmur suyu akışlarını %42 oranında azalttığı tespit edilmiştir.	(Bedan and Clausen, 2009)
Yaşam döngüsü değerlendirmesi	Odense	Simülasyon	Yeşil altyapı sistemlerinin ekosistemler üzerindeki hasarı azaltabileceği tespit edilmiştir.	(Brudler et al., 2019)

Yağmur bahçelerinin hidrolojik performansı	Virginia	Analiz	Bir otopark alanına kurulan yağmur bahçesinin tepe akış oranlarını %99 oranında azalttığı tespit edilmiştir.	(Debusk and Wynn, 2011)
Yağmur bahçelerinin hidrolojik performansı	Melbourne	Analiz	Yağmur bahçelerinin akış hacimlerini %33 oranında azalttığı tespit edilmiştir.	(Hatt et al., 2009)
Yağmur bahçelerinin kanalizasyon taşmalarını önleme kapasitesi	Quebec	Simülasyon (SWMM)	Toplam geçirimsiz alanların %21'i yağmur bahçesi olarak tasarlandığında %12,7-19,4 oranında yüzey akışlarını azalttığı tespit edilmiştir.	(Autixier et al., 2014)
Yağmur bahçelerinin yağmur suyu hacimlerini azaltmadaki etkinliği	Cincinnati	Simülasyon (SWMM)	Bir alanın %3,9'u yağmur bahçesi olarak tasarlandığında %38 hacim azalması sağladığı tespit edilmiştir.	(Abi Aad et al., 2010)
Yağmur bahçelerinin hidrolojik performansları	Ohio	Analiz	Yağmur bahçelerinin geçirgenliği düşük topraklarda dahi yağmur suyu yüzey akışlarını %42, %56, %59 oranında azalttığı tespit edilmiştir.	(Winston et al., 2016)
Yağmur bahçelerinden su hasadı	Edirne	Literatür	Bir siteye yerleştirilen yağmur bahçelerinin yılda normal bir siteye göre 400 ton su tasarrufu sağladığı tespit edilmiştir.	(Ertin vd., 2012)
Yeşil çatıların hidrolojik performansı	Sheffield	Analiz	Kapsamlı bir yeşil çatının yıllık su tutma kapasitesi %50,20 olarak tespit edilmiştir.	(Stovin et al., 2012)
Yeşil çatıların hidrolojik performansı	Auckland	Analiz	Geniş bir yeşil çatının yıllık su tutma kapasitesi %66 olarak tespit edilmiştir.	(Voyde et al., 2010)
Yeşil çatıların hidrolojik performansı	Maharashtra	Simülasyon (SWMM)	Yeşil çatıların tepe akışlarını %10,80 oranında azalttığı tespit edilmiştir.	(Paithankar and Taji, 2020)
Yeşil çatıların hidrolojik ve termal performansı	Teksa	Analiz	10mm den düşük yağışların tamamı yeşil çatı sistemlerinde tutulduğu tespit edilmiştir.	(Simmons et al., 2008)
Yeşil çatıların akış miktarı ve kalitesi	Kuzey Karolina	Analiz	13mm den düşük yağışların tamamı yeşil çatı sistemlerinde tutulduğu tespit edilmiştir.	(Moran et al., 2003)

	Farklı eğimlere sahip yeşil çatıların yağmur suyu tutma performansı	Detroit	Deney	Yeşil çatılarda eğim miktarı azaldıkça su tutma kapasitesinin arttığı tespit edilmiştir.	(VanWoert et al., 2005)
	Yeşil çatılarda eğimin su tutma üzerindeki etkisi	Detroit	Deney	%25 eğimli bir yeşil çatıya kıyasla %2 eğime sahip yeşil çatının su tutma kapasitesinin %9,20 daha fazla olduğu tespit edilmiştir.	(Getter et al., 2007)
	Yeşil çatılarda kullanılan bitkilerin evapotranspirasyon oranları	Auckland	Deney	Yeşil çatılarda kullanılan bitkilerin terleme yoluyla toplam evapotranspirasyona %20-48 oranında katkıda bulunduğunu tespit etmiştir.	(Voyde et al., 2010)
	Yeşil çatı sistemlerinin su ve enerji dengesi açısından değerlendirilmesi	Sarıyer	Analiz	Yoğun bir yağış sırasında yeşil çatıların yüzeysel akışları %25 oranında düşürdüğü tespit edilmiştir.	(Ekşi ve Uzun, 2016)
✓	Yeşil çatıların binaların termal performansına etkisi	Yunanistan geneli	Deney	Yeşil çatıların sağladığı izolasyonla yıllık enerji maliyetlerini %10-50 arasında azaltabileceği tespit edilmiştir.	(Eumorfopoulou and Aravantinos, 1998)
	Düşük Etkili Kentleşme uygulamalarının yüzeysel akışa etkisi	Avcılar	Simülasyon (SWMM)	Bir kampüsteki karayollarının tamamı geçirimli kaldırım ile kaplandığında %100 oranında yüzeysel akışları azalttığı tespit edilmiştir.	(Gülbaz vd., 2018)
	Gözenekli kaplamaların killi topraklardaki etkinliği	Atina	Analiz	Gözenekli kaplamaların normal asfalt alanlara göre %93 oranında daha az yüzey akışı meydana getirdiği tespit edilmiştir.	(Dreelin et al., 2006)
	Gözenekli asfalt kaplamaların hidrolojik performansı	New Hampshire	Analiz	Geçirgen asfaltların tepe akışlarını 18 aylık bir periyotta %90 oranında azalttığı tespit edilmiştir.	(Roseen et al., 2012)
	Gözenekli asfalt kaplamaların yüzey akışlarına etkisi	Reze	Deney	Geçirgen asfaltların %97 oranında hacim azalması sağladığı belirlenmiştir.	(Legret and Colandini, 1999)

Yağmur suyu hasadı	Florianopolis	Deney	Bir otopark alanına kurulan gözenekli asfalt kaplamanın yıllık %53-54 oranında içilemez su ihtiyaçlarını azalttığı tespit edilmiştir.	(Hammes et al., 2018)
Yağmur hendeklerinin yüzey akış kalitesinin belirlenmesi	Barentin	Deney	Yağmur hendeklerinin yüzeysel akış sonucu meydana gelen ağır metalleri %17-45 oranında filtrelediği tespit edilmiştir.	(Leroy et al., 2016)
Yağmur hendeklerinin kirletici maddeleri giderme performansı	SunshineCoast	Simülasyon	Yağmur hendeklerinin toplam askıda kalan kirletici maddeleri %50-80 oranında azalttığı ve 30m uzunluğundaki hendeklerin %52 oranında akış hacmini azalttığı tespit edilmiştir.	(Lucke et al., 2014)
Yağmur hendeklerinin hidrolojik performansı	Maryland	Deney	Bir otoyolun kenarına inşa edilen yağmur hendeklerinin yıllık ortalama %59 hacim azalması sağladığı tespit edilmiştir.	(Davis et al., 2012)
Yağmur hendeklerinin hidrolojik performansı	Florida	Deney	Bir otopark alanına inşa edilen yağmur hendeklerinin %30 hacim azalması meydana getirdiği tespit edilmiştir.	(Rushton, 2001)
Yağmur hendeklerinde su ve tortu taşınmasının modellenmesi	Aberdeen	Simülasyon	Kentsel havzalarda kullanılan yağmur hendeklerinin %45,70 oranında hacim azalması meydana getirdiği tespit edilmiştir.	(Deletic, 2001)
Düşük Etkili Gelişim uygulamalarının hidrolojik performansı	Teksas	Araştırma	Yağmur hendeklerinin yarı kurak iklim bölgelerinde %50 hacim azaltması meydana getirdiği tespit edilmiştir.	(Barret, 2008)
Düşük Etkili Gelişim uygulamalarının etkinliği	Los Angeles	Simülasyon	Kentsel bir havzada yer alan kuru yağmur hendeklerinin %52,50 oranında hacim azalması sağladığı belirlenmiştir.	(AckermanandStein, 2008)
Yağmur hendeklerinin hidrolojik performansı	Gardabaer	Deney	Soğuk deniz iklimlerinde donma ve çözünmeden dolayı topraktaki su seviyesinin yükselmesiyle yağmur hendeklerinin sızma kapasitesinin azaldığı tespit edilmiştir.	(ZaqoutandAndradottir, 2021)
Biyolojik filtreleme kanallarının yüzey akışlarını giderme performansı	Kalifornia	Deney	Bir otopark alanına yerleştirilen biyolojik filtreleme kanalının 20 aylık bir süre ve 11,28mm yağış altında yüzey akışlarını %88,8 oranında azalttığı tespit edilmiştir.	(XiaoandMcPherson, 2011)

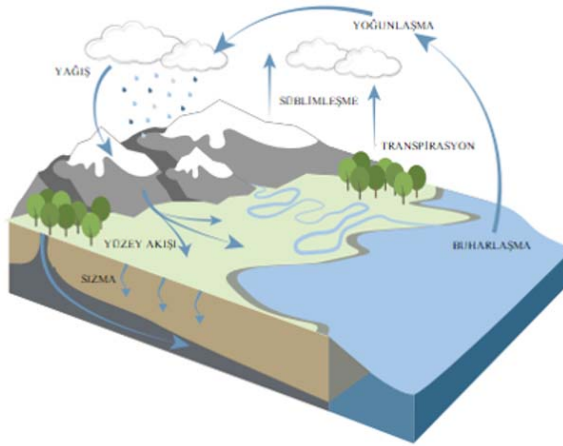
Biyolojik filtreleme kanallarının yüzey akışlarını önleme potansiyeli	Xianyang	Deney	Bir otoyolun iki tarafına kurulan biyolojik filtreleme kanallarının sırasıyla %98,25 ve %77,65 oranında akış hacmini azalttığı tespit edilmiştir.	(Jiang et al., 2017)
Biyolojik filtreleme kanallarında kullanılan ağaçların su bütçesine etkisi	Chicago	Deney	Bir otopark alanına yerleştirilen biyolojik filtreleme kanallarında kullanılan ağaçların %46-%72 oranında suyu terleme yoluyla atmosfere tekrar gönderdiği ve bu sayede hacim azalması sağladığı tespit edilmiştir.	(Scharenbroch et al., 2016)
Düşük etkili gelişim bileşenlerinin etkinliği	Indianapolis	Simülasyon	Yüksek yoğunluklu konut ve ticari alanlarının çatılarının %25'i uygun boyutlarda yağmur varili ve sarnıç gibi sistemler entegre edildiğinde toplam yüzeysel akışlarda %6 bir azalma meydana geldiği tespit edilmiştir.	(Ahiablame et al., 2013)
Yağmur suyu toplama sistemlerinin hidrolojik potansiyeli	Avustralya Genel	Araştırma	Yedi farklı sahada kullanılan büyük hacimli yağmur suyu toplama sistemlerinin yıllık yüzey akışları ortalama %20-100 arasında engellediği tespit edilmiştir.	(Hatt et al., 2006)
Yağmur varili ve sarnıç sistemlerinin sel ve taşkınları önleme kapasitesi	San Luis	Simülasyon (SWMM)	Kentsel alanlarda yağmur varili ve sarnıç gibi sistemlerin kullanılması sonucunda yağmur varilleri yağmur suyu hacimlerini ortalama %3-14,3 azaltmasına rağmen sarnıçlara oranla 9 kat daha düşük olduğu tespit edilmiştir.	(Valencia and Zambrano Nájera, 2019)
Yağmur suyu hasadı	İstanbul	Araştırma	Bir fabrika çatısının %40'ndan toplanan yağmur sularının yağmur varillerinde depolanmasıyla günlük tuvalet temizliği ihtiyaçlarının karşılandığı tespit edilmiştir.	(Kantaroğlu, 2009)
Yağmur suyu hasadı	Sakarya	Araştırma	Kampüs alanındaki binaların çatılarından toplanan suların yeşil alanların günlük olarak sulanmasında kullanılmasıyla %10,90 oranında su tasarrufu sağlandığı belirtilmiştir.	(Eren vd., 2016)
Yağmur suyu hasadı	Bursa	Araştırma	Bir konut alanından toplanacak olan suyun yeşil alanların günlük olarak sulanmasında kullanılmasıyla %14 su tasarrufu sağlandığı tespit edilmiştir.	(Kılıç ve Abuş, 2018)

Doğal ve Kentsel Alanlardaki Su Döngüsü

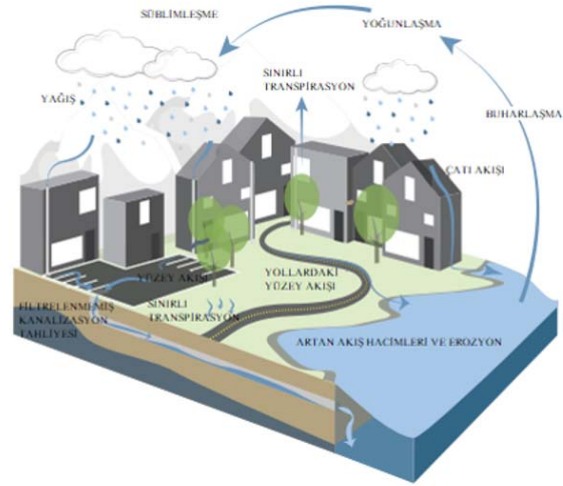
Atmosferde yoğunlaşan su yeryüzüne yağış olarak düştükten sonra yeryüzünde bir takım doğal döngüsünü tamamlayıp terleme ve buharlaşma yoluyla tekrardan atmosfere dönmesine su döngüsü denmektedir(SUTEMA, 2015). Su döngüsünün sağlıklı bir şekilde devam etmesi için kaynakların sürdürülebilir bir şekilde kullanılması gerekmektedir. Kentleşme sebebiyle geçirimsiz yüzeylerin artması buna bağlı olarak sızma ve evapotranspirasyon oranlarındaki artışlar doğal su döngüsünü olumsuz yönde etkilemektedir.

Kentleşmenin olmadığı gelişmemiş alanlarda doğal su döngüsü %10 oranında yüzeysel akış, %50 oranında suyun toprağa sızması ve %40 oranında evapotranspirasyon (durgun sulardan ve bitki örtüsünden suyun buharlaşması) şeklindeyken bu alanların geliştirilmesi veya geçirimsiz alanlara dönüştürülmesi, yüzey akışlarında artmaya, sızma ve evapotranspirasyon oranlarında ise azalmaya yol açarak akarsu yataklarının aşınmasıyla ani sel baskınları ve erozyonları beraberinde getirmektedir(Rutgers, 2014). Aşağıdaki şekilde (şekil 2.) doğal ve kentsel alanlardaki su döngüsü şematik olarak gösterilmektedir.

Doğal alanlardaki su döngüsü



Kentsel alanlardaki su döngüsü

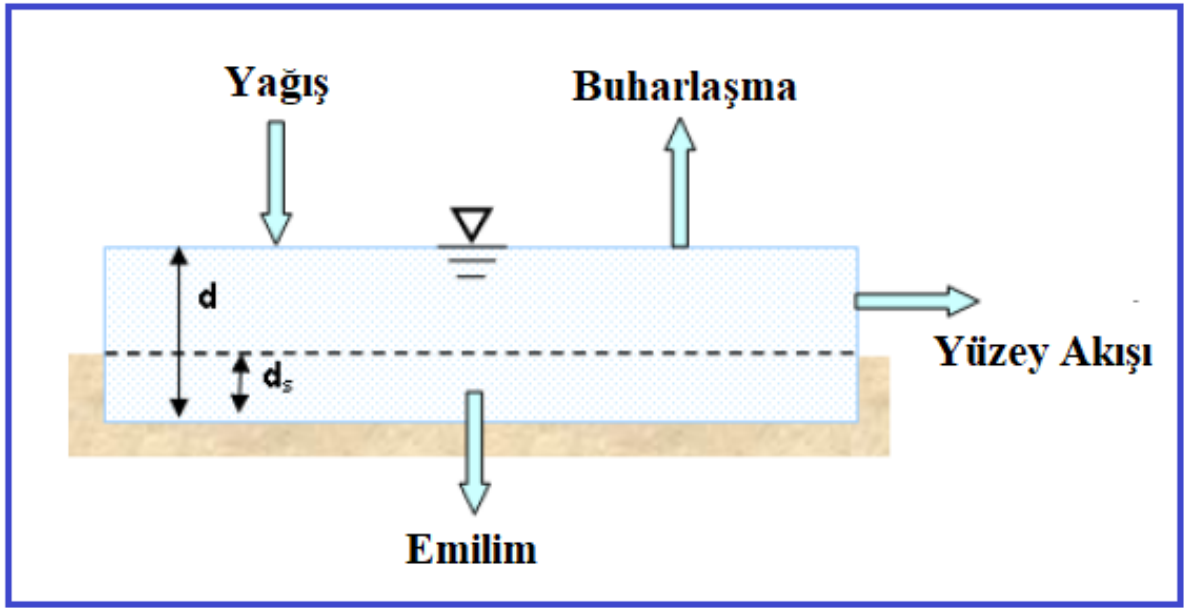


Şekil 2. Doğal ve kentsel alanlardaki su döngüsü. Rutgers (2014)’den uyarlanmıştır.

Kentsel su döngüsü yönetiminin sağlıklı bir şekilde yürütülmesi yaşadığımız çevre için çok önemlidir. Rodríguez et al., (2018), kentsel su döngüsü yönetimindeki iyileştirmelerin, küresel ısınmaya sebep olan sera gazı emisyonlarını azaltabileceğini ve iklim değişikliğinin etkilerinin ortadan kaldırılmasına katkıda bulunabileceğini belirtmiştir.

Yüzeysel akış

Su döngüsü üzerindeki en önemli bileşenlerden biri yüzeysel akışlardır. Yüzeysel akış; farklı formlarda yeryüzüne düşen yağışın, bir kısmının yapı veya bitki yüzeylerinden buharlaşması, bir kısmının ise toprak veya geçirimsiz yüzeylerden emilmesi sonucu geriye kalan miktarının suya doymun alanlardan veya geçirimsiz yüzeylerden emilemeyip eğimin doğrultusunda akışa geçmesi olarak tanımlanır(Çelebi, 1973). Aşağıdaki şekil (şekil 3.) geçirimsiz yüzeylerde meydana gelen yüzeysel akışın kavramsal olarak bir görüntüsünü ifade etmektedir.



Şekil 3. Yüzey akışlarının kavramsal görüntüsü L. A. Rossman (2010)' dan değiştirilmiştir.

Yağışın geçirimsiz yüzeylerden akışa geçen miktarı akış katsayısı denilen bir değerle hesaplanmaktadır. Her yapı yüzeyinin farklı bir yüzeyel akış katsayısı olmakla birlikte bu oran bir drenaj alanı için sabit bir değer olarak kabul edilmektedir. Her ne kadar bu oran sabit bir değer olarak kabul edilmekteyse bile hem iklimsel ve mevsimsel değişikliklere hem de yağışla yüzeyel akış arasındaki kayıplara göre birtakım farklılıklar gösterebilmektedir. Bu sebeple yüzeyel akış katsayısı belirlenirken, alanın hidrojeolojik, jeoformolojik ve jeolojik gibi bir takım hidrolojik değerlere dikkat edilmesi gerekmektedir(Ardiclioglu, 2018).

Akış katsayısının belirlenmesinde kullanılan bazı metotlar akış katsayısını yağış süresince sabit kaldığını varsayarken bazı metotlar ise toprağın nem seviyesine göre yağış boyunca arttığını varsaymaktadır. Bunlardan Rasyonel metot akış katsayısını yağış boyunca sabit kaldığını varsayarken, sentetik birim hidrograf (SCS) yöntemi olarak adlandırılan yöntem de ise, akış katsayısı toprağın nem seviyesine göre belirlenip yağış devam ettiği sürece sürekli artarak toprağın doygunluk seviyesine ulaşmasıyla yağışın tamamı yüzeyel akış olarak hesaplanmaktadır. Bu iki metottan Rasyonel metot kentsel havzalar için, SCS yöntemi ise kırsal havzalar için uygun yöntemdir(Ardiclioglu, 2018).

Akış katsayısı C değeri olarak adlandırılmaktadır. C=1 değerinde olması yağışın tamamının yüzey akışına geçtiği, C=0 değerinde olması ise yağışın tamamının geçirimli yüzeyler tarafından infiltre edildiği yani emildiği anlamına gelmektedir(Thompson, 2006). Aşağıdaki tabloda (**Tablo 2.**) alan türlerine göre akış katsayıları gösterilmektedir.

Tablo 2. Alan türlerine göre akış katsayıları Goel (2011)' den uyarlanmıştır.

Alan Türü	Akış Katsayısı
Kentsel Alanlar	0,30-0,50
Ormanlar	0,05-0,20
Ticari ve Endüstriyel Alanlar	0,70-0,90
Parklar ve Meralar	0,05-0,30
Kaldırım ve Yollar	0,70-0,95

Tabloda, alan türlerine göre belirlenen akış katsayıları dikkate alındığında, kentleşme ve beraberinde getirdiği yapılaşmayla birlikte akış katsayılarının ve buna bağlı olarak da yüzey akışlarının arttığı anlaşılmaktadır.

Geleneksel Altyapı ve Yeşil Altyapı Kavramları

TDK (2019)'un güncel Türkçe sözlüğüne göre altyapı; “Bir yerleşim yeri veya bir yapı için gerekli olan yol, kanalizasyon, su, elektrik vb. tesisatın tümü” olarak tanımlanırken, kent bilim terimleri sözlüğü TDK (1980)'a göre ise; “bir kentin işlevlerini görebilmesi, büyümesi ve gelişmesi için gerekli olan temel işgörü ve kolaylıklarla gereçler” başka bir tanımla ise “bir yerbölümde yapı yapılabilmesi ve yapılan yapının, içinde oturanlara yeterli bir barınma işgörüsü sağlayabilmesi için bulundurulması gereken su, elektrik, pis su ağı vb. kent kolaylıkları” olarak tanımlanır.

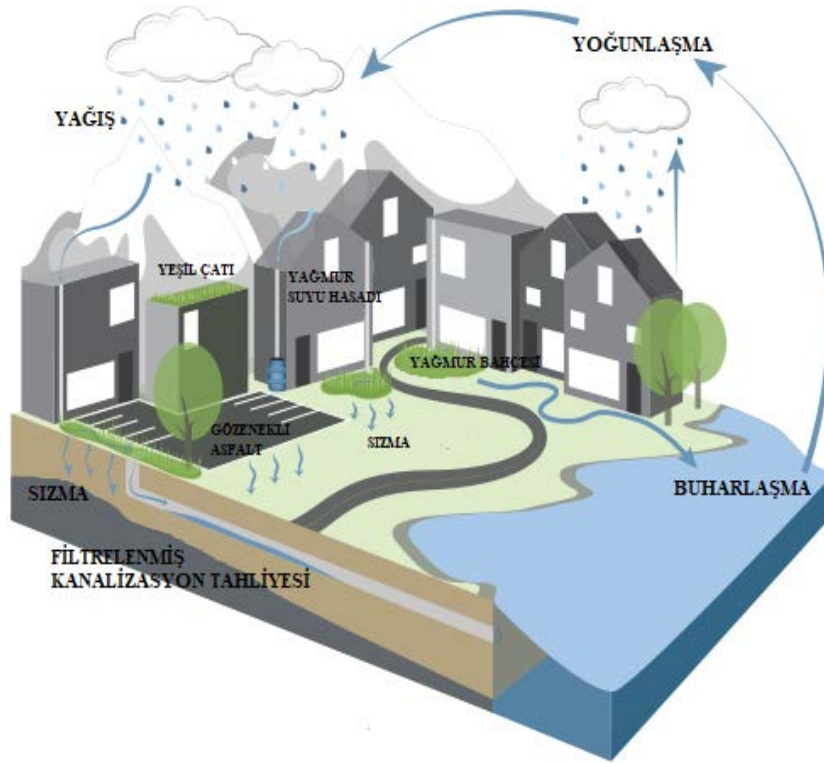
TDK tarafından yapılan tanımlar çok geniş bir kapsama sahip olmakla birlikte tanımlar içerisinde geçen kanalizasyon sözcüğü tam olarak konumuzda işleyeceğimiz geleneksel altyapı terimiyle örtüşmektedir.

Kanalizasyon sistemleri; yağmur sularının ve kullanılmış atık suların birbiriyle bağlantılı borular veya kanallar vasıtasıyla toplanıp atık su arıtma tesislerine iletilmesini sağlayan sistemlerdir. Ayırık, birleşik ve karma olmak üzere üçe ayrılmaktadır.

Yeşil altyapı (YA) ise, doğal ekosistem değerlerini ve işlevlerini koruyan ve bu sayede kişilere çevresel, sosyal ve ekonomik sürdürülebilirlik için gerekli ekolojik imkanlar sunan birbiriyle bağlantılı yeşil alan ağı olarak tanımlanmaktadır(Benedict and McMahon, 2002). Bir başka tanıma göre ise; (YA), yağışlı hava olaylarının neden olduğu yağmur suyunun olumsuz etkilerini yönetmeye ve ortadan kaldırmaya çalışan, toplumlar için birçok faydası bulunan uygun maliyetli ve dayanıklı bir sistem olarak tanımlanır(EPA, 2015).

Ahern (2007), ise yeşil altyapıyı, “Esas olarak hidrolojik ağlar üzerine temellendirilmiş, sayıları her geçen gün azalmakta olan ve ekolojik olarak büyük bir öneme sahip yeşil alanlar ile geleneksel altyapı alanlarını birbirine bağlayan, gelişmekte olan bir planlama ve tasarım konsepti” olarak tanımlamıştır.

Yeşil altyapı, toprağı, bitki örtüsünü ve doğal süreçleri kullanarak daha sağlıklı ve sürdürülebilir bir kentsel çevre için gerekli olan su yönetimini sağlamaktadır. Bir şehir veya ilçe ölçeğinde ele alındığında sel gibi felaketlerden koruyan, daha temiz hava ve daha temiz su sağlayan doğal alanları ifade ederken bir mahalle veya bir konut ölçeğinde ele alındığında ise; yağmur sularını depolayan ve gerektiğinde bu sulardan istifade edilen yağmur suyu yönetim sitemlerini ifade etmektedir. Aşağıdaki şekil (**şekil 4.**)bir şehir ölçeğinde yeşil altyapı sistemlerindeki su döngüsünü şematik olarak açıklamaktadır.



Şekil 4. Yeşil altyapı sistemlerinde su döngüsü (Rutgers, 2014)'den uyarlanmıştır.

Yeşil altyapı, yapısal ve yapısal olmayan uygulamalar olmak üzere iki kategoriye ayrılmaktadır. Yapısal YA; yeşil çatıları, yağmur bahçelerini, geçirgen döşemeleri, yağmur suyu tutma sistemlerini, yağmur suyu depolama tanklarını (yağmur varilleri ve sarnıçlar) ve sulak alanları içermektedir. Yapısal olmayan YA ise; kentsel alanlarda sızma kapasitesinin artırılması sağlamak üzere geçirimli olan toprak alanların ve bitki örtüsünün artırılmasını amaçlayarak geçirimsiz alanların daha fazla olduğu yol ve bina gibi yapılar için alternatif çözümler getirmektedir(Elliott and Trowsdale, 2007; Jayasooriya and Ng, 2014).

Geleneksel yağmur suyu yaklaşımları, kentsel alanlarda meydana getiren yüzey akışlarını genellikle borular, oluklar ve yapay olarak oluşturulmuş kanallar vasıtasıyla merkezi ve kombine kanalizasyon sistemlerine, alıcı su kaynaklarına ve bölgesel bir atık su arıtma tesisine yönlendirmeyi amaçlamaktadır. Ancak bu yaklaşımlar hem yüksek maliyet gerektiren bir altyapıya ihtiyaç duyması hem de yoğun fırtına olayları sırasında kapasitesini aşarak çevresel zararlara sebep olması bu sistemlerin yağmur suyu konusunda yetersiz kalmasına neden olmaktadır(Abi Aad et al., 2010; Thiagarajan et al., 2018). Bunun haricinde çöp, bakteri ve ağır metaller gibi kirletici maddeleri de alıcı su kaynaklarına taşıyarak akarsuların kirlenmesine neden olmaktadır(Liu et al., 2014). Bunun aksine yağmur suyu yönetiminde kullanılan ve en iyi yönetim uygulamaları olarak da adlandırılan YA sistemleri bu sistemler üzerindeki yükü hafifleterek çevresel zararların ve yüksek maliyetlerin önüne geçmeyi amaçlamaktadır(Abi Aad et al., 2010).

EPA (2012)' ya göre; kentsel yüzey akışı, haliçlerde meydana gelen bozulmaların başlıca sebebi ve göllerde oluşan kirliliğin en temel üçüncü sebebidir. Beach (2003)'e göre ise; kentsel alanlardaki geçirimsizlik oranı %10'u aştığında alıcı su kaynaklarında önemli bir bozulmanın meydana gelebileceğini belirtmektedir.

Demir (2012) ise; yağmur suyunun geçirimsiz zeminlerden dolayı yüzeysel akışa geçen miktarı kırsal alanlarda ortalama %10 civarında iken bu oranın kentsel alanlarda %55 seviyelerine ulaşabildiğini ve kentsel alanlarda yüzeysel akışa geçen bu suların beraberinde

taşıdığı kimyasal, ağır metal ve kirlenici toksin maddeleri de alıcı su kaynaklarına taşıyarak bu kaynakların kirlenmesine neden olduğunu belirtmektedir.

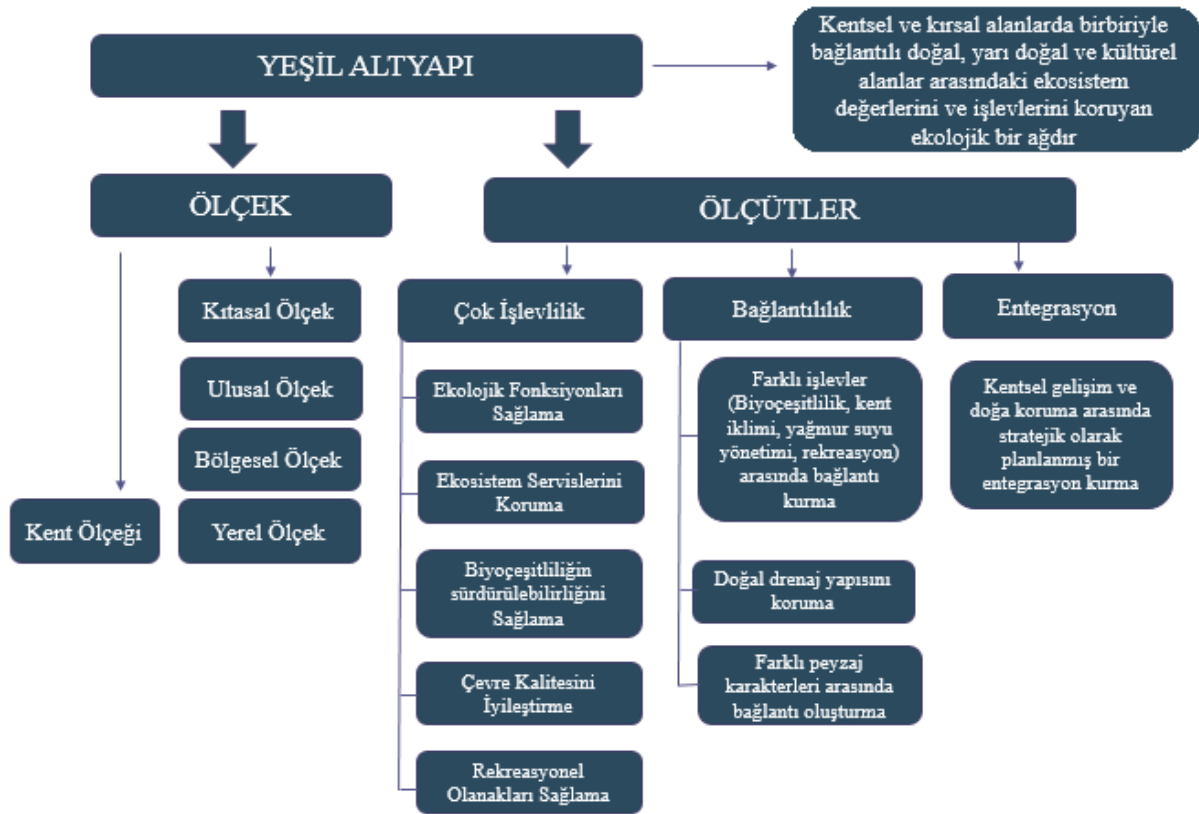
Yeşil Altyapı Ölçek ve Ölçütleri

Yeşil altyapı kavramını tek bir tanımla ele almak mümkün değildir ancak daha geniş çapta ele alınacak olursa ölçeğe dayalı olarak iki kavram altında birleştirilmektedir. Bunlar;

- Kentsel ölçek
- Peyzaj ölçeği (bölgesel, ulusal ve uluslararası)(EEA, 2011)

Kentsel ölçekte yeşil altyapı kavramı; kentsel alanlarda yer alan ve birbiriyle ilişkili olan yeşil alan ağlarının korunmasını ve geliştirilmesini açıklarken, peyzaj ölçeğinde ise; ekolojik açıdan büyük öneme sahip habitatlar arasındaki işlevlerin korunmasını ve geliştirilmesini açıklamaktadır. Her iki kavramdan da anlaşılacağı üzere temel odak noktası, yeşil alan ağlarının ve doğal özelliklerinin korunması ve geliştirilmesidir(EEA, 2011; Yazgı & Yılmaz, 2016).

Yeşil altyapı planlama yaklaşımlarını hem kentsel ölçekte olsun hem de peyzaj ölçeğinde olsun birtakım ilkelerle ifade etmek mümkündür. Bunlar peyzaj hedeflerinin karşılanması amacıyla çok işlevlik, bağlantılık ve entegrasyon olmak üzere 3 başlık altında aşağıdaki şekilde (Şekil 5.) ifade edilmiştir.



Şekil 5. Yeşil altyapı ölçek ve ölçütleri. Boverket (1992); Yazgı ve Yılmaz (2016)' dan uyarlanmıştır.

Yağmur Suyu Yeşil Altyapı Uygulamalarının Fayda Maliyet Analizi

Yerel yönetimler yağmur suyu altyapısı planlamalarında harcadıkları yüksek maliyetler ve sınırlı bütçelerinden dolayı son yıllarda daha düşük maliyetli yeni arayışlara yönelmektedir bu arayışlardan biri de yeşil altyapı uygulamalarıdır. Yağmur suyu yönetimi

konusunda yapılan birçok çalışma yeşil altyapı sistemlerinin gri altyapıya kıyasla daha uygun maliyetli bir çözüm olabileceğini göstermektedir.

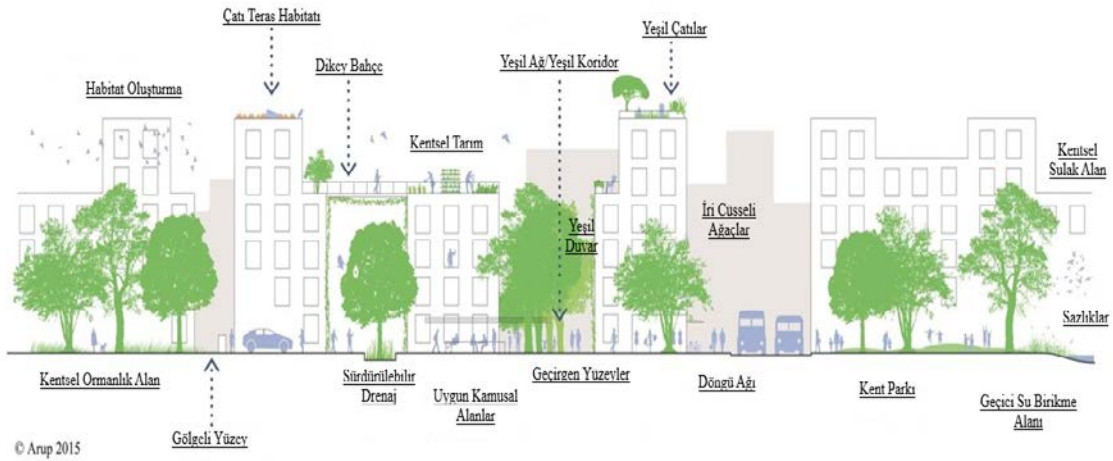
Mittman and Kloss (2015)'un ABD genelinde yaptığı bir analiz çalışmasında, yağmur suyu yönetiminde yeşil altyapı uygulamalarının gri altyapı sermaye maliyetlerini yılda yaklaşık 120 milyon dolar azaltabileceğini, atık su arıtma ve pompalama maliyetlerini ise yılda 661 milyon dolar azaltabileceğini belirtmiştir. Yeşil altyapı uygulamalarının tüm faydaları göz önünde bulundurulduğunda ise gri altyapıya entegre edilmesiyle yılda 51.6 milyon dolar, bağımsız olarak uygulandığında ise yılda 94.5 milyon dolar uygulama maliyetlerini azaltabileceği öngörülmüştür.

ABD'nin Michigan eyaletinin Grand Rapids şehrinde yeşil ve gri altyapı kullanılarak yağmur suyu yönetiminin faydaları ve maliyetlerini analiz eden başka bir çalışmada ise, belirlenen altı farklı yeşil altyapı uygulamasının (yeşil çatılar, yağmur bahçeleri, gözenekli asfalt, sızan bioretention havzaları, sokak ağaçları ve doğal alanların korunması) geleneksel altyapılarla kıyaslandığında, yeşil çatılar hariç diğer sistemlerin uygun maliyetli seçenekler olduğunu, yeşil çatıların yaşam döngüsü maliyetleri hesaplandığında ise sağladığı faydaları aştığını ancak LEED (enerji ve çevre tasarımında liderlik) sertifikalı bir binaya uygulandığında daha düşük maliyetli bir çözüm olacağı belirtilmiştir(Nordman et al., 2018).

Yeşil çatıların fayda-maliyeti üzerine yapılan bir çalışmada ise; yeşil çatıların ortalama maliyetinin geleneksel çatılarla kıyaslandığında %39 daha fazla olduğunu ancak yeşil çatıların azalan yağmur suyu akışı ve bu sayede belediye yağmur suyu altyapısı üzerindeki baskıyı azaltması, binaya sağladığı enerji tasarrufu, uzun ömürlü oluşu ve hava kalitesinin iyileştirilmesi gibi ömür boyu sağladığı faydalar göz önünde bulundurulduğunda bu faydaların ön sermaye maliyetlerine karşı daha ağır bastığı sonucuna varılmıştır(Clark et al., 2008). Kentsel bir su havzasındaki tüm düz çatıların, yeşil çatı sistemleriyle değiştirildiği öngörülen bir çalışmada ise; yeşil çatıların geleneksel bir çatıya kıyasla %10 ila %14 arasında daha pahalı olduğu ancak bir yaşam döngüsü içerisinde (40 yıl) değerlendirildiğinde sağladığı sosyal faydalar ve enerji tasarruflarından dolayı yeşil çatıların geleneksel çatılardan daha uygun maliyetli olabileceğini göstermiştir(Carter and Keeler, 2008).

Düşük Etkili Geliştirme Yaklaşımı

Düşük etkili geliştirme (DEG) yaklaşımı, geleneksel yağmur suyu yönetimine alternatif olarak geliştirilen, YA sistemlerinin yüzey akışı yönetimindeki etkinliklerini belirlemek, kentsel yağmur suyu altyapısı üzerindeki baskıyı azaltmak ve iklim değişikliğine uyum sağlamak üzere yapılan bir yaklaşımdır(Dietz, 2007; EPA, 2014a; Eckart et al., 2017). Diğer bir ifadeyle bir alanın doğal hidrolojik rejimini sağlıklı bir şekilde korumak veya gelişim sağlamadan önceki doğal hidrolojik rejimini taklit etmek için kullanılan mikro ölçekli kontrol uygulamalarıdır(Coffman, 2002). Aşağıdaki şekil (**şekil 6.**) kentsel alanlardaki düşük etkili geliştirme bir diğer adıyla yeşil altyapı bileşenlerini şematik olarak göstermektedir.



Şekil 6. Kentsel alanlardaki düşük etkili geliştirme/yeşil altyapı bileşenleri(Arup, 2015).

DEG yaklaşımları ayrıca geçirimsiz alanların neden olduğu sızdırmazlığın azaltılması ve geçirgen toprak ve bitki örtüsü kullanımının en üst seviyeye çıkarılması amacıyla geçirimsiz alanların daha fazla olduğu yol ve bina yerleşimlerine alternatif çözümler sunmak üzere yapısal olmayan eğitim programları ve önlemleri de kapsamaktadır(Elliott and Trowsdale, 2007). Bu yaklaşımların tümü, suyun geçirgen yüzeylerden geçişinin artırılmasını, toprağın derinliklerine sızmasını veya belirli bir alanda yağmur sularının depolanıp ihtiyaç halinde tekrar kullanılmasını amaçlamaktadır(Graham et al., 2004).

Geleneksel yağmur suyu yönetim sistemleri su taşkınlarını kontrol etmek için geleneksel çözümleri kullansa da, DEG'in amacı daha bütüncül bir yaklaşımla geleneksel altyapı tasarımları yerine doğal uygulamalar kullanarak kentleşmenin hidrolojik etkilerini kaynağında çözüme ulaştırmaktır(Damodaram et al., 2010).

Qin et al. (2013)'ün üç farklı yeşil altyapı (DEG) tekniğini (yağmur hendeği, yeşil çatı, geçirgen döşemeler) geleneksel drenaj sistemleriyle kıyasladığı bir çalışmada düşük etkili geliştirme (DEG) kontrollerinin geleneksel kentsel drenaj sistemlerine göre yağmur suyu yönetimi konusunda daha sürdürülebilir bir çözüm sunduğu, kısa ve uzun süreli fırtına olayları sırasında kentsel sel felaketini azaltmada daha etkili olduğu sonucuna varmıştır.

Dünyanın birçok kentinde yağmur suyunu yönetmek, planlamak ve geliştirmek için DEG bileşenleri kullanılmaktadır. Yeni Zelanda'da kentsel tasarım ve geliştirme (KTG), Avustralya'da suya duyarlı kentsel tasarım (SDKT) ve Avrupa'da sürdürülebilir kentsel drenaj sistemleri (SKDS) gibi farklı isimlerle anılsa da hepsinde uygulanan yöntem ve tasarım felsefeleri aynıdır(Eckart et al., 2017). Genel olarak DEG bileşenlerinin kullanılmasıyla ulaşılması gereken hedefler şunlardır;

- Kentsel alanlarda sürdürülebilir bir su döngüsü sağlamak,
- Akış rejimini mümkün olduğu oranda doğal seviyeye yaklaştırmak,
- Yer altı ve yer üstü su kaynaklarını korumak ve su kalitesini iyileştirmek,
- Yağmur suyu yönetim önlemlerini peyzaj alanlarına entegre ederek kentsel peyzajın kalitesini artırmak(Eckart et al., 2017).

DEG bileşenleri sızmaya veya depolamaya dayalı sistemler olmak üzere iki kısımda incelenebilmektedir. Sızmaya dayalı teknikler arasında, yağmur bahçeleri, yağmur hendekleri, sızma siperleri ve gözenekli kaplamalar sayılabilir. Depolamaya dayalı teknikler arasında ise; yeşil çatılar, yağmur varilleri ve sarnıçlar sayılabilmektedir(Eckart et al., 2017). Sızmaya dayalı teknikler, yeraltı sularının doldurulması ve yeraltı akışlarının düzenlenmesine yardımcı

olan teknikler olarak ifade edilirken depolamaya dayalı teknikler, dışarı akışı azaltmak üzere yağmur sularının tutulduğu teknikler olarak ifade edilmektedir(Fletcher et al., 2013).

Düşük Etkili Geliştirme Bileşenleri

- Yağmur bahçeleri,
- Yeşil Çatılar,
- Bioswales,
- Yağmur hendekleri,
- Geçirgen döşemeler,
- Yağmur varilleri ve sarnıçlar,
- Sızma siperleri,
- Çatı üstü bağlantısının alttan çıkışının kesilmesi (Çatı oluğunun bağlantısının direkt olarak yeşil alana yönlendirilmesi).

DEG bileşenlerinin uygulanmasıyla kentleşmenin hidrolojik etkilerinin azaltılması ve su kalitesi hedeflerine ulaşılması amaçlanmaktadır. Örneğin; Liu et al. (2015)'in yeşil altyapıların yağmur suyunu azaltmadaki etkinliğini ölçmek üzere dört farklı yeşil altyapı bileşeni (Yeşil alan miktarının artırılması, yeşil alanların iç bükey haline dönüştürülmesi, depolama havuzu ve geçirgen döşemeler) üzerine yaptığı süreç tabanlı bir çalışmada, 5 yıllık tekrarlayan fırtına olaylarına karşı depolama havuzlarının yüzey akışları %100 oranında önlediği, geçirimsiz alanların %50 si geçirimli kaplama ve yeşil alanların yüzeyleri iç bükey olacak şekilde düzenlendiğinde ise yüzeysel akışların %95 oranında önlendiğini belirtmiştir.

Connecticut'ta yapılan başka bir çalışmaya göre ise; bir havzanın kentleşme sağlanmadan önceki ve kentleşmeden sonraki hidrolojik yapısının karşılaştırmalı olarak incelenmesi sonucunda artan geçirimsiz alanlar nedeniyle toplam yüzey akışların 16 kat arttığı tespit edilmiştir. Bu durumun önlenmesi amacıyla havzanın belli bir kısmında yer alan geleneksel oluk ve boruların yerine bioretention sistemlerin ve geleneksel asfalt alanları yerine ise geçirimli beton kaplamalar gibi iki farklı DEG uygulamalarının kullanılması sonucunda haftalık yağmur suyu akışlarında %42 oranında bir azalma olduğu, DEG uygulamalarından önce yıllık yüzey akışları 36,6 cm iken DEG uygulamalarından sonra bu oranın 8,6 cm'ye düştüğü bildirilmiştir(Bedan and Clausen, 2009).

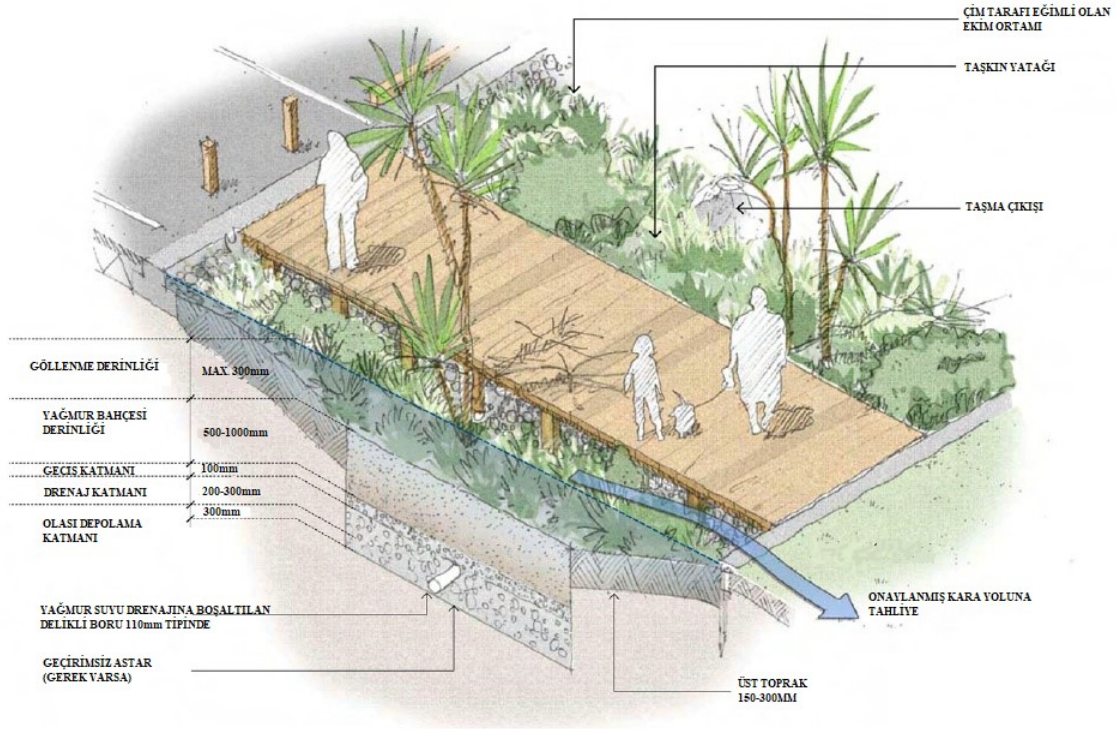
Brudler et al. (2019)'un kentsel yağmur suyu yönetim sistemlerinin ekosistemler üzerindeki etkisini belirlemek üzere yapmış olduğu yaşam döngüsü değerlendirmesi (YDD) verilerine göre; birleşik yağmur suyu yönetim sistemlerinin hem ekosistemlere hem de kaynak kullanılabilirliğine en yüksek zararı verdiği ancak yalnızca yeşil altyapı sistemlerinin kullanıldığı sistemlerin daha düşük ekosistem hasarına neden olduğu ve kaynak kullanılabilirliğine zarar gelmesini önlediği belirtmiştir.

Yağmur Bahçeleri (Bioretention)

Yağmur bahçeleri (raingardens) bir diğer adıyla biyolojik tutma alanları (bioretention), çevredeki geçirimsiz yüzeylerden(Asfalt alanlar, yollar, çatılar vb.) süzülen yağmur sularının doğrudan bu alanlara yönlendirilerek buralarda tutulduğu ve bu sayede yüzey akışlarının önlediği üzeri bitkilerle kaplı peyzajdaki çöküntü alanlarıdır(Davis et al., 2009; Müftüoğlu ve Perçin, 2015). Yağmur suları bu alanlarda tutulduğunda yağmur sularıyla birlikte akan kirletici maddelerde özellikle çeşitli ağır metaller(Cu, Zn, Pb) ve askıda kalan katı maddeler bu alanlarda süzerek yer altı sularına karışmasını engellemekte ve bu sayede alıcı suların kirlenmesi önlenmektedir(Davis et al., 2001; Hatt et al., 2009).

(Davis et al., 2009)'un laboratuvar ve saha çalışmalarından elde ettiği veriler sonucunda yağmur bahçelerinin çeşitli kirleticileri uzaklaştırmada en etkili yöntemlerden biri olma potansiyeline sahip olduğunu belirtmiştir.

Yağmur bahçeleri gibi alternatif yağmur suyu yönetim sistemleri geçirimsiz alanlardan gelen aşırı yüzey akışlarını direkt olarak kaynağında çözmektedir(Abi Aad et al., 2010). Aşağıdaki şekilde (**şekil 7.**) standart bir yağmur bahçesi örneği şematize edilmiştir.



Şekil 7. Yağmur bahçesinin şematik bir gösterimi(Malcolm and Lewis, 2008)’den uyarlanmıştır.

Yağmur bahçeleri bazı özellikleri bakımından bitkilendirilmiş hendekler veya infiltrasyon sağlayan sistemlere benzemektedir. Ancak asıl görevi bu sistemler gibi yağmur sularını alıcı su kaynaklarına iletilmek değil, suyu kendi bünyesinde depolamaktır. Ayrıca çeşitli şekil ve boyutlarda uygulanabilirliğinin olması sağladığı en büyük avantajlardan biridir. Birçok kullanım alanı olmakla birlikte kent merkezlerinde, yerleşim bölgelerinde, sanayi alanlarında ve geçirimsiz alanların fazla olduğu otopark gibi alanlarda yağmur sularının neden olduğu yüzey akışlarını kontrol etmek ve çevreye olabilecek zararları önlemek açısından etkili bir şekilde kullanılmaktadır(İnan, 2020).

Yağmur bahçelerinin geçirgenlik özelliği oldukça yüksektir. Alan olarak aynı büyüklükteki herhangi bir çim alanla kıyaslandığında suyun %30 daha fazla toprağa sızmasına olanak tanımaktadır(Anonim, 2013c).

Yağmur bahçelerinin uygulama alanları

Yağmur suyu yönetimine alternatif bir çözüm olarak oluşturulan yağmur bahçelerinin birçok alanda kullanımı mümkündür. Ülkemizde kullanımı pek yaygın olmamakla birlikte küresel iklim değişikliğinin meydana getireceği su problemlerine bir nebze de olsa çözüm bulmak veya yoğun yağışlar sebebiyle şehirlerimizde meydana gelen sel ve su taşkınlarının önlenmesi amacıyla ilerleyen dönemlerde hem özel mülkiyete hem de kamu kurum ve kuruluşlarına ait parseller içerisinde ve bir yol kenarında yer alan kaldırımın bitişiğinde kullanımına rastlanacaktır. Bu konuda Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı tarafından oluşturulan yağmur bahçesi hazırlama kılavuzu ve bu konuda yapılan diğer akademik çalışmalar geleceğe ışık tutmaktadır. Anonim (2018b), yağmur bahçelerinin

parseller içerisinde ve yol kenarlarında olmak üzere iki şekilde kullanımının olduğunu belirtmektedir.

Parsel içinde uygulanan yağmur bahçeleri

Parsel içerisinde uygulanan yağmur bahçeleri özellikle yağmur suyunun yeniden kullanılmasını amaçlamakta ve uygulanan alanlarda su tasarrufu sağlamaktadır. Bunun haricinde uygulanan alanlara estetik bir görüntü kazandırarak ilgi çekici manzaralar oluşturmaktadır. Kurulumu kolay olmakla birlikte herkes tarafından kolayca oluşturulabilmektedir. Aşağıdaki şekil (**şekil 8.**) parsel içerisinde kullanılan yağmur bahçesinin bir örneğini göstermektedir. Çeşitli yer örtücü bitkilerle tasarlanmış olan bu yağmur bahçesinde yağmur sularının depolanması ve yeniden kullanılması amaçlanmıştır.



Şekil 8. Parsel içerisinde kullanılan yağmur bahçesi örneği(CSB, 2018).

Yol kenarı ve refüjlerde uygulanan yağmur bahçeleri

Yol kenarı ve refüjlerde uygulanan yağmur bahçeleri özellikle geçirimsiz yüzeylerden kaynaklanan yüzey akışlarının neden olduğu sel ve taşkınların önlenmesi amacıyla fazla suyun kontrollü bir şekilde yer altı sularına tahliye edilmesini ve beraberinde sürüklediği kirletici maddelerin ise bu alanlarda tutularak su ve çevre kirliliklerini önlemeyi amaçlamaktadır. Bunun haricinde kent estetiğinin artırılmasına ve kentsel ısının dengede tutulmasına da yardımcı olmaktadır.(Davis et al., 2001; Anonim, 2018b) Aşağıdaki şekil (**şekil 9.**) farklı alanlarda tasarlanmış yol kenarında kullanılan yağmur bahçelerinin örneklerini ifade etmektedir. Tüm kullanımlarda asıl amaç yol kenarlarında biriken fazla suyun kontrollü bir şekilde alandan uzaklaştırılması olmakla birlikte peyzaj kalitesi ve estetik değerlere de önem verilmiştir.

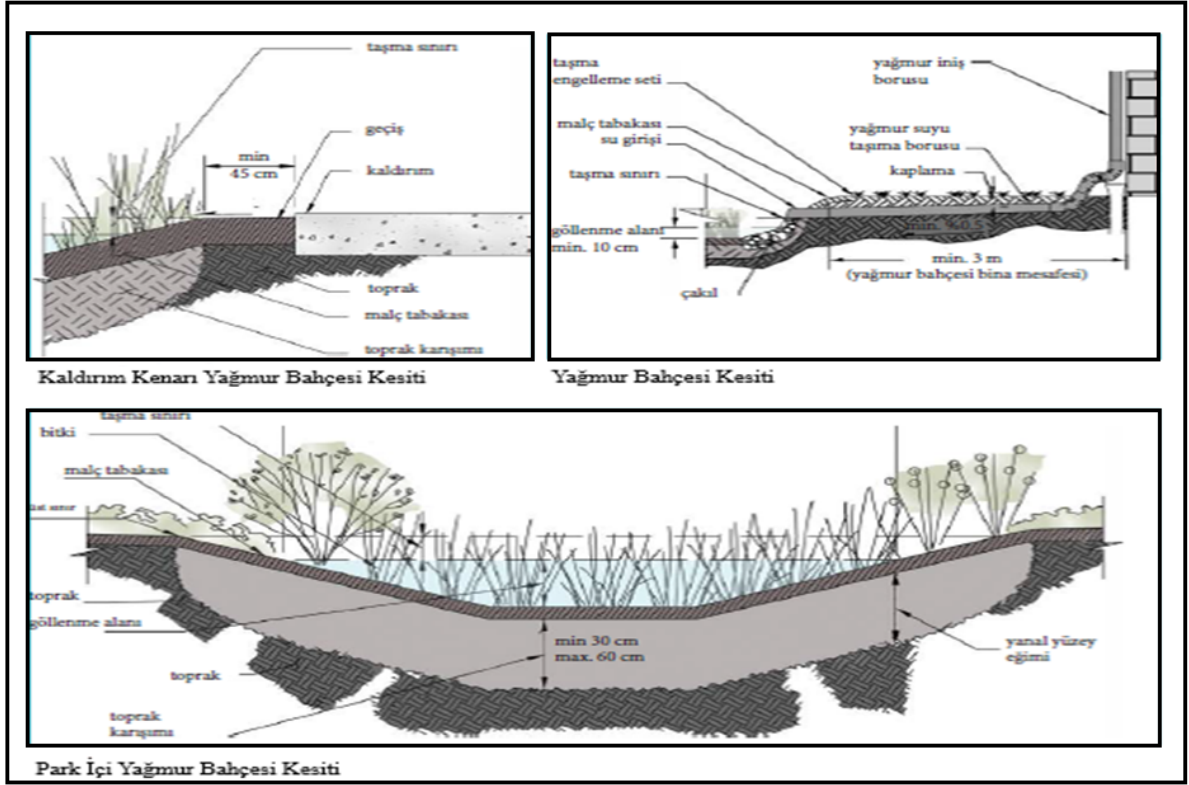


Şekil 9. Yol kenarı ve refüjlerde uygulanan yağmur bahçesi örnekleri. URL-1(Anonim, 2021b), URL-2(Dunnett, 2018), URL-3 (Anonim, 2017), URL-4 (Anonim, 2021a)

Hunt et al. (2006)'a göre; yaya trafiğinin yoğun olduğu alanlarda uygulanan yağmur bahçeleri, su kirliliğini azaltmasının yanı sıra estetik bir görüntü sağlayarak hem su kalitesi hem de estetik açıdan peyzaj hedeflerini karşılamaktadır.

Yağmur bahçelerinde bulunması gereken yüzey katmanları

Bir yağmur bahçesi belli bir alana uygulandığında ilk başta alan belli bir derinlikte kazılarak dip kısmına drenaj sistemleri yerleştirilir daha sonra sırasıyla drenaj kanallarının üzeri çakıl örtüsü ve 0.7-1.2m arasında toprak dolgusuyla doldurulur son olarak alan malç tabakasıyla kaplanarak üzeri ağaç, çalı ve çim ile bitkilendirir. Alana minimum 25mm yağış düştüğünde meydana gelen yüzey akışları bu alanlarda tutularak drenaj kanalllarından ve evapotranspirasyon yoluyla alandan uzaklaştırılır bu sayede yüzey akışları engellenmiş olmaktadır(Hunt et al., 2006). Aşağıdaki şekilde (**şekil 10.**) yol kenarı ve parsel içerisinde kullanılan yağmur bahçelerinin kesitleri gösterilmektedir.



Şekil 10. Yağmur bahçesi kesit görüntüleri Anonim (2018b)' den uyarlanmıştır.

Yağmur Bahçelerinin Sağladığı Faydalar

Yağmur bahçeleri yağmur suyunun neden olduğu olumsuzlukları azalmanın yanı sıra ayrıca birçok faydası da bulunmaktadır. Bu faydalar; Hunt et al. (2006); Roy et al. (2008); Davis et al. (2009); Anonim (2018b) tarafından şu şekilde sıralamaktadır.

- Yüzey akışıyla gelen kirletici maddeleri doğal bir filtre gibi tutarak yağmur sularının temizlenmesine ve yeraltı sularının beslenmesine olanak sağlar,
- Biyolojik çeşitliliğin artmasına imkân tanır,
- Geleneksel drenaj sistemlerine alternatif çözümler getirerek sürdürülebilir su yönetimi sağlar,
- Uygulandığı alanın nem dengesini korumasına yardımcı olur,
- Sel riskini azaltır,
- Yüzey akışı ile gelen suyun kontrollü bir şekilde akmasını sağlayarak meydana getirdiği toprak kayıplarını engeller,
- Geçirimsiz yüzeylerde biriken suyun doğaya tekrardan kazandırılmasına olanak tanır,
- Üzerinde çeşitli bitkisel materyallerin bulunmasıyla estetik bir görünüm oluşturur.

Yağmur Bahçeleri Üzerine Yapılan Çalışmalar

Yağmur bahçeleri üzerine yapılan çalışmalarda yağmur bahçelerinin yüzey ve tepe akışlarını engellediği ayrıca kirletici maddeleri filtreleyerek su kaynaklarının kirlenmesinin engellendiği sonucu ortaya çıkmaktadır. Yapılan bazı çalışmalarda elde edilen sonuçlar aşağıda belirtilmiştir.

ABD'nin Virginia eyaletinde mevcut bir otoparktan kaynaklanan yüzey akışlarını önlemek ve akıntıyla gelebilecek kirletici maddelerin hangi oranda bu alanlarda tutulacağını tespit etmek için yapılan bir saha çalışmasında otopark yakınlarına kurulan bir yağmur

bahçesinin tepe akış oranlarını %99 oranında düşürdüğü ve fosfor, nitrojen ve çeşitli tortular gibi kirletici maddeleri de %99 oranında filtrelediği belirtilmiştir(DeBusk and Wynn, 2011).

Avustralya’da üç farklı sahaya yerleştirilen yağmur bahçelerinin iki farklı iklim koşulları altında hidrolojik performansının ve kirletici maddeleri engelleme potansiyelinin belirlendiği deneysel bir çalışmada ise, yağmur bahçelerinin akış hacimlerini ortalama %33 oranında azalttığı, askıda kalan katı maddeleri ise ortalama %90 oranında engellediği tespit edilmiştir(Hatt et al., 2009)

Yağmur bahçelerinin, içme suyu kaynaklarındaki yağmur ve atık sularından kaynaklı kanalizasyon taşmalarının etkisini belirlemek üzere Kanada’nın Quebec bölgesinde yapılan bir çalışmada ise; toplam geçirimsiz alanların %21’i tamamen yağmur bahçesi olarak tasarlandığında, yağış derinliğine bağlı olarak toplam %12,7 ila %19,4 oranlarında yüzey akışlarının azaldığı, maksimum tepe akışının ise %7 ila %56 arasında azaldığı tespit edilmiştir. Ayrıca 22mm yağış derinliğinin altındaki yüzey akışlarının tamamı yağmur bahçeleri tarafından tutulurken 22mm üzerinde olan yağış derinliğinde meydana gelen yüzey akışlarının (27,4mm yağış derinliğinde %89 tutulma, %39,8mm yağış derinliğinde ise %69 tutulma) ise tamamının yağmur bahçeleri tarafından tutulmadan bir kısmının yüzey akışına devam ettiği belirtilmiştir(Autixier et al., 2014).

Yağmur bahçeleriyle yağmur varillerinin etkinliğinin araştırıldığı bir çalışmada ise; yağmur bahçelerinin yağmur suyu hacmini azaltmada yağmur varillerine kıyasla daha etkili bir sistem olduğu, bir alanın %3,9 oranında bir kısmının yağmur bahçesi olarak tasarlandığında %38 oranında bir hacim azalması sağladığı tespit edilmiştir. Ayrıca yapılan çalışmada yağmur varillerinden taşan yağmur sularının yağmur bahçelerine yönlendirilmesiyle kombineli bir şekilde yüzey akışlarının önlenebileceği sonucuna varılmıştır(Abi Aad et al., 2010).

ABD’nin Ohio eyaletinde geçirgenliği düşük killi topraklarda tesis edilen ve üç farklı yağmur bahçesinin hidrolojik performansının incelendiği bir diğer çalışmada; sırasıyla 3600, 1900 ve 2700 m²alana sahip ve geçirimsiz alan yüzdeleri, toplam alanın %77, %58 ve %58’i olan üç havzanın 182, 57 ve 79 m² lik bir kısmına inşa edilen yağmur bahçelerinin geçirgenliği düşük topraklarda dahi etkili bir performans gösterdiği ölçülmüştür. Toplam 60, 35, 48 m³ depolama hacimlerine sahip olan ve ilk iki sistemin yalnızca otsu bitkilerden diğer sistemin ise ağaç ve çalılardan oluşturulduğu bu yağmur bahçelerinin sırasıyla %59, %42 ve %56 oranında yüzey akışlarını önlediği belirlenmiştir(Winston et al., 2016).

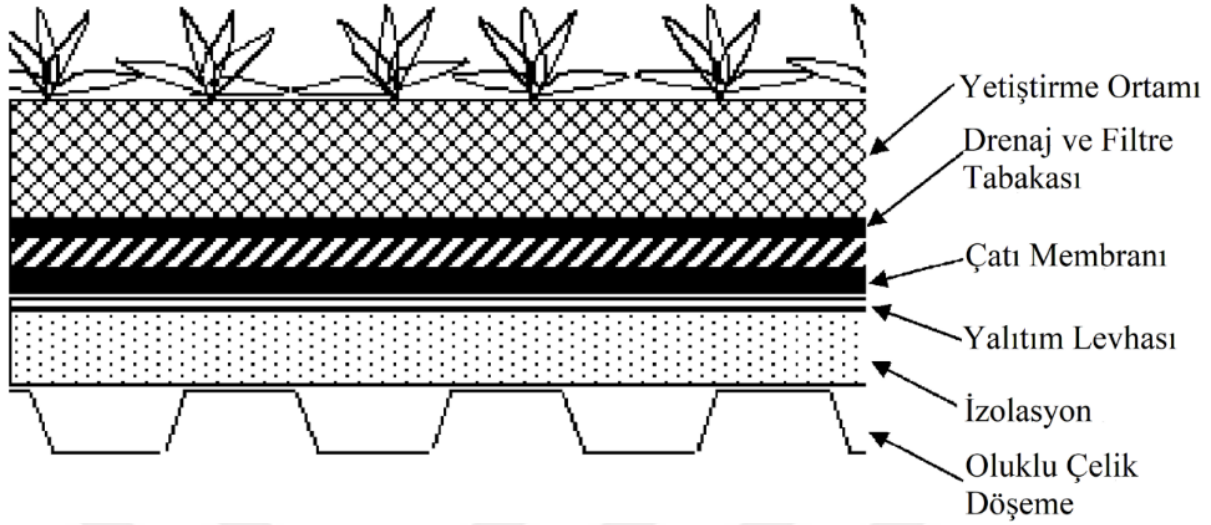
Edirne’de yapılan ve yağmur bahçelerinin sürdürülebilir su temini açısından değerlendirildiği bir çalışmada ise iki farklı sitenin bakımı için önerilen yağmur bahçelerinin her bir site için mevcut alana göre yılda 400ton daha fazla su tasarrufu sağladığı tespit edilmiştir(Ertin vd., 2012).

Yapılan tüm çalışmalarda elde edilen veriler yağmur bahçelerinin geçirimsiz alanlarda meydana gelen yüzey ve tepe akışlarını etkili bir biçimde önlediğini göstermektedir. Oransal olarak farklılıkların meydana gelmesinde farklı iklim koşullarının, yağış miktarlarının, geçirimsiz alan yüzdelerinin, kullanılan bitkisel ve kimyasal materyal karışımlarının, kullanılan bitki türlerinin, alt yapı drenaj sistemlerinin ve yüzey derinliklerinin etkisi olduğu anlaşılmaktadır.

Yeşil Çatılar

Yeşil çatılar, bir yapının düz veya eğimli çatısının üzerinin kısmen veya tamamen çeşitli izolasyon sistemleri, su yalıtım sistemleri ve bir yetiştirme ortamıyla kaplanıp üzerlerinin ağaç, çalı ve yer örtücülerle bitkilerle bezenmesi sonucu oluşturulan bir bitki örtüsü tabakasıdır. Başka bir ifadeyle bitkisel çatılar, ekolojik çatılar, yaşayan çatılar ve canlı

çatılar olarak da bilinmektedir. Yeşil bir çatı genel olarak; bir bitki örtüsü, yetiştirme ortamı, filtre membranı, drenaj tabakası, su geçirmez / kök koruyucu tabaka ve su yalıtım(izolasyon) katmanlarından oluşmaktadır(Anonim, 2013b). Aşağıdaki şekil (**şekil 11.**) yeşil bir çatının enine kesitini göstermektedir.



Şekil 11. Yeşil bir çatının enine kesiti(Kosareo and Ries, 2007)'den uyarlanmıştır.

Yeşil çatılarda bulunan katmanlardan her birinin farklı bir işlevi bulunmakla birlikte genel olarak bitkilerin yaşamlarını idame ettirebilmeyi, yağmur sularını tutmayı ve alttaki yapıya izolasyon sağlamayı amaçlamaktadır. En önemli katmanlardan biri olan yetiştirme ortamı su tutma kapasitesi yüksek, havalandırma ve sıkışmaya dayanıklı, hafif bir yapıya sahip mineral agregalar ve organik materyallerden oluşur. Yetiştirme ortamında kullanılan toprağın özellikleri ve yağmur yağmadan önceki nem koşulları ise ne kadar suyun tutulacağı ve yüzey akışına geçen kısmının ne kadar olacağı konusunda oldukça önemlidir(Berndtsson, 2010; Anonim, 2013b). Genel olarak yeşil çatılar yoğun(intensif) ve yarı yoğun(ekstensif) olarak iki kısma ayrılmaktadır(Anonim, 2013b).

İntensif Yeşil Çatı

İntensif (Yoğun) Yeşil Çatı sistemi; 15-120cm derinliğinde bir yetiştirme ortamına, ağaç ve çalı türlerinin plantasyonu sonucu oluşturulan, genellikle estetik amaçlı olarak tanzim edilen ve yoğun sistemler gerektiren(drenaj, su yalıtım vb.) bahçe görünümüne sahip yapı üzeri alanlardır(Dunnett and Kingsbury, 2008; Ekşi ve Uzun, 2016). Aşağıdaki şekil (**şekil 12.**) bir binanın terası üzerine oluşturulmuş yoğun bir yeşil çatı örneğini temsil etmektedir.



Şekil 12. İntensif (yoğun) bir yeşil çatı örneği(Anonim, 2021c).

Ekstensif Yeşil Çatı

Ekstensif (Seyrek) Yeşil Çatı sistemi ise; 5-15cm yetiştirme ortamına sahip genellikle sedum türleri gibi kendini yenileme yetenekleri yüksek ve kuraklığa dayanıklı yer örtücü bitkilerle bitkilendirilmiş, yoğun sistemler gerektirmeyen, daha çok ekolojik amaçlı olarak tesis edilen çok az bakım gerektiren alanlardır(Kosareo and Ries, 2007; Dunnett and Kingsbury, 2008; Ekşi ve Uzun, 2016). Aşağıdaki şekil (**şekil 13.**)Singapur'da ki Nanyang Tenoloji Üniversitesi kampüsünde yer alan sanat tasarım ve medya okulunun terasında oluşturulmuş seyrek bir yeşil çatı örneğini göstermektedir.



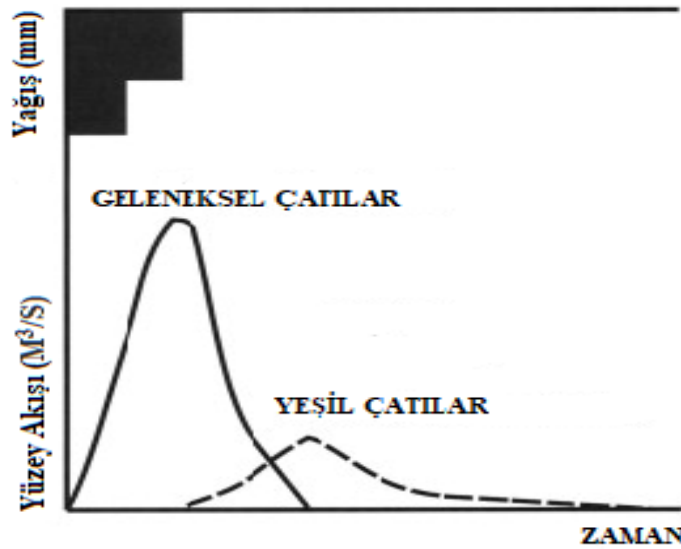
Şekil 13. Ekstensif (seyrek) bir yeşil çatı örneği(Anonim, 2018c).

Yeşil Çatılar Üzerine Yapılan Çalışmalar

Yağmur suyu yönetimindeki modern yaklaşımlar, geleneksel çatılar yerine bitkilendirilmiş yeşil çatıların kullanılmasıyla genel anlamda çevresel problemlere çözüm bulunacağı yönündedir. Bu bölümde kentsel yağmur suyu yönetiminde yeşil çatıların geleneksel çatılara kıyasla nasıl bir performans sergilediği ve çevreye sağladığı çeşitli faydaları üzerinde durulmuştur.

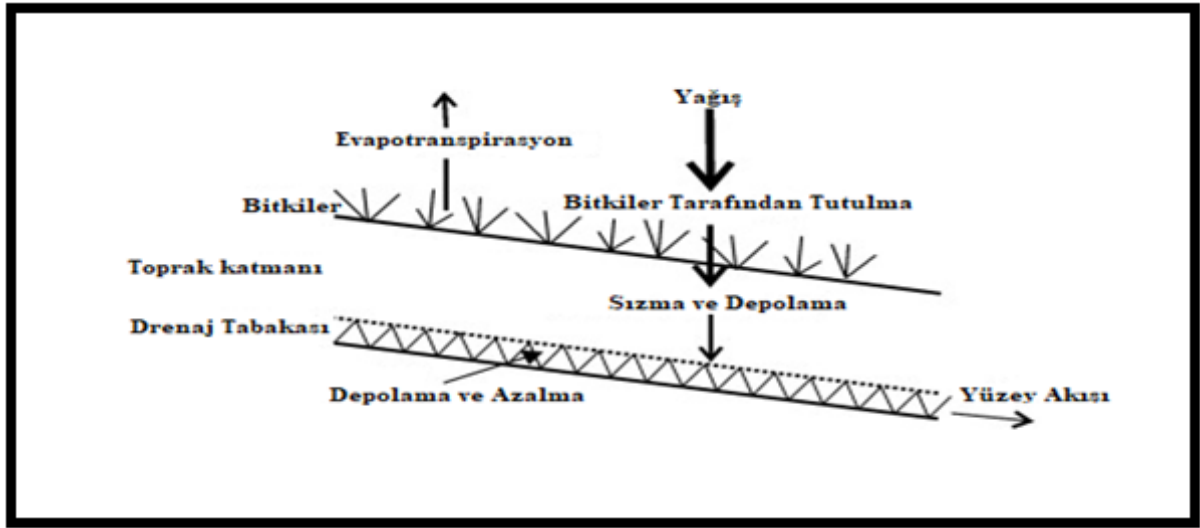
Geleneksel kentsel çatılardan akan yağmur suları, kanalizasyon kaynaklı sel riskini ve su kalitesi sorunlarını beraberinde getirmektedir. Stovin et al. (2012)'e göre geleneksel çatılar gelişmiş şehirlerin çoğunda kentteki toplam geçirimsiz yüzey alanının %40-50 sini oluşturabilmektedir. Kentlerdeki yapılaşma yoğunluğu dikkate alındığında bu oran çok büyük bir miktarda geçirimsiz alana tekabül etmekte ve yüksek miktarlarda yüzey akışlarının oluşmasına neden olmaktadır. Yeşil çatılar ise bu geçirimsiz alanların bitkilendirilerek geçirimli yüzeyler haline gelmesine olanak tanımaktadır.

VanWoert et al. (2005)' e göre; yeşil çatılarla bir bitki örtüsü oluşturmak yağmur suyu yüzey akışının azaltılmasına katkıda bulunabileceği gibi aynı zamanda kaybolan yeşil alanların geri kazanılmasına da imkân sağlamaktadır. Aşağıdaki şekil (**şekil 14.**) geleneksel bir çatı ile yeşil bir çatının yüzey akış grafiğini göstermektedir.



Şekil 14. Geleneksel bir çatı ile yeşil bir çatının yüzey akış grafiği. Stovin et al. (2012)'den uyarlanmıştır.

Yeşil çatılar üzerine yapılan birçok çalışmada yeşil çatıların kentsel alanlarda meydana gelen akış miktarlarının azaltılması ve tepe akışlarının geciktirmesi konusunda etkin bir çözüm olduğu sonucuna varılmıştır (Hunt et al., 2008; Stovin et al., 2012; Cipolla et al., 2016; Soulis et al., 2017; Paithankar and Taji, 2020). Akış miktarlarının azaltılması ve tepe akışlarının geciktirilmesi bir takım hidrolojik süreçler sonucunda meydana gelmektedir. Aşağıdaki şekilde (**şekil 15.**) bir fırtına sırasında yeşil çatılarda meydana gelen temel hidrolojik süreçler gösterilmektedir.



Şekil 15. Yeşil Çatı Hidrolojik Süreçleri Stovin et al. (2012)'den uyarlanmıştır.

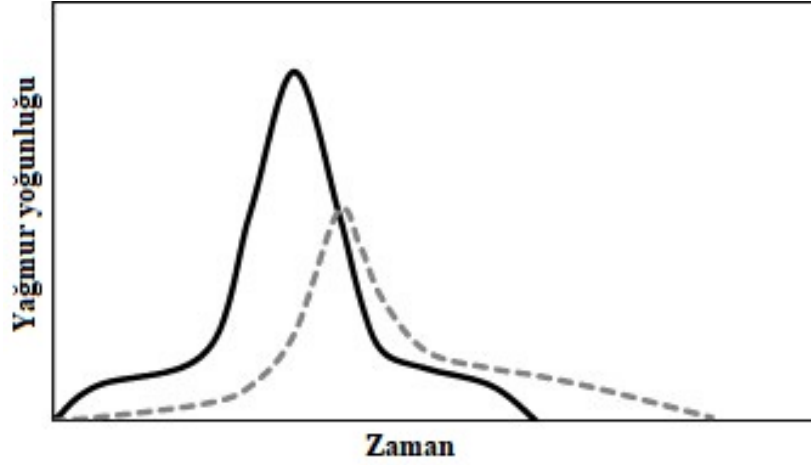
Hidrolojik süreç aşamaları sırasıyla; bitkiler tarafından yağmurun tutulması, suyun alt katmana doğru sızdırılması, bir kısmının bitkiler tarafından depolanması ve fazla suyun drenaj katmanlarında depolanması şeklindedir.

Yeşil çatılar ayrıca; yağmur sularından kaynaklanan yüzey akışlarını tutup şehirlerdeki kanalizasyon sistemleri üzerindeki baskıyı azaltarak hem su arıtım maliyetlerini hem de olası bir sel riski gibi çevresel felaketleri önlemektedir(Claus and Rousseau, 2012). Yapılan saha çalışmalarında yeşil çatıların yüksek oranda su tutma kapasitesine sahip olduğu tespit edilmiştir. Örneğin;

İngiltere Sheffield'da yapılan bir saha çalışmasında, 29 aylık yağış ve yüzey akışına ilişkin verilere göre kapsamlı bir yeşil çatının yıllık su tutma kapasitesi %50,2 olarak tespit edilmiştir(Stovin et al., 2012). Yeni Zelanda'nın Auckland bölgesinde yapılan benzer bir saha çalışmasında ise; 235 m² alana sahip 50-70mm yüzey derinliğindeki geniş bir yeşil çatının 12 aylık verilere göre toplam su tutma kapasitesi %66 olarak tespit edilmiştir(Voyde et al., 2010)

Paithankar and Taji (2020)'nin Hindistan'ın Maharashtra eyaletinde yer alan bir kampüs içerisinde 3691 m² ve 756 m² alana sahip iki farklı binada yaptığı ve yeşil çatıların hidrolojik performansının değerlendirildiği bir simülasyon çalışmasında 3691 m² alana sahip yeşil çatının toplam tepe akışını 7,13 (l/s)'den 6,36 (l/s)'ye ve 756 m² alana sahip diğer yeşil çatının ise tepe akışını 1,45 (l/s)'ye düşürdüğü belirlenmiştir.

Yeşil çatılarda tutulan su miktarının yağış yoğunluğuyla temel bir ilişkisi bulunmaktadır. Genel itibariyle belli bir yağış yoğunluğunun altında kalan yağışların tamamı yeşil çatılarda tutulurken belli bir yağış yoğunluğunun üzerinde kalan yağışların ise bir kısmı yeşil çatılarda tutulup diğer kısmı yüzeyel akışa devam etmektedir. Aşağıdaki şekil (**şekil 16.**) yeşil bir çatıda zamanla meydana gelen yüzey akış grafiğini göstermektedir.



Şekil 16. Bir yağmur sırasında meydana gelen yüzey akış grafiği. Siyah çizgi yağışı, kesikli çizgi ise yüzey akışını ifade etmektedir (Berndtsson, 2010)' den uyarlanmıştır.

Bu konuda yapılan saha çalışmaları da bunu kanıtlar niteliktedir. Örneğin; Simmons et al. (2008)'in yaptığı bir saha çalışmasında 10 mm' den düşük yağış miktarlarının tamamının yeşil çatılar tarafından tutulduğu tespit edilmiştir. Daha yoğun yağmur olayları sırasında ise tabaka derinliğine ve drenaj tipine bağlı olarak farklı sonuçlar elde etmiştir. Örneğin; 12mm'lik bir yağış sırasında %26-88 arasında bir tutulma sağlanırken 28mm ve 49mm'lik bir yağış sırasında ise sırasıyla %8-43, %13-44 oranında bir tutulmanın sağlandığını tespit etmiştir.

Kuzey Karolina' da yapılan başka bir çalışmaya göre ise; 70 m² alana sahip düz bir çatının yarısı yeşil çatı olarak planlanmış ve diğer yarısı kontrol amaçla boş bırakılmıştır. Yeşil çatının yarısı 5cm toprak katmanı diğer yarısı ise 10cm toprak katmanıyla döşenerek üzeri sedum türleriyle bitkilendirilmiştir. Yapılan ölçümlerde 13mm den düşük olan yağışların tamamı yeşil çatılar tarafından tutularak herhangi bir yüzey akışı oluşturmadığı tespit edilmiştir(Moran et al., 2003)

Yağış yoğunluğunun yanı sıra yeşil çatılarla ilgili yapılan çalışmalarda su tutma kapasitesinin çeşitli araştırmacılar tarafından bir takım parametrelere bağlı olduğu belirlenmiştir. Örneğin; VanWoert et al. (2005) alt tabaka derinliğine, Getter et al. (2007) ve çatı eğimine, DiGiovanni et al. (2010) ve Voyde et al. (2010) evapotranspirasyon oranına, Berndtsson (2010) çatı yaşına ve yağışın boyutuna ve Voyde et al. (2010) ise kurak gün sayısına bağlı olduğunu tespit etmiştir. Yapılan çalışmalarda alt tabaka derinliği arttıkça, eğim azaldıkça, evapotranspirasyon oranı arttıkça, yağışın boyutu azaldıkça ve kurak gün sayısı arttıkça yeşil çatının su tutma kapasitesi arttığı sonucu ortaya çıkmıştır. Araştırma sonuçları; geniş bir yeşil çatının alt tabaka derinliğine bağlı olarak gelen yağmur suyunu %60 ila %100 arasında tutabildiğini göstermektedir(Monterusso et al., 2002). Örneğin;

VanWoert et al. (2005)'in farklı eğim (%2 ve %6,5) ve derinliklere (2,5, 4 ve 6cm) sahip ve aynı çevresel koşullar altında tutulan 12 farklı bitkilendirilmiş kapsamlı yeşil çatının yağmur suyu tutma kapasitesini belirlemek üzere hazırladığı %2 eğimli 2,5 ve 4cm derinliğe sahip 6 platform ile %6,5 eğimli 4cm ve 6cm derinlikteki 6 platformda yapmış olduğu deneylerde, 4cm ortam derinliğine sahip %2 eğimli birleşik bir platformun diğer platformlarla arasında fark minimum olmasına rağmen en yüksek su tutma oranına (%87) sahip olduğunu belirlemiş ve yeşil çatılarda eğim azaldıkça ve ortam derinliği arttıkça toplam akış miktarının azaldığı tespit edilmiştir.

Eğimin yeşil çatılarda su tutma kapasitesi üzerinde yapılan başka bir çalışmaya göre ise; 60mm toprak katmanına sahip %2, %7, %15, %25 eğimli yamaçlarda kurulan 5,43 m²lik yeşil çatı platformlarında yapılan ölçümler neticesinde ortalama su tutma kapasitesinin en az

%76,4 ile %25 eğimli alana kurulan yeşil çatıda, en fazla ise %85,6 ile %2 eğimli alanda kurulan yeşil çatıda olduğu tespit edilmiştir(Getter et al., 2007).

Voyde et al. (2010), yeşil çatılarda kullanılan bitkilerin yağmur suyu yönetiminde önemli bir rol üstlendiğini belirterek bitkilerin terleme yoluyla toplam evapotranspirasyonun %20-48'ine katkıda bulunduğunu belirtmiştir. Voyde'nin yapmış olduğu başka bir çalışmada ise; kurak bir dönemden sonra yağan yağmurun yeşil çatılarda tutulma oranı kurak gün sayısı arttığında artış göstermektedir(Voyde et al., 2010).

İstanbul Bahçeköy-Sarıyer'de yapılan bir saha çalışmasında 10,2 m² lik iki alandan birine %1 eğime sahip ekstensif bir yeşil çatı sistemi diğerine ise sadece su yalıtım örtüsünden oluşan referans bir çatı sistemi kurulmuştur. Yeşil çatı sisteminde bitki örtüsü olarak dünyada en çok tercih edilen ve ülkemiz iklim koşullarına uygun sedum türleri tercih edilmiştir. 27,4mm'lik bir yağış sırasında referans olarak oluşturulan çatı sisteminin derhal yüzeysel akışa neden olduğu ancak yeşil çatı sisteminin %32,8 oranında suyu tutarak yağmur sularının yüzeysel akışa geçmesini geciktirmiştir. Yoğun bir yağış sırasında yapılan ölçümlerde ise yeşil çatı sisteminin yüzeysel akışı 1 saat geciktirdiği ve toplamda yüzeysel akışı %25 oranında düşürdüğü tespit edilmiştir. Kurak bir dönemden sonra yağan bir yağmur sırasında yapılan ölçümlerde ise referans olarak oluşturulan çatı sistemi suyu yağışla birlikte tahliye etmiş ancak yeşil çatı sistemi suyu 14 saat boyunca tutarak yüzeysel akışı %67 oranında düşürdüğü tespit edilmiştir(Ekşi ve Uzun, 2016).

Yeşil çatıların hidrolojik performansı belirlenirken ayrıca; uygulandıkları bölgenin özellikleri, çevresel koşulları, bitki örtüsünün özellikleri ve katmanlarının fiziksel özellikleri gibi parametrelerin de dikkate alınması gerektiği belirtilmiştir(Cipolla et al., 2016).

Yeşil çatılar yağmur suyuyla ilgili sağladığı faydaların yanında ayrıca uygulandığı binaya izolasyon sağlayarak enerji tasarrufu da sağlamaktadır. Örneğin;

Eumorfopoulou and Aravantinos (1998)' e göre yeşil çatılar, güneş radyasyonunu engelleyerek yaz ile kış arasındaki günlük sıcaklık değişimlerini azaltır ve bir binanın ısı performansının iyileştirilmesinde olumlu katkıda bulunur. Yapılan çalışmalar ağaç gölgelerinin binaların soğutma için gerekli olan yıllık enerji kullanımını %10-50 arasında azalttığını göstermektedir (Simpson and McPherson, 1996). Başka bir çalışmaya göre ise; yeşil çatı uygulamasının yer aldığı bir binanın iç ortamı, dış ortam sıcaklığının 25 °C ile 30 °C arasında olan bir yerde en az 3-4 °C daha düşük olduğu belirlenmiştir(Peck et al., 1999).

Yeşil Çatıların Sağladığı Faydalar

Yeşil çatıların kentsel alanlarda akış hacimlerini azaltılması ve kentsel su yönetiminin yanında toplum için birçok faydası daha bulunmaktadır. Bu faydalar; Liesecke and Borgwardt (1997); Eumorfopoulou and Aravantinos (1998); Thomas (1998); Peck et al. (1999); Grant et al. (2003); Brenneisen (2006); Renterghem and Botteldooren (2009) tarafından şu şekilde sıralanmıştır.

- Havadaki partikülleri tutarak hava kirliliğini önler ve bu sayede hava kalitesini artırır,
- Yağmur sularını tutarak kanalizasyonlar üzerindeki yükü hafifletir ve tekrar kullanımını sağlar,
- Kentsel ısı adası etkilerini azaltır,
- Flora ve Fauna için yaşam alanı oluşturur,
- Biyoçeşitliliği artırır,
- Yapıların estetiğini artırır,
- Trafik gürültüsünü azaltır,
- Bir binanın mülk değerini artırır.

Geçirgen Kaplamalı Yüzeyler

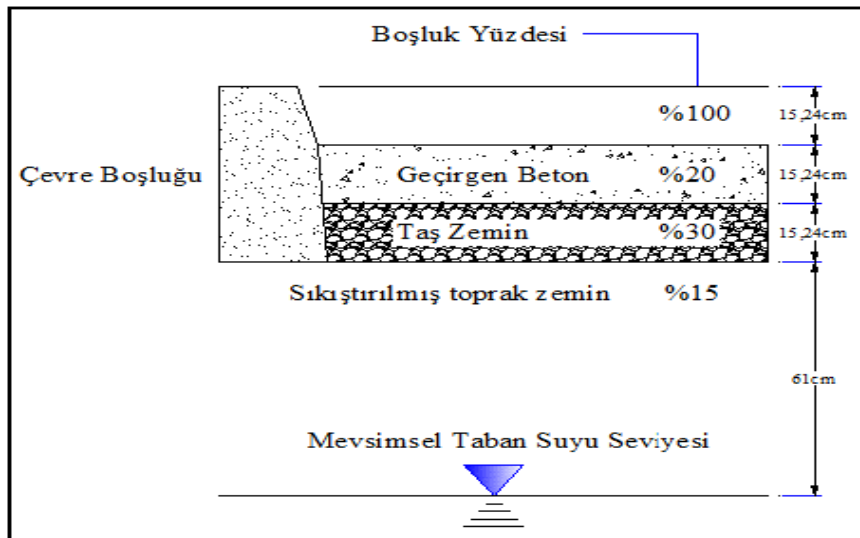
Geçirgen kaplamalar, yağmur sularını düştüğü andan itibaren alt tabakalara geçiren ve bu sayede akış hacmini azaltarak yüzey akışlarının oluşmasını engelleyen sürdürülebilir kentsel drenaj(SKD) sistemleridir. Geçirgen beton, gözenekli asfalt ve kilitli parke taşlarından oluşmaktadır(Fernández et al., 2008). Sürdürülebilir drenaj sistemleri(SuDS) olarak geçirgen kaplamaların uygulanması, kaynak kontrolü, önleme, alıkoyma, sızma ve biyolojik bozunma tekniklerini kapsamaktadır(Ballard et al., 2007). Bu sistemle yağmur sonucu yeryüzüne inen su, filtre görevi gören geçirgen yüzeyden rezerv görevi gören bir alt tabakaya geçerek akış hacminde azalma meydana getirmektedir. Depolanan su başka bir yere taşınabilmekte veya arazinin yapısına göre alt tabakalara sızabilmektedir. Fazla su ise drenaj kanalları vasıtasıyla kontrol altına alınmaktadır(Pratt et al., 2002).

Öztürk (2017)'e göre geçirgen beton ve asfalt sistemlerinin kullanıldığı şehirlerde yıllık yağmur suyu miktarı %50-%100 oranında yer altına sızmaktadır.

Gözenekli kaplamaların birçok kullanım avantajının yanında bazı dezavantajları da bulunmaktadır. En büyük dezavantajlarından birisi zamanla gözeneklerin tıkanarak geçirgenlik özelliklerinin azalmasıdır. Araştırmacılar bu tür sistemlere sürekli olarak bakım yapılması gerektiğini belirtmekte ve basınçlı su jeti veya vakumlu süpürgelerle bu tür tıkanıklıkların önlenebileceğini belirtmektedir(Davies et al., 2002; Pratt et al., 2002). Kullanım alanı olarak (USEPA, 1999) gözenekli kaplamaların yalnızca düşük kil içeriğine sahip eğimi %30'dan daha az olan topraklarda kullanılması gerektiğini belirtmektedir. Ayrıca içme su kaynaklarına uzak, geçirgenliği yüksek olan topraklarda ve trafik yoğunluğu düşük olan alanlarda kullanılması gerektiğini bildirmiştir.

Geçirgen betonlar

Geçirgen beton; geleneksel betonlardan farklı olarak kırma taş gibi tamamen iri yapılı agregaların kullanıldığı gözenekli yapıya sahip, su (geçirgenlik oranı 120-320 L/m²/dakika arasında) ve hava geçirgenliği yüksek, beton kaplama ve yağmur suyu depolaması için çakıl bir tabakadan oluşan iki katmanlı yağmur suyu yönetim sistemi olarak adlandırılır(Anonim, 2018a; Morrison, 2019). Yağmur suları, gözenekli yapısı sayesinde yere düştüğü andan itibaren açık havaya maruz kalmadan yer altına doğru süzüldüğünden ve buharlaşma miktarı daha az olduğundan dolayı geçirgen betonlar, toprak alanlara göre daha fazla suyun yer altına emilimini gerçekleştirmektedir(Anonim, 2018a). Aşağıdaki şekilde (şekil 17.)geçirgen bir betonun enine kesiti yer almaktadır.



Şekil 17. Geçirgen beton kesiti(Öztürk, 2017)'den uyarlanmıştır.

Geçirgen beton kaplamalar geçirgenliği yüksek olmasına rağmen yüksek basınçlara karşı dayanıklılığı düşük olduğundan ağır araçların geçtiği alanlar dışında geçirimsiz alanların (sokak, otopark, kaldırım, yürüyüş yolları vb.) fazla olduğu alanlarda kullanılabilir. Diğer yeşil altyapı sistemlerine göre daha az maliyetli olması ve çevreye sağladığı faydalar göz önünde bulundurulduğunda kentsel alanlarda yağmur suyu yönetiminde etkin bir şekilde kullanılabilmektedir(Anonim, 2018a). (**Tablo 3.**) çeşitli uygulama alanlarına göre geçirgen beton kaplamaların temel kalınlıklarını göstermektedir.

Tablo 3. Kullanım alanlarına göre geçirimli beton kaplama ve temel kalınlıkları(Anonim, 2018a).

Uygulama Alanları	Kaplama Kalınlıkları (cm)	Alt Temel Kalınlığı (cm)
Kaldırım ve bisiklet yolları	12,5 - 15 cm	0 – 15 cm
Trafik yoğunluğu düşük olan otopark vb. alanlar	15 – 20 cm	15 – 30 cm
Trafik yoğunluğu orta seviye olan otopark vb. alanlar	20 – 25 cm	20 – 40 cm
Yoğun trafiğe maruz kalan alanlar.	Bu alanlarda geçirimli beton uygulanması önerilmez!	

Geçirgen betonların çevreye sağladığı faydalar

Geçirgen betonların yağmur suyu kaynaklı sağladığı faydalarının yanında çevreye sağladığı ek faydaları da yer almaktadır. Bu faydalar; Tennis et al. (2004); Scholz and Uzomah (2013); Anonim (2018a) tarafından şu şekilde sıralanmıştır.

- Gözenekli yapısı sayesinde yüzey akışlarının oluşmasını engeller,
- Yağmur suyu ile süzülen kirletici maddelerin yer altı sularına karışmasını engeller,
- Yüzey akışlarının neden olduğu erozyonu önler,
- Kentsel ısı adası etkisini azaltır,
- Yağmur sularının depolanmasını sağlayarak sulama ihtiyaçlarında kullanılmasını sağlayabilir,
- Su ve hava geçirgenliği yüksek olduğundan daha fazla ağaçlı alana olanak tanıyarak kombineli olarak kullanıldığında uygun ağaç türleriyle birlikte geçirgenlik etkinliği artırılabilir,
- Açık renkli olması sebebiyle aydınlatma maliyetlerini azaltabilir ve yerel malzemelerin kullanılmasına imkân sağlar.

Geçirgen betonlar üzerine yapılan çalışmalar

Geçirgen beton kaplamalar yağmur suyunun olumsuz etkilerinin önlenmesi amacıyla uzun süredir kullanılmaktadır. Genellikle ilk örnekleri Amerika kökenli olan bu uygulamalar geçirgen betonların yüzey akışlarını önlemedeki etkinliğini ortaya çıkarmaktadır. Örneğin;

Geçirgen betonların sokak, kaldırım, araç yolları ve caddeler gibi tüm geçirimsiz yüzeylerde kullanıldığı ilk proje Stanford Place projesidir. Proje Washington Eyaleti'nin Sultan şehrinde 2006 yılında 20 parsellik bir konut alanından yağmur suyu birikintilerinin ve yüzey akışlarının tamamen ortadan kaldırmak için planlanmış ve geçirgen betonların en etkili

ve en ekonomik yağmur suyu yönetim sistemi olduğu kanıtlanmıştır(Anonim, 2007). Aşağıdaki şekilde (**şekil 18.**) bu konut alanından görüntülere yer verilmiştir.



Şekil 18. Geçirgen kaldırım ve yollar(PCI, 2019).

Son zamanlarda yapılan çalışmalar ise; genellikle farklı türde agrega kullanımının geçirgen betonların suyu geçirme potansiyeli üzerindeki etkisi ve yağmur suyu yüzey akışlarının önlenmesini ölçmek üzere yoğunlaşmaktadır. Örneğin;

Atık cam kırıntıları ve geri dönüştürülmüş beton agregalar kullanılarak oluşturulan geçirgen bir betonun hidrolojik geçirgenliğinin incelendiği deneysel bir çalışmada; atık cam parçacıkların pürüzsüz yüzeylerinin su geçirgenliği üzerinde olumlu bir etki meydana getirdiği, %50 ince agregalı(2,36-5mm) cam parçacıkları ve %50 kaba beton agregalarından(5-10mm) oluşturulan geçirgen bir betonun yaya kaldırımları için belirlenen standartları karşıladığı ve geçirgenlik oranının normal standartların(0,1mm/s) 12 katı(1,2mm/sn)olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca yapılan çalışmada iri agregalı betonların ince agregalı betonlara kıyasla daha fazla geçirgenliğe sahip olduğu tamamen ince agregalardan oluşan bir geçirgen betonun ince agregalarının %50 si cam kırıntıları ile değiştirildiğinde geçirgenliğin değişmediği ancak %100 oranında ince agregaların cam kırıntıları ile değiştirildiğinde geçirgenliğin 0,1mm/sn den 0,3mm/sn yükseldiği belirlenmiştir(Lu et al., 2019).

İstanbul Üniversitesi Avcılar kampüsünde, yeşil çatı, sızdırma hendeği, geçirgen kaldırım ve yağmur bahçesi gibi dört farklı DEG uygulamalarının yüzeysel akışa etkisinin belirlendiği SWMM modellenli bir simülasyon çalışmasında; toplam alanın 45.780 m² olduğu 11 yapının üzerine 25cm yüzey derinliğine sahip yeşil çatı sistemleri, toplam alanın 6250 m² olduğu belli arazilere 50cm yüzey derinliği ve 50cm bitki örtüsü yüksekliğine sahip sızdırma hendeği, toplam alanın 3760 m² olduğu bir otoparka 25cm yüzey derinliğine ve 30cm bitki örtüsü yüksekliğine sahip yağmur bahçesi ve son olarak kampüste karayolu olarak kullanılan tüm alanlara 10cm kalınlığında ve 100mm su geçirgenliğine sahip geçirgen kaldırım uygulaması yapılmıştır. Elde edilen veriler neticesinde, yapılan uygulamaların yağmur sonucu meydana gelebilecek toplam yüzeysel akışı %12 oranında azalttığı tespit edilmiştir. Ayrıca yapılan uygulamalar tek başına ele alındığında 4060 m²lik geçirimsiz bir alanın %27,1'lik kısmına uygulanan yeşil çatı sisteminin maksimum akışı %26 oranında, 9260 m²lik bir arazinin %7 oranında bir kısmına uygulanan sızma hendeğinin maksimum akışı %7,2 oranında, 5650 m² lik bir karayolunun tamamına uygulanan geçirgen kaldırımın maksimum akışı %100 oranında ve son olarak 20830 m²lik bir alanın %18,1'lik kısmına uygulanan yağmur bahçesinin maksimum akışı %19 oranında azalttığı tespit edilmiştir(Gülbaz vd., 2018). Yapılan çalışmalarda elde edilen netice; yağmur suyu yüzeysel akış yönetiminde en etkili uygulamanın geçirgen kaldırımlar olduğu düşen yağmur sularının kaynağında etkili bir

biçimde önlendiği ve yüzeysel akışa geçmesine izin vermediğini söylemek yanlış olmayacaktır.

Yunanistan’da killi topraklar üzerinde yapılan bir çalışmaya göre; killi toprağa sahip bir otopark alanı (187 m²) gözenekli kaplama ile kaplanarak tamamen geçirimsiz olan asfalt bir yüzeyle kaplı başka bir otopark alanıyla (64 m²) kıyaslanmıştır. Yapılan çalışmaya göre yağış miktarı 2cm den daha az olan 9 farklı küçük fırtına sırasında gözenekli kaplamaların geleneksel otopark alanına göre %93 daha az yüzey akışı meydana getirdiği tespit edilmiş ve gözenekli kaplamaların yüksek killi topraklarda da etkili bir şekilde yüzey akışlarını önlediği belirlenmiştir(Dreelin et al., 2006). ABD’de kumlu topraklar üzerine yapılan benzer bir çalışmada ise geleneksel bir otopark alanıyla gözenekli kaldırımla kaplı farklı bir otopark alanı kıyaslanmış ve gözenekli kaldırım ile kaplı otopark alanının yüzey akışlarını %40-45 oranında azalttığı tespit edilmiştir(Rushton, 2001).

Geçirgen asfalt yüzeyler

Geçirgen asfaltlar yağmur sularının yer altına doğru nüfuz etmesini sağlayan ve bu sayede yüzey akışlarını engelleyerek yüzeydeki su hacmini azaltan aynı zamanda yağmur sularıyla beraber akan kirletici maddeleri filtreleyen %16-25 boşluk oranına sahip geçirgen bir yüzey tabakasıdır(Schaus, 2007; Hein et al., 2013; Ahmad et al., 2017). Gözenekli asfalt kaplamalar genellikle otopark alanları ve trafik yoğunluğu düşük alanlar için önerilmektedir(Roseen et al., 2012). Bunun yanı sıra yürüyüş yolları, kaldırımlar, düşük yoğunluklu taşıt yolları, bisiklet yolları, sokaklar gibi geçirimsiz alanların fazla olduğu alanlarda da kullanılmaktadır(Hein et al., 2013).

Geçirgen asfaltlar geleneksel geçirimsiz asfaltlarla kıyaslandığında, gözenekli yapısı sayesinde yüzeydeki suyu infiltre ederek yer altı sularının beslenmesine yardımcı olmakta ve bu sayede yer altı sularının aşırı kullanılması sonucu ortaya çıkabilecek arazi çökmeleri gibi çevresel sorunları engellemektedir. Ayrıca havadaki nemi düzenleyerek hem kentsel ısı adası etkisini azaltmakta hem de bitki büyümesi için gerekli olan nemi sağlayarak dolaylı yoldan bitki büyümesine yardımcı olmaktadır(W. Jiang et al., 2015). Aşağıdaki şekil (şekil 19.) bir yağış olayı sonrasında geçirgen asfalt yüzeylerle geçirimsiz asfalt yüzeyler arasındaki farkı göstermektedir.



Şekil 19. Bir yağış sonrası geçirgen asfalt ile geçirimsiz asfaltın görüntüsü (Lombardo, 2020).

Geçirgen asfalt kaplamalar gözenekli yapıya sahip geçirgen bir zemin üzerine inşa edilen üç bileşenden oluşmaktadır. Bunlar;

1. Yüzey katmanı
2. Filtre katmanı
3. Rezervuar katmanı

Yüzey katmanı genellikle 50-100mm kalınlığında olup özel olarak hazırlanmış gözenekli asfalt karışımından oluşmaktadır. Filtre tabakası 50-75mm kalınlığa sahip kırılmış agregalardan oluşmakta ve yüzey sularıyla gelen kirletici maddeleri filtrelenmesinde görev yapmaktadır. Rezervuar katmanı ise 25-90cm derinlikte olmakla birlikte 50-75mm tek boyutlu agregalardan oluşmakta ve absorbe edilen suların depolanmasını sağlamaktadır(APAO, 2013). Aşağıdaki tablo (**Tablo 4.**) asfalt yüzey tabakasının bir takım temel özelliklerini göstermektedir.

Tablo 4. Asfalt yüzey tabakasının temel özellikleri(APAO, 2013)

Hava Boşlukları	>%16
Boşaltma Alanı	≤% 0,3
Asfalt İçeriği	Karışımın Minimum %5,75'i
Maksimum Agregat Boyutu	12,5mm

Geçirgen asfaltlar üzerine yapılan çalışmalar

Geçirgen asfaltların hidrolojik performanslarının değerlendirildiği birçok çalışmada geçirgen asfaltların hacim ve tepe akışlarını önemli ölçüde azalttığı ayrıca yüzey akışlarıyla birlikte gelen kirletici maddeleri önleyerek su kalitesini iyileştirdiği gözlemlenmiştir.

ABD'nin New Hampshire eyaletinde 465 m² bir alana sahip bir otoparkta 18 aylık bir dönem içerisinde yapılan ölçümler sonucunda geçirgen asfaltların tepe akışlarını %90 oranında azalttığı toplam askıda kalan maddeleri ise %95 oranında azalttığı tespit edilmiştir(Roseen et al., 2012). Fransa'nın Reze şehrinde yapılan başka bir çalışmaya göre ise geçirgen asfaltların %97 oranında hacim azalması sağladığı belirlenmiştir(Legret and Colandini, 1999).

Geçirgen asfaltlardan yararlanmanın bir diğer yolu ise bünyesinde depolanan suların içilemez su ihtiyaçlarında kullanılmasıdır. Özellikle küresel iklim değişikliğinin yaşandığı, su ihtiyaçlarımızın arttığı ve doğal kaynakların azaldığı günümüzde sağladığı bu avantaj önemli ölçüde su tasarrufu sağlanmasına yardımcı olacaktır. Bu konuda yapılan çalışmalar geçirgen asfaltların kayda değer bir oranda su tasarrufu sağladığını göstermektedir. Örneğin;

Geçirgen asfaltlarda toplanan yağmur sularının binalardaki içilemez su ihtiyaçlarında kullanılmasının belirlendiği bir çalışmada; gözenekli asfalt ile kaplı 5200 m² alana sahip bir otoparktan yıllık ortalama 1720mm yağış altında biriken yağmur suları içilemez su kullanım ihtiyaçlarını (aylık ortalama 196 m³) %53-54 oranında azalttığı belirlenmiştir(Hammes et al., 2018).

Yağmur Hendekleri

Yağmur hendekleri, yüzey akışları sonucu meydana gelen yağmur sularını depolamak, alıcı su kaynaklarına iletmek, geçirgen olan alanlarda toprağa sızmasına izin vermek ve beraberinde gelen kirletici maddeleri filtrelemek üzere tasarlanmış üzeri çim veya otsu bitki örtüsüyle kaplı sığ ve geniş hendeklerdir. Geleneksel drenaj sistemlerine alternatif olarak tasarlanmış olup sürdürülebilir kentsel drenaj sistemleri(SKDS) olarak da

bilinmektedir(Ballard et al., 2007; Anonim, 2012; EuropeanCommission, 2013). Hendeğe gelen yağmur suları burada bulunan bitkiler ve bitkisel materyaller tarafından filtrelenirken fazla suyun bir kısmı alttaki toprağa sızmakta bir kısmı ise evapotranspirasyon yoluyla buharlaşmaktadır. Suyun toprağa sızabilmesi için ise toprağın yüksek geçirgenliğe sahip olması gerekmektedir. Yüksek geçirgenliğe sahip topraklar daha fazla suyu drene edeceğinden sistemin etkinliğini artırmaktadır ancak bazı araştırmacılar düşük geçirgenliğe sahip topraklarda(geçirgenlik oranı %35 den düşük) akış hacimlerinin azaltılması için toprağın alt kısmına delikli bir drenaj borusu döşenerek hendeklerin etkinliğin artırılabilceğini belirtmişlerdir(Abida and Sabourin, 2006).

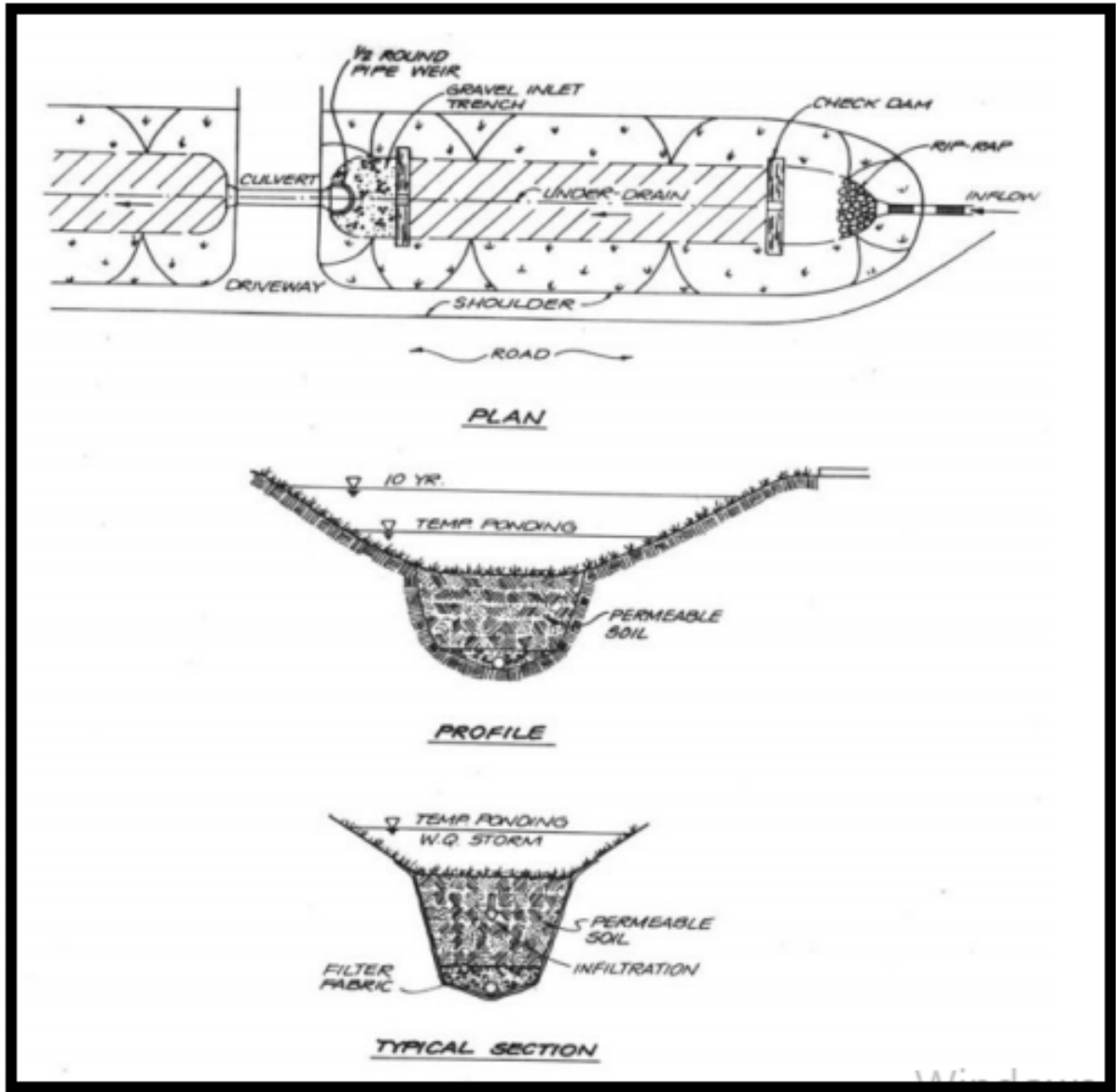
Geleneksel olarak tasarlanan yağmur hendekleri; Standart nakil hendekleri, kuru yağmur hendekleri ve ıslak yağmur hendekleri olmak üzere üç kısımdan oluşmaktadır(Ballard et al., 2007; Revitt et al., 2017).

Standart nakil hendekleri

Standart nakil hendekleri, yağmur sularının bir drenaj kanalı vasıtasıyla alıcı sulara iletilmesini sağlayan ve suyun geçirgen topraklara sızmasını kolaylaştıran geniş, sığ bitki örtüsüne sahip borulu kanallardır. Özellikle bitkisel filtrasyon için tasarlanmışlardır ve yoğun olmayan küçük fırtına olaylarını yönetmek için kullanılırlar. Bazı noktalarında kirli maddelerin süzülmesini sağlamak için ekstra astar malzeme gerektirebilmektedir(Ballard et al., 2007; Revitt et al., 2017).

Kuru yağmur hendekleri

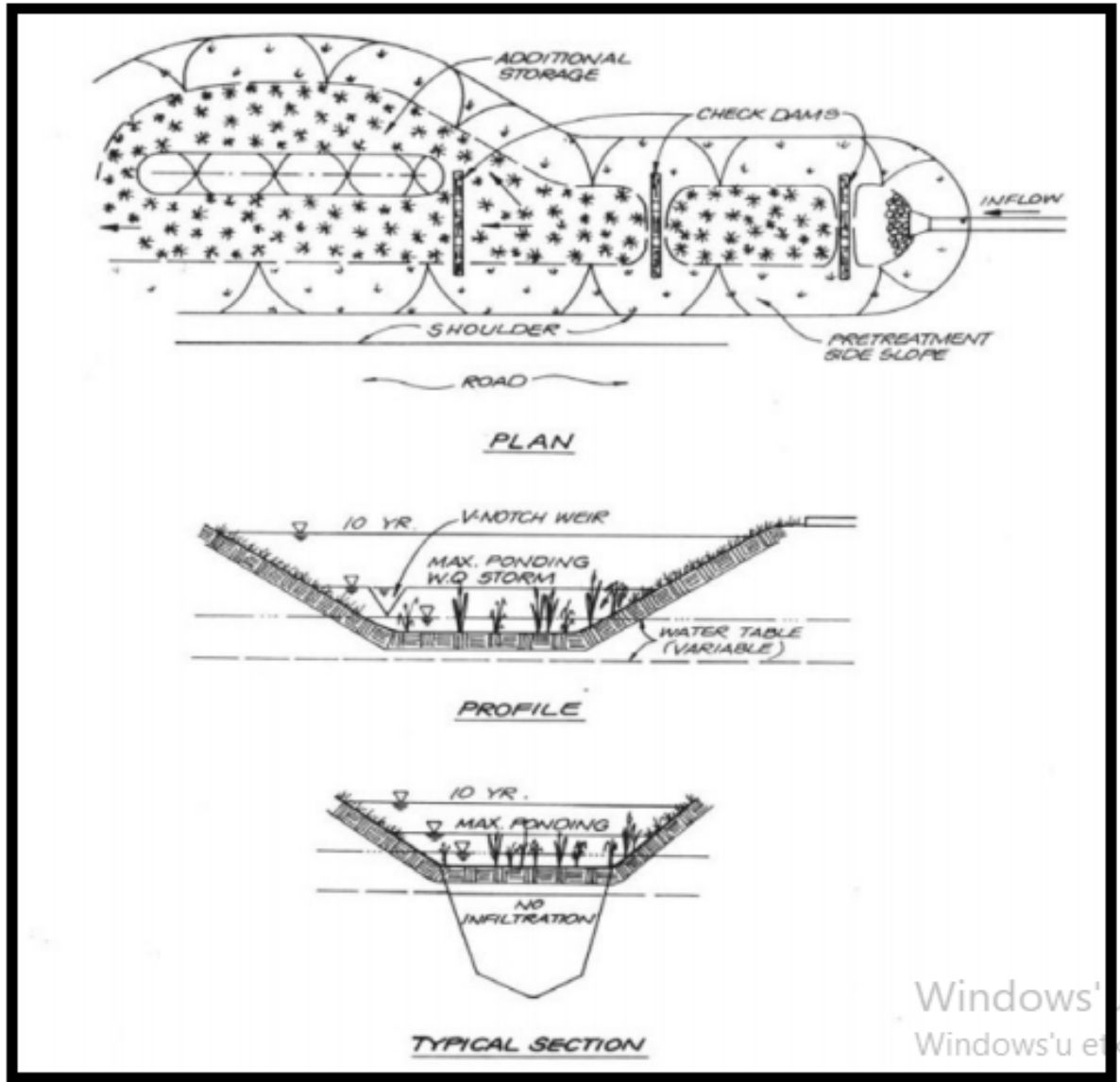
Kuru yağmur hendekleri, toprak tabakasının alt kısmında ekstra drenaj sistemlerinin yer aldığı taban suyu seviyesi düşük, suya doymun olmayan alanlarda tasarlanan ve sızma çukuruna sahip bitkisel hendeklerdir. Yağmur suları geçirimli olan toprak tabakası ve ek drenaj sistemleri tarafından emildiğinden dolayı hendek içerisinde su birikmez ve bu da hendeğin sürekli olarak kuru kalmasını sağlar(Ballard et al., 2007; Uğur ve Akyüz, 2017). Kuru yağmur hendekleri bünyesinde biriken suyun yaklaşık 1 gün içerisinde tahliye edilebileceği şekilde tasarlanmışlardır. Sistem sürekli olarak kuru kaldığından genellikle konut alanlarında tercih edilmektedir. Su kalitesi bakımından filtreleme ortamının sadece bitkisel materyallerden oluşması ve kirletici maddelerin daha sınırlı bir şekilde önlenmesi dışında bioretention sistemlerine benzemektedir(Anonim, 2009). Aşağıdaki şekilde (**şekil 20.**) kuru bir yağmur hendeğinin plan ve kesit görüntüsü yer almaktadır.



Şekil 20. Kuru yağmur hendeği plan ve kesit görüntüleri Claytor and Schueler (1996)'dan alınmıştır.

Islak yağmur hendekleri

Islak yağmur hendekleri, yağmur sularının alt tabakalara süzülmesini engellemek üzere geçirimsiz ve taban suyu seviyesi yüksek alanlarda inşa edilen ve aynı zamanda bataklık koşullarını barındıran ve üzerinde herhangi bir filtre yatağı olmayan bitkisel hendeklerdir. Bu sistemler doğrusal bir sığ sulak alan sistemi olduklarından genellikle sulak alan kanal sistemi olarak adlandırılırlar. Sisten sürekli olarak ıslak kaldığından dolayı özellikle sivrisinek gibi haşerelerin bu ortamlarda çoğalmasını teşvik etmektedirler bu nedenle yapılaşmanın yoğun olduğu alanlarda kullanılması önerilmemektedir. Aynı zamanda ıslak yağmur hendeklerinde yağmur suları yer altı sularına karışmadığından dolayı alıcı su kaynaklarının kirlenmesi üzerinde de bir etkisi bulunmamaktadır (Anonim, 2009; Revitt et al., 2017; Uğur ve Akyüz, 2017). Aşağıdaki şekilde (şekil 21.) ıslak bir yağmur hendeğinin plan ve kesit görüntüsü yer almaktadır.



Şekil 21. Islak yağmur hendeği plan ve kesitleri. Claytor and Schueler (1996)'den alınmıştır.

Yağmur suyu yönetimi bakımından yağmur hendeklerinin işlevleri;

- Geleneksel boru sistemlerine göre akış hızlarını düşürerek pik deşarjlarını azaltır,
- Araç yolları vb geçirimsiz alanlar arasındaki bağlantıyı keserek yüzey akışlarının azalmasına yardımcı olur,
- Bitki örtüsü sayesinde kirletici maddeleri filtreleyerek suyun toprağa sızmasına izin verir,
- Toprağa sızan sudaki kirletici maddelerin bitki kökleri tarafından alınmasını sağlar(Anonim, 2009).

Yağmur hendeklerinin kullanım alanı oldukça yaygındır. Özellikle geleneksel drenaj boru sistemlerinin yerine kullanıldıkları için yol kenarlarında kullanılmaktadırlar. Bunların dışında peyzaj alanlarında, otoparkların yanında, tarlalarda ve diğer açık alanlarda da hem yüzeysel akışların önlenmesi hem de kirletici maddelerin filtrelenmesi amacıyla kullanımı yaygındır. Sanayi alanları gibi özellikle kirletici maddelerin fazla olduğu alanlarda ise gelen kirletici maddelerin alıcı su kaynaklarına zarar vermeden engellenebildiği için bu alanlarda drenaj sistemleri olarak kullanılmaktadır(NWRM, 2013).

Yağmur hendekleri üzerine yapılan çalışmalar

Yağmur hendekleri üzerine yapılan çalışmalar genellikle yağmur hendeklerinin yüzeysel akış sonucu meydana gelen yağmur sularını hacimsel olarak depolaması ve akan kirletici maddeleri üzerinde kullanılan bitkiler vasıtasıyla filtrelemesi üzerine yoğunlaşmaktadır. Örneğin; Fransa’da orta yoğunluktaki bir karayolunun kenarına kurulan ve makrofit bitkiler ve otlardan oluşturulmuş 100mm drenaj sistemine sahip bitkisel hendeklerin yollarda meydana gelen yüzey akış kalitesini nasıl etkilediği yönündeki bir araştırmada, yıllık ortalama yağış oranı 14,7mm olan 12 farklı yoğunluktaki yağış sırasında bitkisel hendeklerin yüzeysel akış sonucu meydana gelen ağır metal gibi kirletici maddeleri %17 ila %45 oranında filtrelediği tespit edilmiştir. Ayrıca derin kök sistemine sahip bitkisel hendeklerin kirletici yoğunluğunu azaltmada daha etkili olduğu sonucuna varılmıştır(Leroy et al., 2016). Yapılan diğer çalışmalarda ise yağmur hendeklerinin toplam askıda kalan katı maddeleri %50-%80 oranında, toplam fosforu %20-%23 oranında azalttığı ve 30m uzunluğundaki hendeklerin toplam akış hacmini %52 oranında azalttığı tespit edilmiştir(Lucke et al., 2014).

Çim ile kaplı yağmur hendeklerinin hidrolojik performansının belirlendiği bir başka çalışmada ise; ABD’nin Maryland kentinde bir otoyolun orta refüjüne 2 farklı hendek inşa edilmiştir (%25 ve %33 yan eğime, %1,4 boyuna eğime ve 0,61m taban genişliğine sahip). Bu hendeklerden birisi çim ile kaplanırken diğeri herhangi bir bitki örtüsü olmadan yalnızca kontrol amaçlı tasarlanmıştır. Yapılan ölçümlerde 4,5 yıl boyunca gözlemlenen yağış olaylarında 3mm altındaki yağışlardan dolayı meydana gelen yüzey akışlarının tamamı ortalama yıllık yağışların %59’u bitkisel hendeklerde depolanıp hacim azalması sağlarken, daha büyük miktardaki yağışlarda ise suya doymun olan hendeklerde herhangi bir hacimsel azalmanın meydana gelmediği ve hendeklerin sadece suyu alıcı su kaynaklarına taşıdığı tespit edilmiştir(Davis et al., 2012).

Çim ile kaplı bitkisel hendeklerin yol, otopark ve kentsel havzalarda kullanılması sonucu meydana gelen hacim azalmalarını inceleyen diğer çalışmalarda ise; otopark alanına inşa edilen hendeklerinin %30 hacim azalması meydana getirdiği(Rushton, 2001), kentsel havzalarda kullanılan yağmur hendeklerinin %45,7 oranında hacim azalması meydana getirdiği(Deletic, 2001) tespit edilmiştir. Başka bir çalışmada ise; yağmur hendekleri, toprağın geçirgen olması ve nem içeriğinin düşük olması koşuluyla yarı kurak iklim bölgelerinde %50 hacimsel azalma meydana getireceğini bildirmiştir(Barrett, 2008).

Kuru yağmur hendekleri(Yan eğimler %33, boyuna eğim %0,5, taban genişliği 1,8m ve 122m uzunluğa sahip) üzerine yapılan bir simülasyon çalışmasında ise; 4000 m²alana sahip bir kentsel havzada 10 yıl boyunca ortalama 2,03-32,5 mm yağış altında elde edilen veriler neticesinde kuru yağmur hendeklerinin ortalama %52,5 oranında hacim azalması meydana getirdiği tespit edilmiştir(Ackerman and Stein, 2008).

Soğuk deniz iklimine sahip bölgelerde yağmur hendeklerinin hidrolojik performansının değerlendirildiği bir çalışmada ise; kış şartlarında yoğun yağışlar ve kar erimeleri sonucu meydana gelen donma-çözünme olaylarından dolayı topraktaki su seviyesinin yükseldiği bunun da yağmur hendeklerindeki ilk 5cm’lik toprak katmanında donmalar meydana getirdiği ve bunun sonucunda da toprağın sızma kapasitesinin azaldığı tespit edilmiştir. Yapılan çalışmada yaz mevsiminde %32 olan sızma oranı kış aylarında %7 olarak ölçülmüştür. Sızma oranına bağlı olarak ise yaz mevsiminde ortalama %38 oranında tepe akış azalması meydana gelirken, kış mevsiminde bu oran %13 olarak tespit edilmiştir(Zaout and Andradóttir, 2021).

Yağmur hendekleri üzerine yapılan çalışmalarda elde edilen sonuçlar, yağmur hendeklerinin hem yüzeysel akış sonucu meydana gelen yağmur suyu hacimlerini azaltmada hem de üzerinde kullanılan bitkiler sayesinde kirletici maddeleri filtreleyerek bu maddelerin yer altı sularına karışmasına engel olma ve bu sayede alıcı su kaynaklarının kirlenmesini

önlemede başarı bir şekilde kullanılabileceğini göstermektedir. Bunların yanı sıra yağmur hendeklerinin çevreye sağladığı bir takım farklı avantajları ve dezavantajları da bulunmaktadır.

Yağmur hendeklerinin avantaj ve dezavantajları

Avantajları:

- Çevre düzenleme projelerine kolayca dâhil edilebilirler,
- Yağmur suyu ile birlikte akan kirletici maddeleri filtrelerler,
- Akış oranlarını ve hacimlerini azaltarak yüzeysel akışları engellerler,
- Maliyeti düşük ve bakımı kolay sistemlerdir(Ballard et al., 2007; Lucke et al., 2014).

Dezavantajları:

- Eğimi fazla olan dik alanlarda kullanılması uygun değildir,
- Yol kenarında olan otoparklarda kullanılması uygun değildir,
- Peyzaj tasarımlarında ağaç kullanımlarını sınırlar,
- Boru bağlantı noktalarında tıkanma riski meydana getirmektedir(Ballard et al., 2007).

Biyolojik Filtreleme Kanalları (Bioswales)

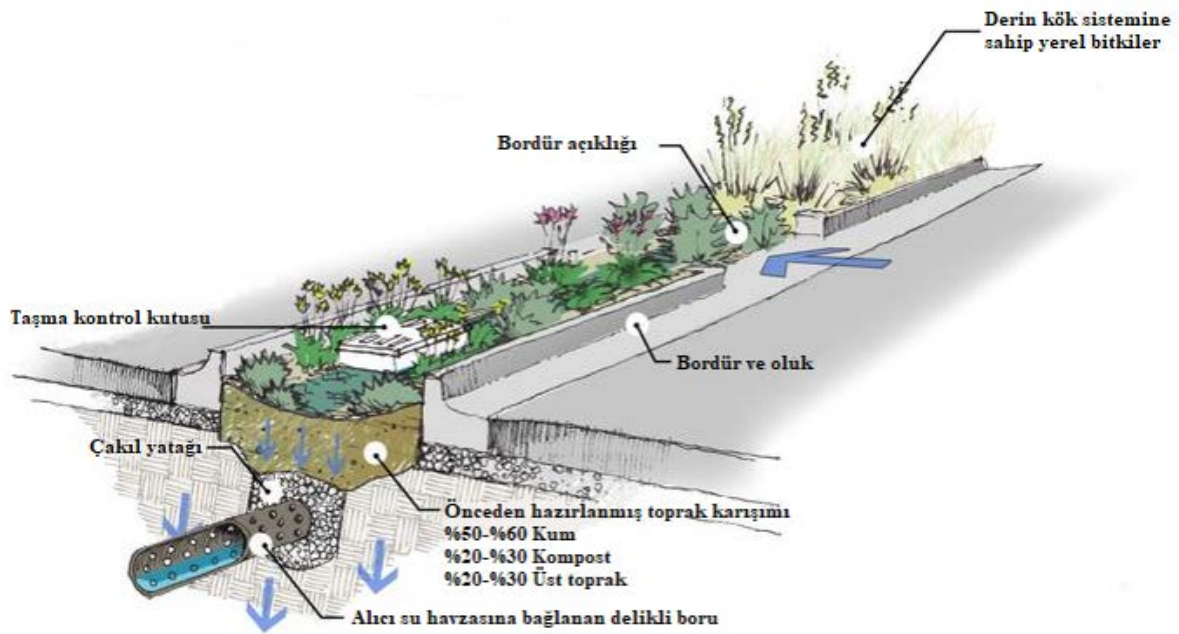
Biyolojik filtreleme kanalları, yollar ve otoparklar gibi geçirimsiz alanlardan akan yağmur sularının bu alanlara yönlendirilerek tutulduğu, yoğun bitki örtüsü ve geçirgen bir toprak katmanı sayesinde suyun toprağa sızmasına izin verdiği aynı zamanda üzerindeki bitki örtüsü sayesinde kirletici maddelerin filtrelendiği, çakıl ve drenaj katmanı gibi ek drenaj sistemlerine sahip yağmur bahçelerine benzeyen suya duyarlı bitkisel şeritlerdir. Biyolojik kanallar özellikle fırtınaların neden olduğu kanalizasyon taşmaları ve bunun sonucunda meydana gelebilecek sel veya taşkın gibi felaketleri, yağmur sularının tutulma süresini artırarak engellemektedir. Tutma ve filtreleme süresinin artırılması için uzun ve düz bir alana ihtiyaç duyduklarından yollara paralel olarak tasarlanmaktadır. Tasarımında özellikle sızma kapasitesini artırabilecek, yerel iklimle uygun doğal bitki türleri ve geçirgen bir toprak katmanı tercih edilmelidir(CTCN, 2016; EPA, 2014a). Ayrıca tasarımlarında bir takım teknik ölçülere de dikkat edilmesi gerekmektedir. Aşağıdaki tablo (**Tablo 5.**) biyolojik filtreleme kanallarının en uygun tasarım ölçülerini göstermektedir.

Tablo 5. Biyolojik filtreleme kanallarının en uygun tasarım ölçüleri(Yocum, 2021)'den uyarlanmıştır.

En Uygun Tasarım Ölçüleri	Minimum	Maksimum	Optimum
Derinlik (m)	1	4	2,5
Dip Genişliği (m)	1	4	-
Kanal Genişliği (m)	7	12	
Uzunluk (m)	30		-
Eğim (%)	1	6	3
Yan Eğimler (%)	20	25	20
Drenaj Alanı (Ha)	1	4	-
Bitki Yüksekliği (mm)	100	150	150
Yeraltı Suları Üzerinde Kalan Yükseklik (m)	3		3

Biyolojik Filtreleme Kanalları, eğimi %5 den daha az olan ve 4 hektardan küçük alanlarda, toplam geçirimsiz yüzey alanının %1’lik bir kısmında kullanılması önerilmektedir. Eğimi %5 den fazla olan alanlarda kullanılması gerekiyorsa hem yüzey akışlarının azaltılması hem de suyun bu alanlarda tutularak sızma süresinin uzatılması için kontrol barajları ile birlikte tasarlanması gerekmektedir(Brankovic et al., 2019).

Biyolojik filtreleme kanalları, ağaç, çalı, yer örtücü bitkiler ve çimen olmak üzere çeşitli bitki örtüsüyle tasarlanabilirler. Kullanım amacına göre kalın bir çim katmanıyla tasarlanan biyolojik kanallar kirlетici maddeleri filtrelemede daha etkili olurken, sızma oranının artırılması ve bakım kolaylığı yönünden derin kök sistemine sahip bitkilerle tasarlanan biowales’ler daha etkili bir çözüm sunmaktadır. Yoğun yağışlardan sonra düzenli olarak bakım yapılması gerekmektedir. Kurak bir dönemden sonra ise bitkilerin yaşamlarını devam ettirebilmeleri için düzenli olarak sulanması gerekmektedir(Brankovic et al., 2019). Aşağıdaki şekilde (şekil 22.)bir biyolojik filtreleme kanalının şematik olarak bir görseli yer almaktadır.



Şekil 22. Biyolojik filtreleme kanalının şematik bir gösterimi Anonim (2014)’ den uyarlanmıştır.

Biyolojik filtreleme kanalları üzerine yapılan çalışmalar

Biyolojik filtreleme kanalları üzerine yapılan araştırmalar bu sistemlerin yüzey akışlarını azaltma ve kirlетici maddeleri filtrelemede etkili bir çözüm olduğunu geleneksel drenaj sistemlerine alternatif olarak kullanılabileceğini göstermektedir. Örneğin;

Kalifornia üniversitesi kampüsünde 1447,68 m² alana sahip bir otopark alanına yerleştirilen bir biowales’in (10,4m uzunluk, 2,4m genişlik ve 0,9m derinlik) yüzey akışı ve kirlетici maddeleri giderme performanslarının değerlendirildiği bir araştırmada özel olarak hazırlanmış bir toprak karışımına (%75 lav taşı, %25 tınlı toprak ve %45,3 gözeneklilik) sahip bir biyolojik filtreleme kanalının 20 aylık bir sürede ve ortalama 11,28mm yağış altında yüzey akışını %88,8 oranında kirlетici yükünü ise %95,4 oranında azalttığı tespit edilmiştir. Yapılan çalışmada ana malzeme olarak kullanılan lav taşının yüksek su tutma kapasitesine ve yüksek gözeneklilik oranına sahip olduğu ve 3,3mm altındaki yağışlarda yüzey akışı meydana gelmediği bildirilmiştir(Xiao and McPherson, 2011).

Çin'in Xianyang şehrinde bir otoyolun iki tarafına yerleştirilen 2 farklı biyolojik filtreleme kanalının (5m uzunluk, 2,7m genişlik %20 yan eğimler) yüzey akışlarını düzenleme performansının ölçüldüğü başka bir çalışmada ise; 15cm akifer katmanı, 60cm ekim toprağı, 20cm cüruf dolgu katmanı ve 50cm çakıl katmanı şeklinde oluşturulan ve farklı yıllar arasında incelenen biyolojik filtreleme kanallarının 28mm yağış altında sırasıyla akış hacimlerini ortalama %98,25 ve %77,65 oranında azalttığı tespit edilmiştir. İki biowales arasında farklı değerlerin çıkmasının sebebi olarak ikinci biowales'in gevşek bir toprak katmanına sahip olduğu, birinci biowales'in ise daha yoğun bitki örtüsüne sahip olduğuna belirtilmiştir(Jiang et al., 2017). Yapılan çalışmada elde edilen veriler bitki örtüsünün biyolojik filtreleme kanallarının sızma kapasitesini artırdığını göstermektedir bir sonraki başlıkta bu konuya değinilmiştir.

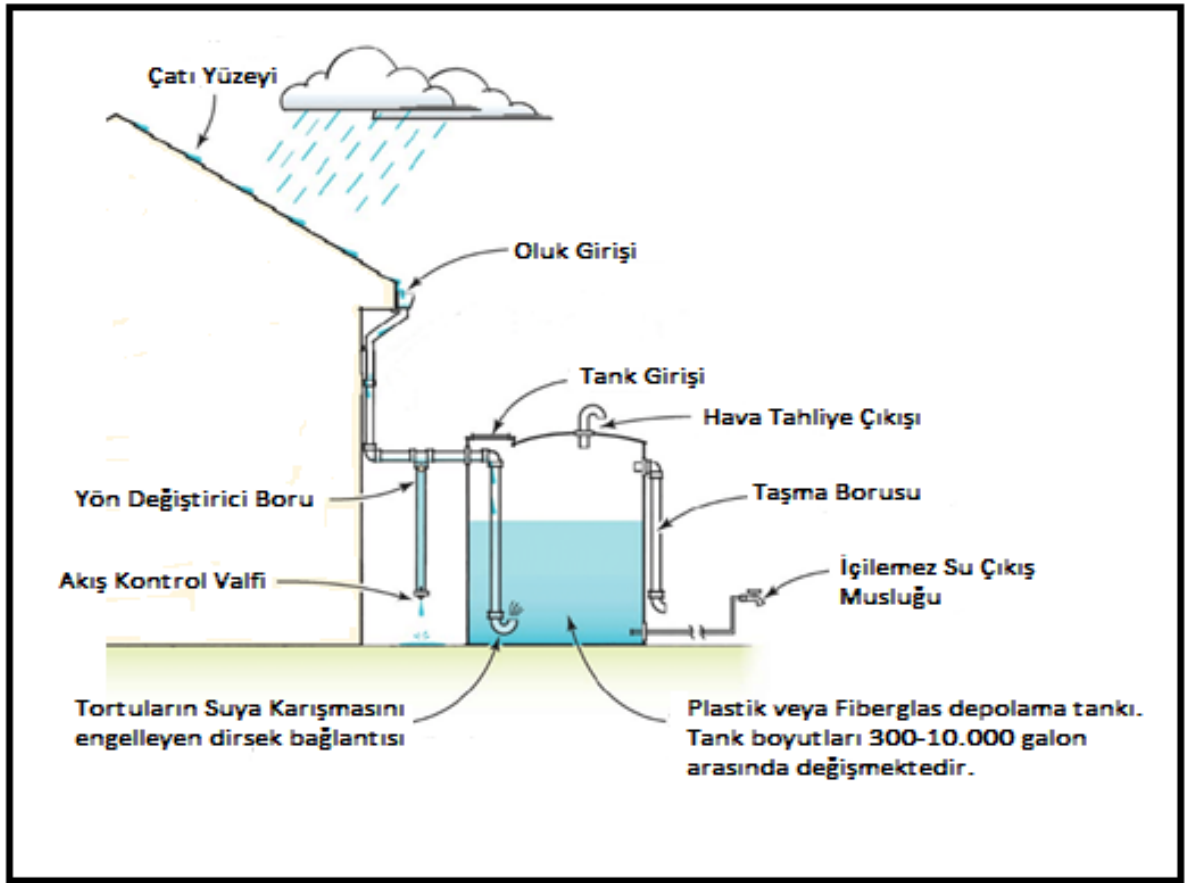
Biyolojik filtreleme sistemlerinde kullanılan ağaçların su döngüsü üzerindeki rolü

Bir biyolojik filtreleme kanalında yağmur suyu yönetimi konusunda en etkili bileşenlerden biri üzerinde kullanılan bitkilerin su döngüsü üzerindeki rolüdür çünkü bitkiler gelen yağmur sularını yavaşlatarak bünyelerinde depolar ve suyu terleme yoluyla topraktan uzaklaştırır bunun yanı sıra derin kök sistemleri sayesinde suyun toprağı sızma kapasitesini artırarak yüzey akışlarını sınırlar ve uygulandıkları yeşil altyapı bileşenlerinin performanslarını artırır(Bartens et al., 2008; Berland et al., 2017). İngiltere'nin Manchester kentinde yapılan bir araştırmaya göre asfalt alanlar üzerindeki ağaç çukurlarına ekilen ağaçların (Acer campestre) yağmur sularının neden olduğu yüzey akışlarını %62 oranında azalttığı tespit edilmiştir(Armson et al., 2013). ABD'nin en büyük yeşil altyapı tesislerinden biri olan Morton Arboretum'un 500 araçlık otoparkında tasarlanan bir bioswales'de(3m genişlik, %33 yan eğim, 0,46m toprak katmanı) kullanılan ağaçların su döngüsü üzerindeki etkileri üzerine yapılan deneysel bir araştırmada ise bir biowalesde kullanılan ağaçların %46-%72 arasında suyu terleme yoluyla tekrar atmosfere gönderdiği ve bu sayede hacim azalması meydana getirdiği belirlenmiştir(Scharenbroch et al., 2016).

Yağmur Varilleri ve Sarnıçlar

Yağmur varilleri

Yağmur varilleri, çatılardan akan yağmur sularının oluk ve boru sistemleri yardımıyla taşındığı, içilemez su ihtiyaçlarında (Bahçe sulama, lavabo ve temizlik) kullanılmak üzere geçici olarak depolandığı 50-100 galonluk plastik tanklardır. Üst kısmında çatılardan akan yağmur suyunu taşıyan boru sistemi için bir giriş kısmı ve fazla suyun tahliyesinin sağlanması için taşma çıkışı yer alır. Alt kısmında ise bir valf ve hortum adaptörü yer almaktadır. Çoğunlukla konutlarda kullanılan bu sistemlerde toplanan su, kullanılacak olan alana doğal yer çekimi akışıyla ulaştığından dolayı kullanılacak olan alandan daha yüksekte bir noktaya yerleştirilmelidir(Un, 2016). Yağmur varilleri ve sarnıçlarda toplanan sular yağmur suyu hasatı olarak adlandırılmaktadır. Aşağıdaki şekil (**şekil 23.**) bir yağış sonrası çatılardan toplanan suyun yağmur varili veya sarnıç gibi sistemlerden hasat edilmesini göstermektedir.



Şekil 23. Yağmur suyu hasat sisteminin şematik gösterimi (Rovira et al., 2020)’den uyarlanmıştır.

Sarnıçlar

Sarnıçlar ise, binaların çatıları veya geçirimsiz yüzeylerinden akan yağmur sularının toplandığı, tamamen veya kısmen yer altına gömülü tahliye pompalı tanklardır. Yağmur varillerinden farklı olarak suyun dağıtımının sağlanması için bir pompa sistemine sahiptir bu da suyun daha hızlı ve tazyikli olarak iletilmesini sağlamaktadır. Ayrıca depolama kapasitesi yağmur varillerine göre daha büyük olmakla birlikte birden fazla çatıdan taşınan suları depolayabilmekte ve birden fazla tankın birbirine bağlanarak depolama kapasitesinin artırılmasına imkân sağlayabilmektedir(Un, 2016). Aşağıdaki şekilde (**şekil 24.**)tipik bir sarnıç görüntüleri yer almaktadır.



Şekil 24. Tipik bir sarnıç görüntüsü(Jones and Hunt, 2010).

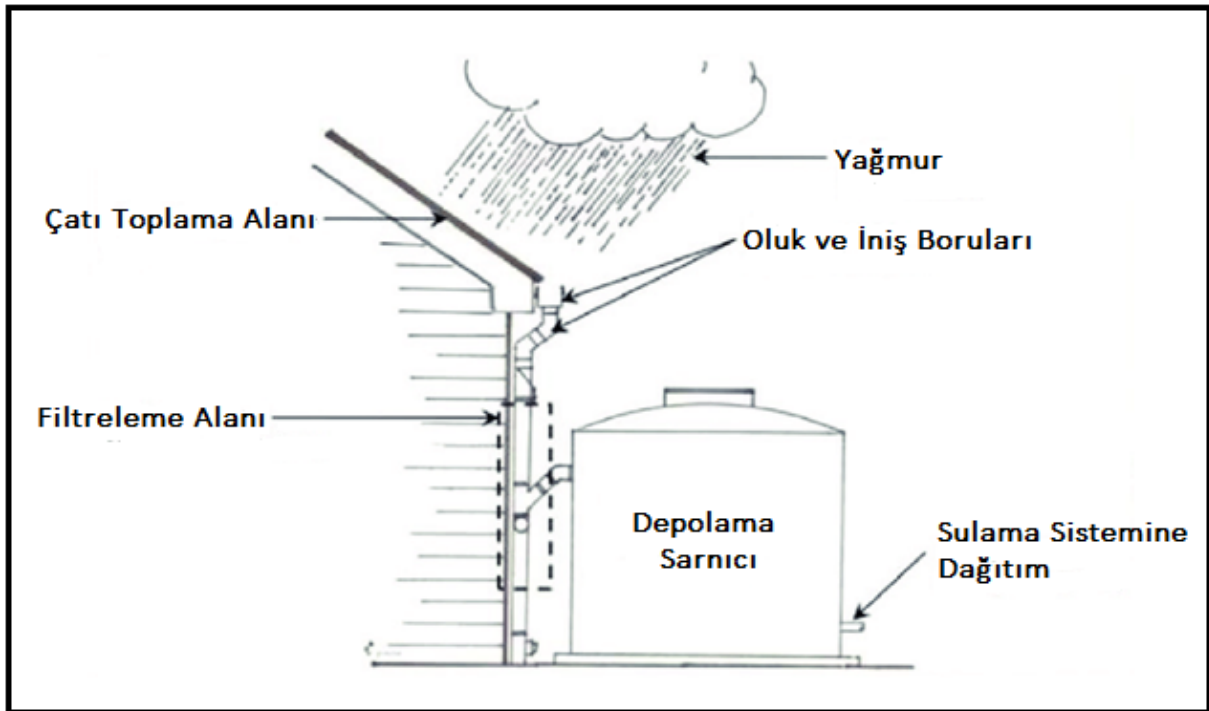
Sarnıç veya yağmur varili gibi sistemler özellikle su kaynaklarının kısıtlı olduğu, su temini sağlayabilecek yeterli bir altyapının bulunmadığı buna karşın potansiyel olarak yeterli miktarda yağış alabilen kırsal alanlar, kıyı bölgeleri, kurak veya yarı kurak bölgeler, adalar ve dağınık yerleşim alanlarında etkili bir şekilde kullanılabilir(Tanik, 2017).

Her iki sistemde de amaç, yağmur sularının sonraki kullanımlar için geçici olarak depolanması ve bu sayede hem kanalizasyon sistemlerine giden su hacimlerinde azalma meydana getirilmesi hem de artan su taleplerine alternatif bir çözüm sağlanmasıdır. Ancak bazı durumlarda depolarda biriken su deponun kapasitesini aşabilmektedir böyle bir durumda ise fazla su, tahliye kanallarından yağmur bahçesi veya diğer geçirgen alanlara yönlendirilerek toprağa sızması veya buharlaşması sağlanarak yüzey akışı oluşturmaya izin verilmemektedir(Gould and Petersen, 1999; Abi Aad et al., 2010).

Her iki sistemde tipik olarak 4 bileşenden oluşmaktadır. Bunlar;

1. Yağmur sularının binaların çatılarından veya geçirimsiz yüzeylerinden toplanması,
2. Oluklar ve borular vasıtasıyla toplama alanlarına iletilmesi,
3. Yağmur suyu toplama depolarında biriktirilmesi,
4. Depolanan suların arıtılarak farklı amaçlarda kullanılmak üzere bina içerisine transferi(Tanik, 2017).

Aşağıdaki şekil (şekil 25.) yağmur suyu toplama sistemlerinin bileşenlerini şematik olarak göstermektedir.



Şekil 25. Yağmur suyu toplama sisteminin bileşenleri. Rovira et al. (2020)' dan uyarlanmıştır.

Yağmur varilleri ve sarnıçlar üzerine yapılan çalışmalar

Yağmur varili veya sarnıç gibi sistemler kullanılarak yağmur sularının hasat edildiği birçok çalışma kentlerin hidrolojisi üzerinde farklı etkileri olduğunu göstermiştir. Bazı çalışmalar yağmur varili veya sarnıç gibi yağmur suyu hasat sistemlerinin kullanılması sonucunda kentsel alanlarda meydana gelen yüzey akışlarında bir azalma meydana geleceğini belirtmektedir. Örneğin;

Indianapolis’de kentsel olarak gelişmiş iki havzada 10 yıllık yağış verileri baz alınarak yağmur suyu toplama sistemlerinin(Yağmur varili/sarnıç, gözenekli kaplama) kentsel su yönetimindeki etkinliği üzerine yapılan bir simülasyon çalışmasında, yüksek yoğunluklu konut ve ticari alanlarının çatılarının %25’i uygun boyutlarda yağmur varili/sarnıç gibi sistemlerle entegre edildiğinde toplam yüzey akışında %6 oranında bir düşüş meydana geldiği, çatıların %50 sine bu sistemlerin entegre edilmesiyle bu oranın %11 oranına çıktığı tespit edilmiştir. Ayrıca kentsel havzalardaki konut ve ticari alanlarının çatılarına %25 yağmur varili/sarnıç sistemleri entegre edilip havzalardaki işlek olmayan taşıt yollarının %25’i geçirgen kaplama ile kaplandığı bir kombinasyon uygulamasında ise toplam yüzey akışında %8 oranında bir azalma meydana geldiği belirlenmiştir(Ahiablame et al., 2013).

Avustralya’da yapılan bir çalışmada ise; yedi farklı sahada kullanılan büyük hacimli yağmur suyu toplama sistemlerinin ortalama yıllık yüzey akışını %20 ila %100 arasında azalttığı ve yıllık ortalama içme suyu talebini %17 ila %65 oranında azalttığı tespit edilmiştir(Hatt et al., 2006).

Sürdürülebilir yağmur suyu yönetimi kapsamında yağmur varilleri ve sarnıç gibi sistemlerin yaygınlaştırılması yerel yönetimlerin halkı desteklemesine, halkın refah seviyesi ve algısına ve bu konuda çeşitli bilgilendirme kampanyalarının yürütülmesine bağlı olmaktadır.

Kuzey Carolina’da farklı amaçlar için(Bahçe sulama, lavabo temizliği ve araç yıkama) kullanılmak üzere tasarlanan üç farklı boyutta yağmur suyu toplama sistemleri üzerine yapılan bir çalışmada, sarnıç kullanımının artan su taleplerini karşılaması yönünden etkili bir biçimde kullanılabileceğini ancak halk tarafından bu tür sistemlerin kötü algılanması sebebiyle yetersiz olarak kullanıldığı tespit edilmiştir(Jones and Hunt, 2010). Başka bir çalışmada ise bu tür sistemlerin kullanımının özellikle yeşil teknolojileri destekleyen yüksek gelirli nüfusa sahip kesimlerle, hidrolojik bilgilendirme kampanyalarının yürütüldüğü ve yerel yönetimler tarafından dağıtımının yapıldığı kesimlerde yoğunlaştığı gözlemlenmiştir(Ando and Freitas, 2011).

Bazı çalışmalar ise kentsel alanlarda meydana gelen taşkın ve sel olaylarının kontrolü için yağmur varili ve sarnıç sistemlerinin uygulanabilirliğini incelemiştir. Örneğin;

Yetersiz bir kanalizasyon sistemine sahip ve taşkın olaylarının sık sık yaşandığı belirtilen Kolombiya’nın And dağlarındaki kentsel bir yerleşim alanında yağmur varili ve sarnıç gibi sistemlerin uygulanması sonucunda çatılardan akan yağmur sularının depolanarak sel ve taşkın gibi doğal felaketlerin önlenmesi amaçlanmıştır. Yapılan çalışmada sarnıçların akış hacimlerini azaltarak tepe akışlarını ortalama %25 oranında azalttığını, su baskını açısından yaklaşık 5 dakikalık bir gecikme meydana getirerek eğimli havzalarda kullanılabileceği tespit edilmiştir. Buna karşın kullanılan yağmur varilleri taşkın hacmini %3-14,3 oranında azaltmasına rağmen hem depolama kapasitesi açısından sarnıçlara göre ortalama 9 kat daha düşük olduğundan hem de ulusal standartların (%25) uzağında olduğundan kullanılması önerilmemiştir(Valencia et al., 2019).

Yapılan çalışmalardan bazıları ise iklim değişikliği sonucunda azalan su kaynaklarına çözüm bulmak amacıyla yağmur suyunun hasat edilip çeşitli amaçlarla kullanılmasıyla elde edilebilecek su tasarrufuna değinmektedir. Örneğin;

İstanbul’da 1800 m² alana sahip bir fabrikanın çatısından elde edilecek yağmur suyu hasadı ile tuvaletlerdeki günlük 57-132 litrelik su kullanımının karşılanması amacıyla yapılan bir çalışmada sadece mevcut çatının %40 oranında bir kısmından toplanan yağmur sularının günlük tuvalet temizliği ihtiyaçlarını karşıladığı belirlenmiştir(Kantaroğlu, 2009).

Başka bir çalışmada ise Sakarya Üniversitesi kampüsü içerisinde yer alan binaların çatılarından toplanacak olan suyun yeşil alanların günlük ve haftalık su ihtiyaçlarının ne

kadarını karşıladığı tespit edilmiştir. Yapılan çalışmalar neticesinde, toplanan suların yeşil alanların günde bir kez sulanmasında kullanılması sonucunda su ihtiyacının %10,9'unu karşıladığı, haftada 2 kez sulanmasında kullanılması sonucunda ise su ihtiyacının %38,4'ünü karşıladığı belirlenmiştir(Eren vd., 2016).

Bursa'da bir konut çatısından toplanacak suyun konut dışı ihtiyaçlarında kullanılması amacıyla yapılan benzer bir çalışmada ise; 200 m² bir çatı alanından elde edilen yağmur sularının 400 m² alana sahip bir bahçenin günlük sulanmasında kullanılması sonucunda su ihtiyacının %14'ünü karşıladığı, haftada iki kez sulanması durumunda ise su ihtiyacının %49'unu karşıladığı tespit edilmiştir(Kılıç ve Abuş, 2018).

Yapılan çalışmalarda elde edilen veriler çatı yüzeylerinden toplanan yağmur sularının uygun bir depolama hacmine sahip yağmur varili veya sarnıç gibi sistemlerde depolanmasıyla içilemez su ihtiyaçlarının önemli bir kısmını karşılayabileceğini ve bu sayede azalan su kaynaklarımız üzerindeki baskının azaltılabileceğini göstermektedir.

Yağmur suyu yönetiminde kullanılan tüm bileşenler birbirlerine göre bazı avantajlara ve dezavantajlara sahip olmaktadır. Bazı sistemler toplumsal sürdürülebilirliği geliştirmede daha fazla rol oynarken bazı bileşenler daha az rol oynayabilmektedir. Aşağıdaki şekil(**şekil 26.**) bu bileşenler arasında hem yağmur suyu yönetimi hem de toplumsal sürdürülebilirliği geliştirme açısından sağladığı faydaları karşılaştırmalı olarak ifade etmektedir. Tamamen koyu daireler belirtilen standartları karşılarken boş daireler belirtilen standartları karşılamamaktadır. Yarı koyu yarı açık olan daireler ise belirtilen standartları kısmen karşılamaktadır.

YEŞİL ALTYAPI/DEĞ BİLEŞENLERİNİN KARŞILAŞTIRMALI OLARAK SAĞLADIĞI FAYDALAR

FAYDALAR	Yağmur Suyu Yüzey Akışlarını Azaltma				Mevcut Su İhtiyacını Sağlar	Yeraltı Sularını Artırır	Tuz Kullanımını Azaltır	Enerji Tasarrufu Sağlar	Hava Kalitesini Artırır	Atmosferdeki Karbondioksiti Azaltır	Kentsel Isı Adası Etkisini Azaltır	Toplumsal Sürdürülebilirliği Geliştirme					Habitatları Geliştirir	Eğitim Olanaklarını Geliştirir
	Su Bakım İhtiyaçlarını Azaltır	Su Kalitesini İyileştirir	Grü Altyapı İhtiyaçlarını Azaltır	Taşkınları Azaltır								Görsel Kaliteyi Artırır	Rekreasyonel Fırsatları Artırır	Gürültü Kirliliğini Azaltır	Kişiler Arasında Uyumlu Sağlar	Kentsel Tarımı Destekler		
Yeşil Çatılar	●	●	●	●	○	○	○	●	●	●	●	●	◐	●	◐	◐	●	●
Ağaç Dikimi	●	●	●	●	○	◐	○	●	●	●	●	●	●	●	●	◐	●	●
Yağmur Bahçesi ve İnfiltrasyon sistemleri	●	●	●	●	◐	◐	○	○	●	●	●	●	●	◐	◐	○	●	●
Geçirimli Kaplamalar	●	●	●	●	○	◐	●	◐	●	●	●	○	○	●	○	○	○	●
Su Hasad Sistemleri	●	●	●	●	●	◐	○	◐	◐	◐	○	○	○	○	○	○	○	●
● EVET ◐ KISMEN ○ HAYIR																		

Şekil 26. Genel İtibari ile Yeşil Altyapı Bileşenlerinin Sağladığı Faydalar. CNT (2010)' dan uyarlanmıştır.

Yağmur Suyu Yönetim Modelleri

Yağmur suyu yönetim modelleri, yağmursuyu miktarı ve kalitesini belirlemek üzere doğal süreçlerin matematiksel olarak tahmin edildiği çeşitli çevresel modelleme araçlarıdır. Modeller, tek bir fırtınadan kaynaklı yüzeysel akış gibi yalnızca tek bir süreci tahmin edebilen basit elektronik tablolardan, birden fazla DEG bileşenlerinin dahil edilip birbiriyle ilişkili süreçleri tahmin edebilen daha karmaşık simülasyon modellerine kadar çeşitlilik göstermektedir. Her yönetim modelinin kullanılma amacı ve modelleyebildiği yağmur suyu analizleri ve DEG bileşenleri farklı olabilmektedir. Örneğin yağmur suyu yüzey akış hızının belirlenmesi ile bir su kütlesinin tepe yüksekliğinin tahmin edilmesi farklı sorunlar olduğundan farklı modellerin kullanılmasını gerektirebilmektedir(Anonim, 2013a). Bu sebeplerden dolayı yapılacak olan modelleme ve simülasyon çalışmalarında mevcut kaynaklara ve modelleme hedeflerine uygun bir yağmur suyu modeli seçilmesi gerekmektedir. Aşağıda modelleme hedefleri belirlenirken dikkat edilmesi gereken bir takım hususlar yer almaktadır. Bunlar;

- Mevzuata uygunluk: Model ilgili kurumun kabul edebileceği bir model midir?
- Hidrolojik süreç: Modelleme yaparken belirlenen amaç tek bir fırtına olayının modellenmesini mi yoksa sürekli yağış olaylarının modellenmesini mi kapsamaktadır? Model, sızma, buharlaşma, terleme, hacim azaltılması gibi fiziksel süreçleri içermeli midir? Model, büyük fırtına olaylarını (sel kontrolü), küçük fırtına olaylarını (su kalitesi) veya her ikisini de tahmin etmek için elverişli midir?
- Arazi kullanımı: Model büyük kırsal ve tarım arazileri için veya küçük kentsel havzalar için mi gereklidir?
- Modellenecek alan: Yağmur suyunun tahmin edilmesi için modellenecek olan alan farklı bölümler olarak mı ele alınacak yoksa kentsel havzanın tamamına daha büyük bir ölçekte mi uygulanacak?
- Kullanım amacı: Planlama, mühendislik/tasarım veya operasyonel kullanım için mi yapılmaktadır?
- Model karmaşıklığı: Model basit veya karmaşık bir olay için mi kullanılmaktadır?

Bu hedeflere göre mevzuata, hidrolojik süreçlere, arazi kullanımına, model karmaşıklığına ve kullanım amacına uygun bir model veya modellerin seçilmesi yapılacak olan çalışmanın etkinliği açısından önem arz etmektedir(Anonim, 2013a).

Yağmur Suyu Yönetim Modellerinin Tarihçesi

Yağmur suyu miktarının ve kalitesinin çeşitli bilgisayar yazılımlarıyla simüle edildiği yağmur suyu modelleme araçları ilk olarak 1970'in başlarında ABD Çevre Koruma Dairesi(USEPA) tarafından geliştirilmiştir(Zoppou, 2001). Bu tarihten itibaren günümüze kadar çeşitli kurumlar tarafından birçok yağmur suyu modeli geliştirilmiştir.

Bu çalışma genel itibari ile yeşil altyapı sistemleri kapsamında DEG bileşenlerinin yağmur suyu yönetimindeki performansı üzerine olduğundan diğer başlıklarda DEG bileşenlerini tasarlayabilen ve dünya genelinde en yaygın şekilde kullanılan yağmur suyu yönetim modellerine yer verilecektir. Bu modellerden bazıları yağmur suyu hacimlerini ve yüzey akış miktarlarını tahmin ederken bazıları ise yağmur suyu kalitesini ölçmektedir. Bazı modeller ise her iki bileşeni de etkili bir şekilde tahmin edebilmektedir. Aşağıdaki tabloda **(Tablo 6.)** dünya genelinde yaygın bir şekilde kullanılan 10 farklı yağmur suyu yönetim modelinin özeti yer almaktadır.

Tablo 6. Yeşil Altyapı Bileşenlerini Modelleyebilen 10 Farklı Yağmur Suyu Yönetim Modelleme Aracı. Anonim (2013a)' Den Uyarlanmıştır.

MODELLEM E ARACI	ULAŞILABİLİRLİK	MODELENEBİLEN (YA/DEĞ) BİLEŞENLERİ	AMAÇLANAN KULLANIM
SWMM	https://www.epa.gov/water-research/storm-water-management-model-swmm Adresinden kamuya açık yazılım olarak ulaşılabilir.	Yağmur bahçeleri, yeşil çatılar, geçirgen döşemeler, yağmur varilleri ve sarnıçlar, yağmur hendekleri, biolojik infiltrasyon kanalları, sızma siperleri.	Akış miktarını ve kalitesini tahmin etmek, yüzey akışlarını azaltmak, su kütlelerinin bozulmasını engellemek.
UFORE-Hydro	https://www.itreetools.org/verify/?next=/documents/656/i-Tree 2021 6.1.36.exe Adresinden lisanslı yazılım olarak ulaşılabilir.	Ağaç ve çalılar	Ağaç ve çalıların yağmur suyu yüzey akışı üzerindeki etkilerini tespit etmek.
RECARGA	https://dnr.wisconsin.gov/topic/Stormwaterstandards/recarga.html Adresinden kamuya açık yazılım olarak ulaşılabilir.	Yağmur bahçeleri/bioretenction tesisleri, infiltrasyon havzaları	Akış hacimlerinin azaltmak ve suyun yeraltına sızmasına izin verip yeraltı sularının beslenmesini sağlamak.
SUSTAIN	https://www.epa.gov/water-research/system-urban-stormwater-treatment-and-analysis-integration-sustain Adresinden Kamuya açık yazılım olarak ulaşılabilir.	Sulak alanlar, bioretention sistemleri, yeşil çatılar, gözenekli kaldırımlar, yağmur varilleri ve sarnıçlar, infiltrasyon hendekleri, ıslak ve kuru yağmur hendekleri, kum filtreleri/şeritleri	Yüzey akışları sonucu meydana gelen kirletici yüklerini belirlemek yağmur suyu kalitesini ölçmek.
P8	http://www.walkernet.net/p8/ Adresinden kamuya açık yazılım olarak ulaşılabilir.	Tutma/sızma havuzları, hendekler, tampon şeritler	Yağmur suyu yüzey akışlarının kirletici madde oluşumu ve taşınmasını tahmin etmek.

MIKE URBAN	https://www.mikepoweredbydhi.com/download/mike-2021 Adresinden lisanslı yazılım olarak ulaşılabilir.	Yağmur varilleri, geçirgen döşemeler, bitkisel hendekler, bioretention hücreleri, biyolojik infiltrasyon kanalları, alıkoyma ve sızmaya dahil DEG bileşenleri, sulak alanlar ve göletler.	Kentsel yağmur ve atık suyu toplama sistemlerinin ve su dağıtım ağlarının modellenmesini gerçekleştirmek.
WinSLAMM	http://www.winslamm.com/purchase.html Adresinden lisanslı yazılım olarak ulaşılabilir.	Yağmur bahçeleri, çim kanallar, geçirgen döşemeler, ıslak gözaltı havuzları, filtre şeritleri, yağmur varilleri ve sarnıçlar.	Yüzey akışları sonucu oluşan kirletici kaynakları belirlemek ve kirletici konsantrasyonun azaltılmasını sağlamak.
SELECT	https://stormwater.wef.org/event/werf-bmp-select-version-2-0-overview-and-discussion/ Adresinden kamuya açık yazılım olarak ulaşılabilir.	Bioretention sistemleri, geçirgen döşemeler, hendekler, gözaltı havuzları, sulak alanlar.	Yağmur suyu kirliliğinin kontrolü ve yeşil altyapı bileşenlerinin ömür boyu maliyet hesaplamasını tespit etmek.
CTN	https://greenvalues.cnt.org/index.php#calculate Adresinden çevrimiçi hesaplama aracı olarak ulaşılabilir.	Yeşil çatılar, yağmur bahçeleri, yağmur varilleri ve sarnıçlar, geçirgen döşemeler, hendekler, doğal bitki örtüsü, ağaçlar, filtre şeritleri.	Yeşil altyapı sistemlerinin maliyetlerini ve yağmur suyu hacimlerini azaltma oranını belirlemek.
MUSIC	https://licensing.ewater.org.au/order.php Adresinden lisanslı yazılım olarak ulaşılabilir.	Bioretention sistemler, bitkisel hendekler, infiltrasyon sistemleri, sulak alan ve göletler, yağmur suyu tankları, tampon şeritler.	Yağmur suyu kalitesinin iyileştirilmesi, yüzey akışlarının depolanması ve tekrar kullanılması ve akış sıklığının azaltılması

Yağmur Suyu Yönetim Modeli (SWMM)

Yağmur Suyu Yönetim Modeli (SWMM), kentsel yağmur suyu drenaj planlamalarında yaygın olarak kullanılan bir modeldir. Model yeşil altyapı (YA) / düşük etkili geliştirme (DEG) tasarımları ve etkinliği dikkate alınarak drenaj sistemlerinden gelen akış miktarını ve kalitesini tahmin etmeye yardımcı olmak ve yer altına sızma ve tutma yoluyla yüzey akışlarını azaltmak için yerel, bölgesel, ulusal düzeyde yağmur suyu yönetimi hedeflerini desteklemek ve su kütlelerinin bozulmasını engellemek için tasarlanmıştır. Büyük ve orta ölçekli hidrolojik uygulamalar konusunda uygun bir model olmasına karşın kirletici kaynakların taşınması ve YA / DEG uygulama senaryolarının daha gerçekçi bir şekilde simüle edilebilmesi için diğer modellerle bağlantılı bir şekilde uygulanması gereklidir(EPA, 2014a; Niazi et al., 2017). Model yeşil altyapı bileşenleri olarak; yağmur bahçeleri, yeşil çatılar, geçirgen döşemeler, yağmur varilleri ve sarnıçlar, yağmur hendekleri, biyolojik infiltrasyon kanalları, sızma siperleri ve diğer DEG bileşenlerini etkili bir şekilde modelleyebilmektedir(EPA, 2014a).

L. Rossman (2004)' a göre; SWMM dünya genelinde en yaygın olarak kullanılan yağmur suyu yönetim modellerinden biridir. Model bir takım hidrolojik süreçleri tanımlayarak yağmur suyu yönetimi açısından yaygın olarak kullanılmaktadır.

SWMM, kentsel alanlarda yüzey akışlarını üreten aşağıdaki bir takım hidrolojik süreçleri açıklamaktadır;

- Yeşil altyapı uygulamalarının kullanılmasıyla yüzey akışlarının azaltılması
- Zamanla değişen yağış miktarları ve durgun yüzey suyunun buharlaşması
- Yağışın depresyon depolamasından engellenmesi
- Biriken karların erimesi
- Yağışın doymun olmayan toprağın alt katmanlarına sızması
- Sızan suyun yeraltı suyu katmanlarıyla drenaj sistemleri arasındaki akışı,
- Yüzeysel akışın doğrusal olmayan su kaynaklarına yönlendirilmesi.

Tüm bu süreçlerdeki mekânsal değişimler, belli bir çalışma alanını daha küçük homojen alt havzalara bölerek elde edilmektedir. Yüzey akışı alt havzalara veya drenaj sistemlerine yönlendirilebilmektedir(EPA, 2014a).

Raei et al. (2019)' un çok katmanlı algılayıcı (MLP) ağına dayalı bir SWMM-MLP meta entegrasyon modeli kullanarak yaptığı bir simülasyon çalışmasında modelin kentsel yüzey akışı ve kirlilik oranını %80 den daha fazla bir oranda azalttığı sonucuna varmıştır.

Kentsel Orman Etkileri-Hidroloji Modeli (Ufore-Hydro)

UFORE-Hydro modeli; Kentsel alanlarda ağaç ve çalıların yağmur suyu yüzey akışı üzerindeki etkilerini belirlemek üzere toprak-bitki örtüsü-atmosfer verilerinin kullanıldığı bir kentsel su dengesi simülasyon modelidir. Model, yüzeyleri geçirimsiz ve geçirimli alanlar olmak üzere ikiye ayırıp her iki alandaki ağaç ve çalı gölgelik yüzdelerini ölçerek bu alanlardaki toprak ve bitki örtüsündeki depolanan su miktarlarını belirlemek için tasarlanmıştır(Wang et al., 2008).

Modele göre Wang et al. (2008)'in Maryland-Dead Run kentsel havzasında yapmış olduğu bir çalışmada geçirgen alanlardaki ağaç örtüsünü %12 den %40 a çıkarılması durumunda birim alandaki toplam yüzey akışının %2,6 oranında azaldığı, geçirimsiz alanlardaki artış miktarlarını belirlemek üzere ise kısa bitki örtüsü ve çıplak toprakla kaplı alan miktarını %30 dan %60 a çıkarılması toplam yüzey akışını %33 oranında arttırdığı ve geçirgen akışı %53 oranında azaldığı sonucuna varmıştır.

Başka bir çalışmada ise; yerleşim alanlarındaki yeşil alan miktarı %10 oranında artırıldığında, yüzey akış miktarının %4,9 oranında azalacağı, ağaç miktarının ise aynı oranda artırılması sonucunda yüzey akış miktarının %5,7 oranında azalacağı tespit edilmiştir(Gill et al., 2007).

Recarga Modeli

RECARGA, akış hacimlerini azaltmak, yer altı sularının yeniden doldurulmasını sağlamak ve göllenme sürelerini tespit etmek amacıyla geliştirilmiş bir yağmur suyu yönetim modelidir. Model yeşil altyapı bileşenleri olarak, bioretention tesislerinin, yağmur bahçelerinin ve infiltrasyon havzalarının performansını belirlemek için kullanılmaktadır(Atchison and Severson, 2004; WDNR, 2020a). Modelleme aracı, çeşitli iklim koşullarına sahip 3 farklı toprak katmanı ve isteğe bağlı olarak tesis edilen drenajlı veya drenajsızbioretention hücrelerinden sızan su miktarını kullanıcı tarafındanbelirlenen yağış ve buharlaşma verilerine göre modellemektedir(Atchison and Severson, 2004). Ayrıca bu model, suyun bioretention hücresi boyunca hareketini kaydederek her fırtına olayı arasındaki toprak nemi ve evapotranspirasyon oranını ölçmektedir(Jayasooriya and Ng, 2014; Boancă et al., 2018). RECARGA modeli kullanılarak yapılan çalışmalarda bioretention hücrelerinin bazı hidrolojik davranışları ölçülmüştür. Örneğin;

Romanya'nın Cluj kentinde RECARGA modeli kullanılarak bioretention hücrelerinin; ticari, endüstriyel, düşük yoğunluklu ve yüksek yoğunluklu konut alanları olmak üzere 4 farklı kentsel sitede ki yüzey akış hidrolojisinin performansı üzerine yapılan bir araştırmada, tek bir yağış olayı (47mm) altında bioretention hücrelerinin normal koşullar altında 24 saatten daha az olması gereken göllenme sürelerini büyük ölçüde azalttığı tespit edilmiştir(Boancă et al., 2018).

Çin'de bir otoyolda bir bioretention hücresinde meydana gelen sızma ve sızan suyun yer altı sularını besleme kapasitesinin ölçüldüğü bir çalışmada ise; bir drenaj tabakasına sahip bioretention hücresinin yer altı sularını besleme oranı %58,29 iken drenaj tabakasına sahip olmayan bioretention hücresinin yer altı sularını besleme oranı %92,27 olarak tespit edilmiştir(Gao et al., 2018).

Kentsel Yağmur Suyu Arıtma ve Analiz Entegrasyonu (Sustain)

SUSTAIN modeli, yağmur suyu ile ilgilenen uzman kişilere yapacakları planlama ve uygulama çalışmalarında rehberlik sağlamak üzere geliştirilmiş, kaynak sularının korunmasında yağmur suyu akışının ve kalitesinin ölçüldüğü ArcGIS tabanlı kentsel yağmur suyu arıtma ve analiz sağlama sistemidir(Anonim, 2013a). Model kentsel havzalardaki akarsularda, hidrolojik ve su kalitesi modellemesi yapmak üzere EPA tarafından geliştirilmiştir. Modelin amacı, yeşil altyapı bileşenlerinin su kaynaklarındaki kirletici yüklerini azalmadaki etkinliğini ölçmek, bu sistemlerin nerelerde ve hangi büyüklükte kullanılacaklarına karar vermek ve ayrıca su kalitesi hedeflerindeki uygun maliyetli çözümlerin neler olduğunu belirlemektir(EPA, 2014b).

Model yeşil altyapı bileşenleri olarak; inşa edilmiş sulak alanlar, bioretention sistemler, yağmur varilleri ve sarnıçlar, yeşil çatılar, gözenekli kaldırımlar, infiltrasyon hendekleri, kuru ve ıslak yağmur hendekleri ve kum filtreleri/şeritleri gibi sistemleri yağmur yönetimi kapsamında modelleyebilmektedir(Jayasooriya and Ng, 2014). Sağladığı tüm faydalarına rağmen yeni geliştirilen modellerden sonra model artık EPA tarafından desteklenmemektedir(EPA, 2014b).

Kentsel Havza Modeli (P8)

P8 Kentsel Havza Modeli, kentsel havzalarda meydana gelen yağmur suyu yüzey akışlarının kirletici madde oluşumunu ve taşınmasını tahmin etmek üzere kullanılan bir modeldir(Palmstrom and Walker, 1990). Model kentsel gelişimler için yüzey akışlarının arıtılması planlamalarında kullanılmak üzere geliştirilmiştir. Sistem tarafından tespit edilen su kalitesi bileşenleri arasında askıda kalan katı maddeler ve çeşitli ağır metaller bulunmaktadır(WDNR, 2020b). Modele, tutma havuzları, sızma havuzları, hendekler ve tampon şeritleri gibi yeşil altyapı bileşenleri entegre edilerek bu sistemlerin yüzey akışlarıyla taşınan kirletici madde yükünü azaltmadaki etkinliği ölçülebilmektedir(Elliott and Trowsdale, 2007). Model saatlik yağış verilerini kullanarak ölçümler yapmakta ve elde edilen sonuçları kullanıcıya tablo formatında sunmaktadır. Tablo içeriğinde kirletici yük birikim oranları, ortalama giriş ve çıkış hacimleri, kirletici madde uzaklaştırma verimliliği, kullanılan yeşil altyapı bileşenleri arasındaki akış karşılaştırması gibi veriler ayrıntılı olarak gösterilmektedir(Jayasooriya and Ng, 2014).

Entegre Kentsel Su Modellemesi (Mike Urban)

Mike Urban modeli, kentsel yağmur ve atık suyu toplama sistemlerinin ve su dağıtım ağlarının modellemesini sağlayan CBS tabanlı entegre yağmur suyu yönetim modelidir(Rangari et L., 2015). Model yeşil altyapı bileşenleri olarak, bioretention hücreleri, geçirgen kaplamalar, yağmur bahçeleri, yeşil çatılar, bitkisel hendekler ve yağmur varilleri gibi DEG bileşenlerini modelleyebilmektedir(Kjølby, 2017). Sistem, yağmur suyu drenaj sistemleri, ayrı veya birleşik kanalizasyon sistemleri ve su dağıtım sistemleri olmak üzere şehirlerdeki tüm su şebekelerini kapsamaktadır(DHI, 2007). Yağmur suyu altyapısı sorunu olan şehirlerde Mike Urban modeli farklı yağmur suyu yönetim modelleriyle entegreli bir şekilde kullanılarak daha sağlıklı bir altyapı ve drenaj sistemi geliştirilmesinde, birleşik kanalizasyon taşmalarının etkilerini azaltmak üzere DEG bileşenlerinin etkinliklerini belirlemede ve yüzey akış yönetiminde faydalanılabilmektedir. Örneğin;

Hindistan'da sürekli sel olaylarının yaşandığı bir bölgede Mike Urban ve SWMM modelleri entegreli olarak kullanılarak kentsel taşkın ve drenaj modellemesi yapılmış ve elde edilen veriler 10 yıllık geri dönüş dönemine sahip verimli bir drenaj ağı tasarlanması için kullanılmıştır(Bisht et al., 2016).

Norveç'in Oslo şehrinde birleşik kanalizasyon taşmalarının etkilerini hafifletmek ve akış hacimleriyle sürelerini azaltmak amacıyla Mike Urban modeline entegre edilmiş yeşil altyapı bileşenlerinden yağmur bahçesi ve yeşil çatı gibi DEG kontrollerinin birleşik kanalizasyon taşmaları üzerindeki etkisi değerlendirilmiştir. Yapılan değerlendirmede yağmur bahçelerinin daha büyük yağış olaylarında birleşik kanalizasyon taşmaları etkilerini azaltmada daha etkili olduğu, yeşil çatıların ise küçük yağış olayları sırasında yararlı olabileceği tespit edilmiştir. Çalışmada geçirimsiz alanların yüzdesi %3,6 azaltılması sonucunda birleşik kanalizasyon hacimlerinde %7 azalma meydana geldiği bildirilmiştir(Hernes et al., 2020).

Singapur da bir yerleşim alanında yağmur suyu yüzey akış yönetiminde DEG bileşenlerinin Mike Urban modeliyle etkinliği araştırılmıştır. DEG bileşenleri kullanılarak yapılan simülasyon çalışmaları, DEG bileşenleri olmadan yapılan çalışmalara göre yüzey akış yönetiminde %21-72 oranında gelişme gösterdiği tespit edilmiştir(Tan et al., 2019).

Kaynak Yükleme ve Yönetim Modeli (WinSLAMM)

WinSLAMM modeli, kentsel yağmur suyu yüzey akışları sonucu taşınan kirletici kaynakları belirlemek ve kirletici madde konsantrasyonunun azaltılmasını sağlamak amacıyla oluşturulmuş kentsel yağmur suyu kalite yönetim modelidir(USGS, 2016). Model, konut,

ticari ve endüstriyel alanlar gibi çeşitli arazi kullanım alanlarındaki çatılar, asfalt alanlar, kaldırımlar, otoparklar, parklar yeşil alanlar vb. gibi geçirimsiz ve geçirgen alanlardan gelen kirletici yükleri simüle etmektedir(CASQA, 2021). Ayrıca model, yağmur suyu yönetim planlamalarında kullanılmak üzere yüzey akışı modellerini kullanmaktadır.

Sistemin kalibre edilebilmesi için önceden çalışma alanının yüzey akış verileri ve kirletici konsantrasyonları ile arazi kullanım özelliklerine bağlı olarak sızdırmazlık yüzdeleri gibi verilerin tespit edilmesi gerekmektedir. Sistem 3 adımda kalibre edilebilmektedir. İlk aşamada tahmini olarak belirlenen akış hacimlerinin kanalizasyon çıkışında tespit edilen değerlerle eşleştirilmesi gerekmektedir. Sonraki aşamada, tahmin edilen katı madde yükleri izleme aşamasında gözlemlenen yüklerle eşleşecek şekilde ayarlanmalıdır. Son olarak ise, çeşitli kirletici madde yükleri sistem tarafından kalibre edilmelidir. Model kullanılacağı çalışma alanlarına kalibre edilmediği takdirde akış ve kirletici yük oranlarında aşırı hatalar oluşmaktadır(USGS, 2016).

WinSLAMM modeli belirli yeşil altyapı bileşenlerini modelleyebilmekte ve bu sistemlerin sermaye ve bakım giderlerini belirleyebilmektedir. Modelleyebildiği yeşil altyapı bileşenleri arasında, hendekler, filtre şeritleri, gözenekli kaplamalar, yağmur bahçeleri, yağmur varilleri ve sarnıçlar yer almaktadır(Pitt and Voorhees, 2004).

Pitt and Voorhees (2009), WinSLAMM modelini kullanarak yeşil altyapı bileşenlerinden yağmur bahçesi ve sarnıçların performans modellemesi üzerinde çalışmalar yaparak yeşil altyapı uygulamalarından önceki mevcut durumla kıyaslama gerçekleştirmiştir.

Alam et al. (2019)' ise; geçirgen kaplamaların hidrolojik performanslarını değerlendirmek üzere WinSLAMM modelini kullanarak modelin yaklaşık %30 hata payında yüzey akış azalmasını tahmin edebileceğini belirtmiştir. Yapılan çalışmada geçirgen beton kaplamaların gözeneklilik oranı %40 artırıldığında %30 daha fazla yüzey akışının depolanabileceğini tespit edilmiştir.

Velasquez (2018) ise; yeşil altyapı uygulamalarının su kalitesi üzerine yaptığı çalışmada WinSLAMM modelinin kirletici madde miktarını tahmin etmede iyi bir performans gösterdiğini belirtmiştir.

Tüm Yaşam Döngüsü Maliyet Modelleme Aracı (Select Werf)

SELECT modeli, yağmur suyu kirliliğinin kontrol edilmesi amacıyla alternatif senaryoların değerlendirildiği ve her bir senaryo ile ilişkili tüm yaşam maliyetinin incelendiği excel tabanlı basit bir planlama aracıdır. Model, çalışma alanının geçirimsizliği ile ilgili bir akış katsayı kullanarak sisteme kaydedilen uzun vadeli yağış verilerini yüzey akışına dönüştürür. Belirlenen yüzey akış verileri kullanılacak olan yeşil altyapı bileşenlerine tanıtılarak sistemde tutulan ve çıkan su miktarına göre kalite analizi yapılır. Sistemden çıkan su verilerine göre, alıcı sulara doldurulan yıllık kirletici madde yükleri ve uygulanan yeşil altyapı bileşenlerinin yaşam maliyetleri tahmin edilir. Model tarafından simüle edilebilen yeşil altyapı bileşenleri arasında, bioretention sistemler, geçirgen kaldırımlar, hendekler, gözetli havuzları ve sulak alanlar yer almaktadır(WERF, 2013).

Smith (2015), SELECT modelini kullanarak Malden nehri havzasında dört farklı yeşil altyapı uygulamasının (bioretention sistemler, geçirgen döşemeler, hendekler ve inşa edilmiş sulak alanlar) su kalite performansı ve maliyet verilerini incelemiştir. Yapılan çalışmada elde edilen veriler yeşil altyapı bileşenlerinden geçirgen döşemelerin diğer sistemlere göre 5 ila 70 kat daha pahalı olduğu, inşa edilmiş sulak alanların ise en uygun maliyetli alternatif bir sistem olduğu tespit edilmiştir.

Yeşil Değerler Ulusal Yağmur Suyu Yönetimi Hesaplayıcısı (CNT)

CNT, bina, mahalle ve ilçe ölçeğinde meydana gelen su baskını gibi doğal felaketlerin önlenmesi amacıyla yeşil altyapı çözümlerinin performansını, maliyetlerini ve faydalarını geleneksel yağmur suyu yönetimi uygulamalarıyla kıyaslamak ve bu alternatiflerin planlanmasına yardımcı olmak için geliştirilmiş bir yağmur suyu hesaplama aracıdır. Hesaplama aracı sayesinde kullanıcılar yeşil altyapı sistemlerini kullanarak yağmur suyu hacimlerini ve yüzey akışlarını azaltma hedeflerini belirleyebilmektedir(CNT, 2006; Jayasooriya and Ng, 2014). Hesaplama aracına dâhil edilebilen yeşil altyapı bileşenleri arasında, yeşil çatılar, yağmur bahçeleri, geçirgen döşemeler, yağmur varilleri ve sarnıçlar, hendekler, bitkisel filtre şeritleri, ağaçlar ve doğal bitki örtüsü yer almaktadır(Jayasooriya and Ng, 2014).

CNT yöntemi kullanılarak yapılan çalışmalar, yeşil altyapı sistemlerinin yağmur suyu yönetimi ve uzun süreli maliyetleri konusunda geleneksel altyapı sistemlerine kıyasla daha etkin bir çözüm olduğunu ortaya çıkarmıştır. Örneğin;

Thiagarajan et al. (2018), CNT yağmur suyu yönetim sistemini kullanarak bir mahalle ölçeğinde 6 farklı yeşil altyapı uygulamasının geleneksel yağmur suyu yönetimi sistemlerine kıyasla yüzey akış yönetimi üzerindeki etkisini belirlemiştir. Yapılan çalışmada mahallenin gelişimi, toprağın sızma oranları, yeşil altyapı sistemlerinin konumları, boyutları gibi mevcut saha verileri sisteme yüklenerek elde edilen sonuçlar yeşil altyapı sistemlerinin sahanın su tutma kapasitesini büyük ölçüde artırdığı tespit edilmiştir.

Başka bir çalışmada ise; Jaffe (2010), geleneksel yağmur suyu yönetimi ile yeşil altyapı sistemlerinin mevcut ve gelecekteki maliyetlerini karşılaştırmak için CNT yöntemini kullanmıştır. Yağmur suyu yönetimi ve sağladığı ek faydalar konusunda yeşil altyapı sistemlerinin hem inşaat maliyetleri hem de 30 yıllık yaşam döngüsü içerisindeki maliyetleri geleneksel altyapılara kıyasla daha uygun maliyetli çözümler olduğunu tespit etmiştir.

Kentsel Yağmur Suyu İyileştirme ve Kavramsallaştırma Modeli (MUSIC)

MUSIC, Avustralya'nın SDKT sistemlerinin analizini yapmak üzere oluşturulmuş, yağmur suyu kalitesinin iyileştirilmesi amacıyla farklı türdeki yeşil altyapı uygulamalarının performans değerlendirmesinin yapıldığı planlama ve tasarım aracıdır(Jayasooriya and Ng, 2014; Anonim, 2019). Model, arazi kullanım değişiklikleri ve kentsel gelişimin su yolları üzerindeki etkisini yönetmek için kullanılmaktadır. Modelleme aracı, yağmur suyu akışlarının depolanması ve tekrar kullanılması, kirletici maddelerin uzaklaştırılması ve akış sıklığının azaltılması amacıyla birden çok yeşil altyapı bileşenlerini modelleyebilmektedir. Modellenebilen yeşil altyapı bileşenleri arasında; bioretention sistemler, infiltrasyon sistemleri, yağmur suyu tankları, sulak alan ve göletler, bitkisel hendekler ve tampon şeritler yer almaktadır(Anonim, 2019).

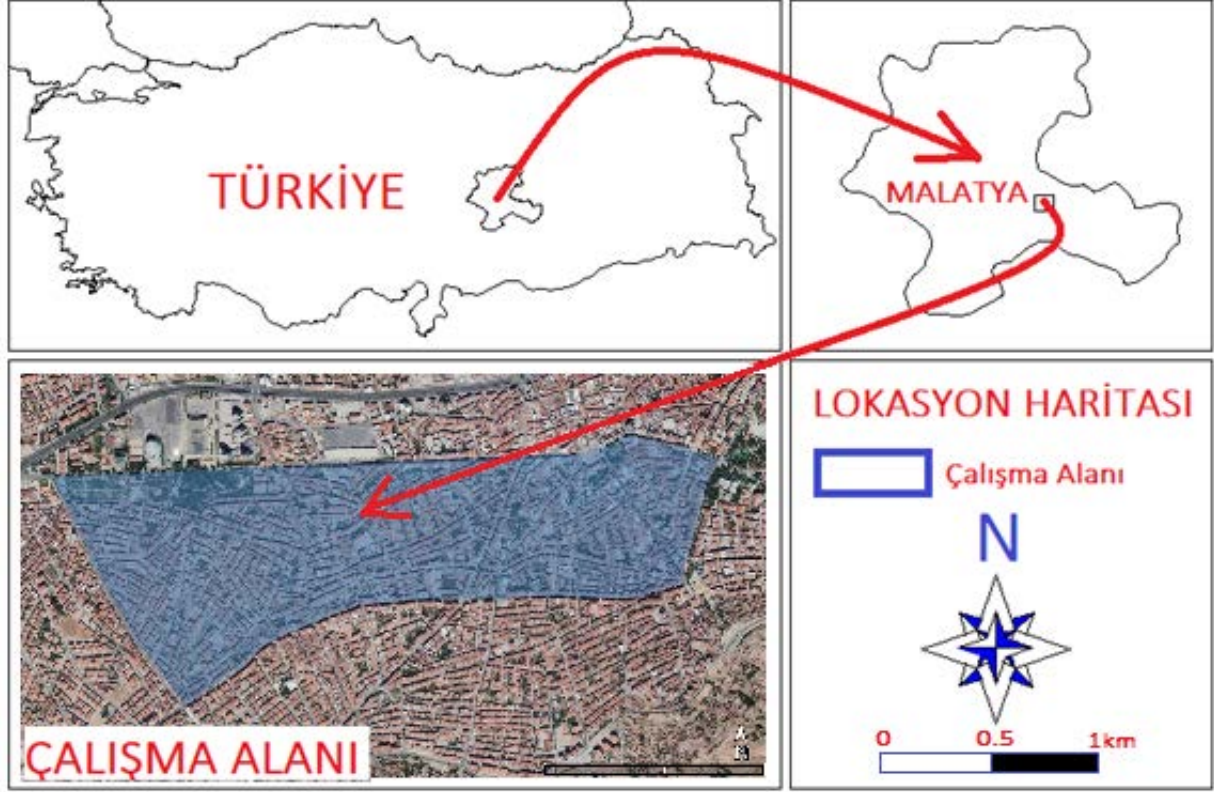
MUSIC, farklı havza türlerinden gelen yüzey akışlarının hem miktarı hem de kalitesini modelleyebilmektedir. Ayrıca kullanıcılara kendi havza türlerini seçme imkânı da sunmaktadır(Imteaz et al., 2013).

MUSIC modeli kullanılarak, Avustralya, İsveç, Yeni Zelanda ve İskoçya gibi ülkelerde farklı olarak inşa edilmiş 3 farklı yağmur suyu arıtma sisteminin (Bioretention sistemler, geçirgen kaplamalar ve çim hendekleri) kirletici maddelerin uzaklaştırılma potansiyeli üzerine yapılan çalışmaların doğruluğu tespit etmek üzere yapılan bir araştırmada, benzer koşullar altında MUSIC modelinin akış hacimlerini yüksek bir doğrulukla modelleyebildiği belirlenmiştir(Imteaz et al., 2013)

MATERYAL VE YÖNTEM

Materyal

Çalışmanın ana materyalini Malatya kent merkezi sınırları içerisinde kalan ve yoğun yapılaşmanın olduğu kentsel bir havza oluşturmaktadır. Konum olarak; 38° 20' 27.31" K enlemi ve 38° 17' 57.78" D boylamı arasında kalan alan, toplam 225,20 hektarlık bir bölgeyi kapsamaktadır. Çalışma alanının lokasyon haritası aşağıdaki şekilde (**şekil 27.**) gösterilmiştir.



Şekil 27. Çalışma alanı

Alan içerisinde; özel konut alanları, resmi daire ve kurumlar, kent ve mahalle parkları, trafik aksını oluşturan otoyollar ve otoparklar ile yaya trafiğini oluşturan kaldırım alanları yer almaktadır. Alan içerisinde bulunan konutlar genellikle 4 ila 6 kattan oluşmakta olup çoğunlukla kiremitten oluşturulmuş geleneksel çatı yapılarına örnek teşkil etmektedir. Nüfus olarak Malatya'nın en kalabalık merkezi iki ilçesi (Yeşilyurt-Battalgazi) sınırlarında yer almakla birlikte ticari faaliyetler yoğun olarak yapılmaktadır. Yapılan ölçümler sonucunda çalışma bölgesi %84,61 geçirimsiz alanlardan (asfalt, beton ve çatı yüzeyleri) ve %15,39 geçirimli yüzeylerden (yeşil alan ve toprak alanlar) oluşmaktadır. İlk etapta çalışma alanı tek bir alan olarak planlanmış daha sonra yağmursuyu drenaj altyapısının konumlarına göre kendi içerisinde 197 alt havzaya ayrılarak inceleme yapılmıştır.

Malatya'nın Konumu

Malatya ili konum olarak, Doğu Anadolu Bölgesi'nin yukarı Fırat bölümünde, 38 21 kuzey enlemleriyle 38 18 doğu boylamları arasında yer almaktadır. 998 metre yükseltiye sahip olan şehrin çevresi; batıda Kahramanmaraş, doğuda Elâzığ ve Diyarbakır, Güneyde Adıyaman ve kuzeyde Sivas ve Erzincan illeri ile çevrilidir. Türkiye'nin 30 büyükşehir belediyesinden biri olup 2021 yılı adrese dayalı yapılan nüfus kayıt verilerine göre 81 il içerisinde 808.692 nüfusu ile 28. sırada yer almaktadır. Artan nüfus oranları şehrin sürekli

olarak gelişmesine ve yapılaşmaya bağlı olarak geçirimsiz alanların artmasına neden olmaktadır. TÜİK verilerine göre şehrin nüfusu son 10 yılda 46 binden fazla artış göstermiştir. Nüfus artış hızı ise son 10 yılda %6,07 olarak gerçekleşmiştir. Aşağıdaki tabloda (Tablo 7.) 2012-2021 yılları arasındaki adrese dayalı nüfus sayıları ve yıllık nüfus artış hızı (%) gösterilmiştir.

Tablo 7. 2012-2021 yılları arasındaki Malatya ili nüfus sayısı ve yıllara göre nüfus artış hızı.

YILLAR	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
NÜFUS SAYISI	762.366	762.538	769.544	772.904	781.305	786.676	797.036	800.165	806.156	808.692
NÜFUS ARTIŞ HIZI %	0.58	0.02	0.92	0.44	1.09	0.69	1.32	0.39	0.75	0.31

İklim ve Bitki Örtüsü

Malatya ili; Doğu Anadolu, İç Anadolu ve Güneydoğu Anadolu Bölgesi karasal yağış rejimiyle Akdeniz Bölgesi denizel yağış rejimi arasında bir geçiş alanı içerisinde yer almaktadır. Her ne kadar Doğu Anadolu Bölgesinde yer almaktaysa da yer yer Akdeniz Bölgesi'nin iklim özelliklerini göstermesinden dolayı daha az bir karasal iklim özelliğine sahiptir. Yıl içerisinde yağış miktarı genel itibarıyla %35 oranında ilkbahar ve %34 oranında kış aylarında yoğunlaşırken, yaz aylarında ise %7 oranla en az miktara düşmektedir. Bitki örtüsü olarak Malatya ili, İrano-Turaniyenfitocoğrafya% bölgesi içerisinde yer alan ve ağaçsız olan gerçek step alanını oluşturmaktadır. Bölgede kuraklığa ve soğukluğa dayanıklı olan meşe ve sarıçam ağaç türleriyle; püskül otu, kekik, sütlegen ve yumak gibi otsu bitkiler yaygın olarak yer almaktadır. Dere ve su kenarlarında ise, kavak, söğüt, yabani gül, iğde, böğürtlen ve sumak gibi bitkiler yaygın olarak bulunmaktadır(KTB, 2019b).

Malatya ili karasal iklim özellikleri göstermesine karşın zaman zaman şiddetli yağışlara maruz kalmakta ve sonucunda sel olaylarına şahit olunmaktadır. Bunun en yakın örneği çalışma periyodundan hemen sonra 14 Haziran 2022 tarihinde meydana gelen ve 10.00 ila 22.00 saatleri arasında etkili olan sağanak yağışların meydana getirdiği ve çevresel zarara neden olan sel olayı gösterilmektedir(İHA, 2022). Bunun haricinde yakın zamanda 10.08.2021 tarihinde meydana gelen ve yaklaşık 20 dakika etkili olan sağanak yağış kısa süre etkili olmasına rağmen hayatı olumsuz yönde etkilemeyi başarmıştır(Anonim, 2021d). Daha geçmiş yıllarda da çeşitli sel olayları yaşandığı gibi önlem alınmadığı sürece gelecek yıllarda da aynı şekilde çevresel felaketler yaşanmaya devam edecektir. Yaşanan bu olaylar aynı zamanda sürdürülebilir sistemlere olan ihtiyacın ve bu konuda yapılan çalışmaların ne denli önemli olduğunu da ortaya koymaktadır.

Yağmur suyunu sadece hayatı olumsuz yönde etkileyen bir bileşen olarak düşünmek de hatalı bir yaklaşım olacaktır. Bu sular uygun koşullarda depolanıp çeşitli amaçlar için kullanılmasıyla önemli derecede su tasarrufu sağlamaktadır. Özellikle tarımsal alanların sulanmasında genellikle yer altı su kaynaklarının kullanıldığı ve bu yer altı su kaynaklarının ise yağmur suları ile beslendiği düşünüldüğünde farklı ortamlarda depolanan yağmur sularının da tarımsal faaliyetler için uygun olacağı sonucu ortaya çıkmaktadır. Bu sebeple tarımsal alanlar için sürekli olarak yeni projeler hayata geçirilmekte ve üretim süreçleri için ana materyalini oluşturmaktadır. Malatya'daki tarımsal faaliyetler göz önünde bulundurulduğunda son 19 yılda yapılan 10 sulama tesisiyle 405.160 dekarlık bir alan sulamaya açılarak tarımsal faaliyetler desteklenmektedir. Gelecekte meydana gelebilecek bir kuraklık ve su kaynaklarının azalması sürdürülebilir sistemlerin tarımsal alanlarda kullanımını da yaygınlaştıracaktır. Özellikle yağmur suyunun depolanmasıyla elde edilen suyun tarımsal alanlarda kullanılmasıyla önemli derecede bir su tasarrufu sağlanmış olacaktır(DSİ, 2022).

Toprak Yapısı

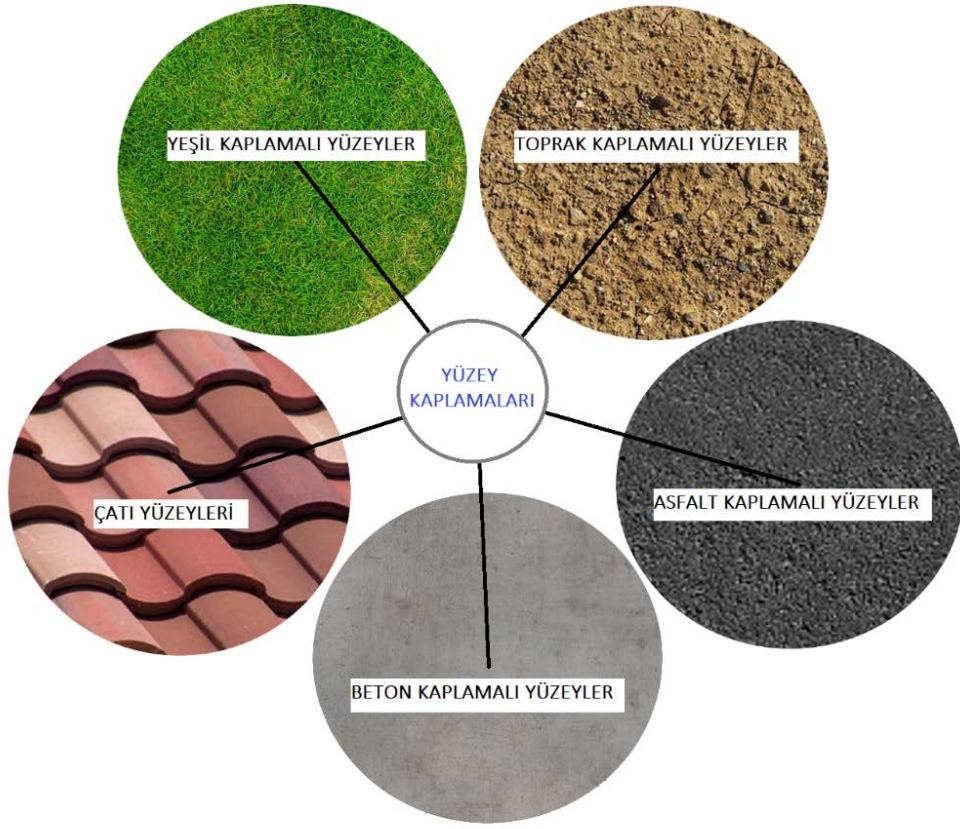
Malatya ilinde genel olarak tüm büyük toprak türlerine rastlanmak mümkündür. Yükseltinin 1000-2000 metre arasında olduğu ve yıllık yağış ortalamasının 780 mm üzerinde kalan alanlarda yaşlı kireç taşlarının üzeri koyu renkli ve organik materyal yönünden zengin, kahverengi orman toprakları ile kaplanmıştır, orman örtüsünün hemen altında ve yıllık yağış ortalamasının 600mm civarında olan alanlarda ise, kireçsiz kahverengi orman toprakları yaygın olarak bulunmaktadır. İlde nitelik açısından en önemli toprak grubunu ise alüvyonlu topraklar oluşturmaktadır. Bu toprak grubu Malatyaovası ve bu ovanın devamı niteliğinde olan ve yıllık yağış ortalamasının yaklaşık 400mm olduğu düzlüklerde vadilerin tabanında birikmiş olarak bulunmaktadır. Ovaların hemen çevresindeki eğimi az olan alanları ise kolüvyol topraklar oluşturmaktadır. Bu topraklar dışında küçük bir alanda ise kırmızı Akdeniz toprakları ile hidromorfik alüvyonlu topraklara da rastlanmaktadır. İl merkezinde genel olarak, kahverengi topraklar ile kireçsiz kahverengi topraklar yoğun olarak bulunmaktadır. Aşağıdaki tablo(**Tablo 8.**) il genelinde görülen toprak türleriyle kapladıkları alanları göstermektedir(KTB, 2019a).

Tablo 8. İlde görülen toprak türleri ve kapladığı alanlar(Dizdar, 2003).

TOPRAK TÜRLERİ	YÜZDELİK ORANI	KAPLADIĞI ALAN
Kahverengi Topraklar	%41.5	513 200 ha
Kırmızımsı Kahverengi Topraklar	%17.3	212 500 ha
Kireçsiz Kahverengi Topraklar	%11.5	141 600 ha
Kireçsiz Kahverengi Orman Toprakları	%10.4	128 400 ha
Kahverengi Orman Toprakları	%4.9	60 000 ha
Bazaltik Topraklar	%6.1	75 100 ha
Alüvyal Topraklar	%1.6	20 200 ha
Kolüvyal Topraklar	%2.5	31 200 ha

Yüzey Kaplama Türleri

Çalışma alanı içerisinde yağmur sularının toprağa geçişine izin veren ve geçirimli yüzeyler olarak tabir edilen alanlar, yeşil ve toprak alanlarla kaplı yüzeyler olmak üzere iki gruba ayrılarak; yağmur sularının toprağa geçişini engelleyen, çoğunlukla yüzey akışlarına sebep olan ve geçirimsiz yüzeyler olarak tabir edilen alanlar ise beton, asfalt ve çatı yüzeyleri olmak üzere temel 3 gruba ayrılarak inceleme yapılmıştır. Yapılan ölçümler sonucunda çalışma alanının %12,76'sı yeşil alanlarla kaplı yüzeylerden ve %5'i toprakla kaplı yüzeylerden olmak üzere toplam %17,76 oranında geçirimli yüzeylerden oluşmaktadır. Yine yapılan ölçümler neticesinde çalışma alanının %48,61'i kiremit ile kaplı geleneksel çatı yüzeylerden, %33,63'ü ise geleneksel beton ve asfalt yüzeylerden olmak üzere toplam %82,24 oranında geçirimsiz yüzeylerden oluşmaktadır. Aşağıdaki şekil(**şekil 28.**) bu kaplama türlerine örnek olarak verilmiştir.



Şekil 28. Geçirimli ve geçirimsiz yüzey kaplama türleri. Üstteki 2 şekil geçirimli yüzey kaplamalarına, alttaki 3 şekil ise geçirimsiz yüzey kaplamalarına örnek olarak verilmiştir.

Geçirimli ve geçirimsiz her bir yüzeyin bilimsel çalışmalarla belirlenmiş bir akış katsayısı bulunmaktadır. Bu katsayılar yapılan çalışmada büyük önem arz etmektedir. Aşağıdaki tabloda **(Tablo 9.)** bu katsayılar gösterilmiştir.

Tablo 9. Yüzey kaplamalarına göre akış katsayıları. Thompson (2006); Ardicioglu (2018)’den uyarlanmıştır.

Yüzey Kaplamaları	Akış Katsayıları
Yapılaşmış Alanlar	
Asfalt ve Beton Yüzeyler	0,70-0,95
Tuğla Yüzeyler	0,70-0,85
Çatı Yüzeyleri	0,75-0,95
Çimle Kaplı Kumlu Toprak Alanlar	
Düz %2 Eğimli	0,05-0,10
Orta %2-7 Eğimli	0,10-0,15
Dik, %7 Eğimli	0,15-0,20
Çimle Kaplı Ağır Toprak Alanlar	
Düz, %2 Eğimli	0,13-0,17
Orta, %2-7 Eğimli	0,18-0,22
Dik, %7 Eğimli	0,25-0,35

Tabloda, yüzey kaplamalarına göre belirlenen akış katsayıları dikkate alındığında, yapılaşmış alanların çok yüksek bir oranda akış katsayısına sahip olduğu, çimle kaplı alanların ise yapılaşmış alanlara kıyasla nispeten daha düşük bir akış katsayısına sahip olduğu, eğim arttıkça akış katsayısının ve buna bağlı olarak da yüzey akışların arttığı yorumlanmaktadır.

Yöntem

Yöntem olarak birbiriyle entegrasyonlu çalışabilen çift aşamalı bir yöntem belirlenmiştir. Birinci yöntem olarak ArcGIS modeli tercih edilmiş ve alana ait istatistiksel veriler ve alan kullanım özellikleri bu model tarafından belirlenmiştir. İkinci ve asıl yöntem olarak USEPA (Amerika Birleşik Devletleri Çevre Koruma Ajansı) tarafından geliştirilen ve dinamik bir yağış-akış simülasyonu olan SWMM adlı yağmur suyu yönetim modeli (YSYM) tercih edilmiştir. Modelin tercih edilme sebebi sistem tarafından kullanılan Düşük Etkili Gelişim (DEG) bileşenlerinin etkinlikleri akademik ve bilimsel çalışmalarla doğrulanmış olması ve farklı bir uygulamaya gerek duymadan bu sistemlerin çeşitli senaryolar geliştirerek model tarafından etkinliklerinin hesaplanabilmesidir. Bu konuda yapılan güncel bilimsel çalışmalarda şu sonuçlar elde edilmiştir.

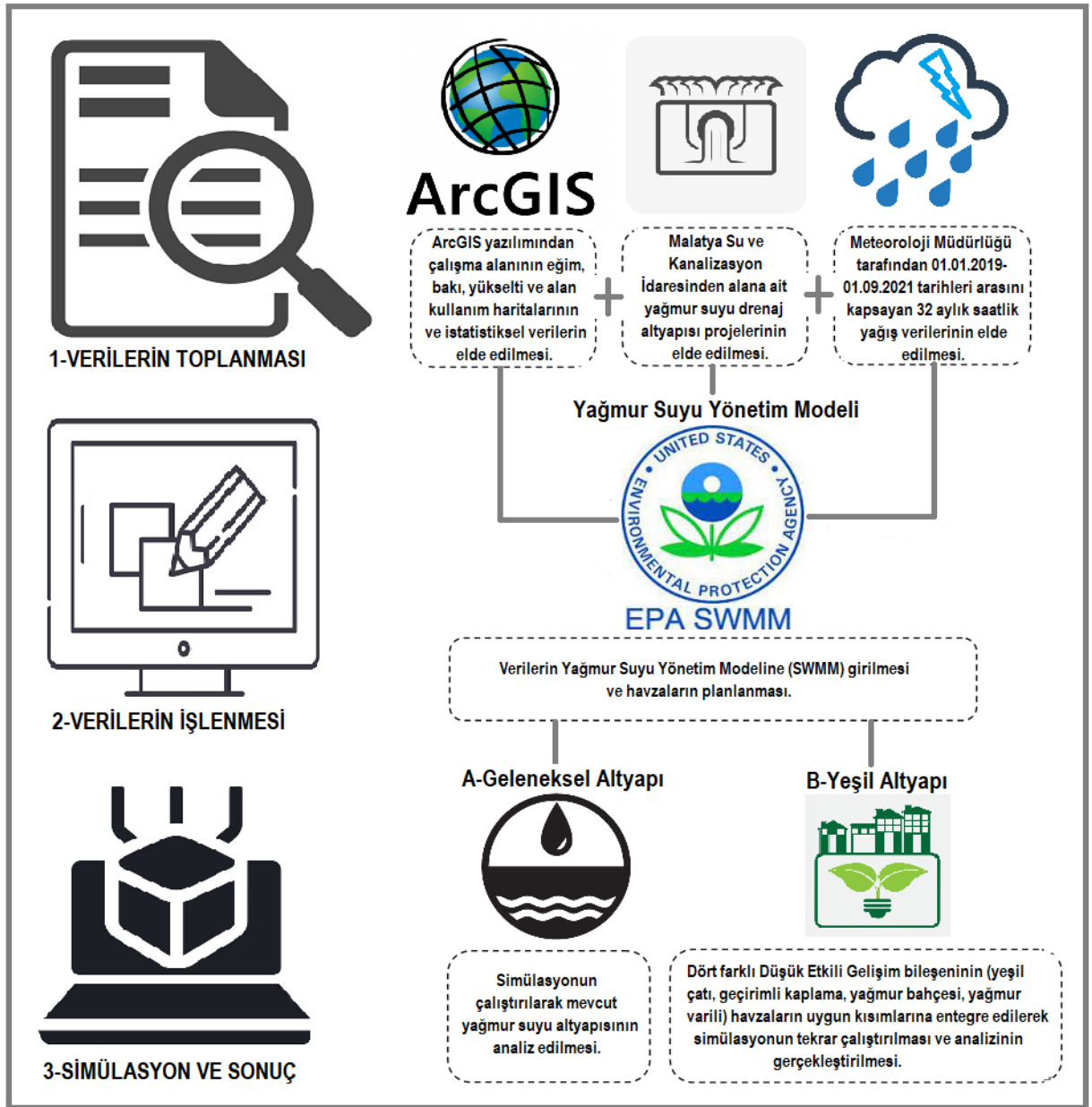
Kentleşmiş alanlarda Düşük Etkili Gelişim (DEG) bileşenlerinin etkinliklerinin araştırıldığı SWMM tabanlı bir çalışmada, yeşil çatı, geçirgen kaldırımlar ve biyolojik tutma hücrelerinin bir kombinasyonu şeklinde uygulanan bir senaryoda bu sistemlerin 10 yıllık bir geri dönüş periyodunda maksimum akışları %56,02 oranında azalttığı tespit edilmiştir (Ekmekcioğlu et al., 2021).

Düşük Etkili Gelişim bileşenlerinden yağmur varillerinin kentsel taşkın yönetimi konusunda araştırıldığı SWMM tabanlı bir çalışmada ise, geri dönüş süresi 10 yıl olan taşkınların etkilerinin uygun boyutlarda yağmur varillerinin kullanılmasıyla en az %40 oranında azaltılabileceği tespit edilmiştir (Samin et al., 2022).

Düşük etkili gelişim (DEG) bileşenlerinin geleneksel altyapı sistemlerine kıyasla maliyetinin araştırıldığı SWMM tabanlı başka bir çalışmada ise; Biyolojik filtreleme kanalları, sızma hendekleri ve geçirgen kaplamalarla planlanmış bir yerleşim bölgesinin geleneksel altyapı sistemlerine kıyasla uygulanan senaryolara bağlı olarak %20 ila %96 arasında daha düşük maliyetli olabileceği tespit edilmiştir (Garbanzos, 2022).

Çalışmada İzlenen Yöntem Akış Şeması

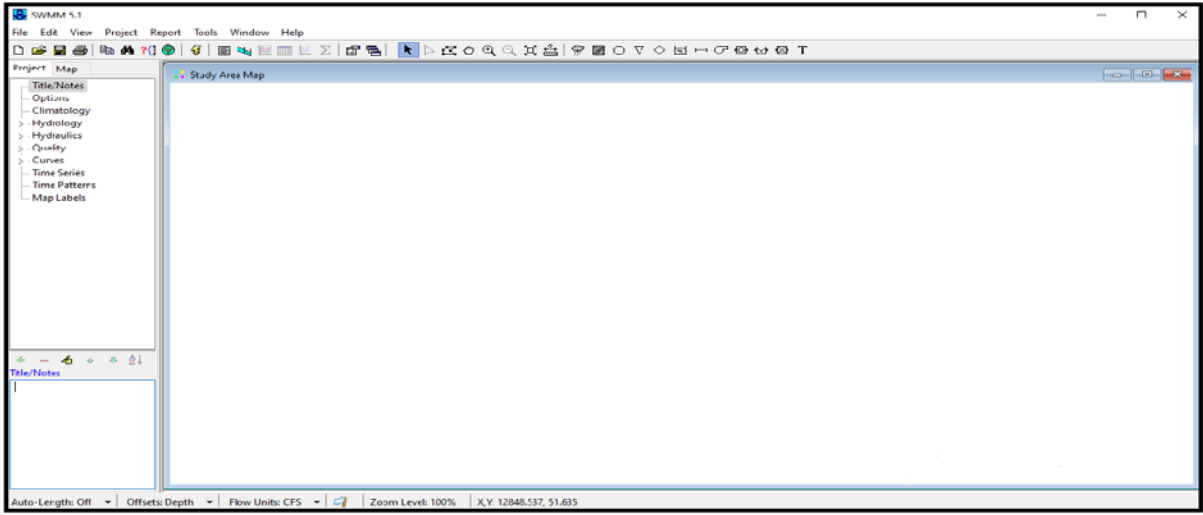
Yapılan çalışma 3 aşamadan gerçekleştirilmiş olup birinci aşamada alana ait veriler (alanın yüksek çözünürlüklü ortofoto görüntüsü, alanın mevcut yağmursuyu drenaj altyapı projesi ve alana çalışma dönemi periyodunda düşen saatlik yağış miktarı) çeşitli kurumlardan elde edilmiş ve ArcGIS yazılımında işlenmiştir. İkinci aşamada elde edilen ve işlenen veriler Yağmur Suyu Yönetim Modeline (SWMM) manuel olarak girilmiş ve alan planlanması yapılmıştır. Üçüncü aşamada elde edilen verilerle ilk başta mevcut altyapının analizi yapılmak üzere simülasyon çalıştırılmış ve yüzey akışları tespit edilmiştir. Üçüncü aşamanın ikinci kısmında havzaların uygun kısımlarına belirli oranlarda 4 farklı Düşük Etkili Gelişim (DEG) bileşeni entegre edilip çeşitli simülasyonlar gerçekleştirilerek DEG bileşenlerinin yağmur suyu yüzey akışlarını azaltma potansiyeli değerlendirilmiştir.(Şekil 29.)



Şekil 29. Yöntem Akış Şeması.

Yağmur Suyu Yönetim Modelinin (SWMM) Tanıtımı

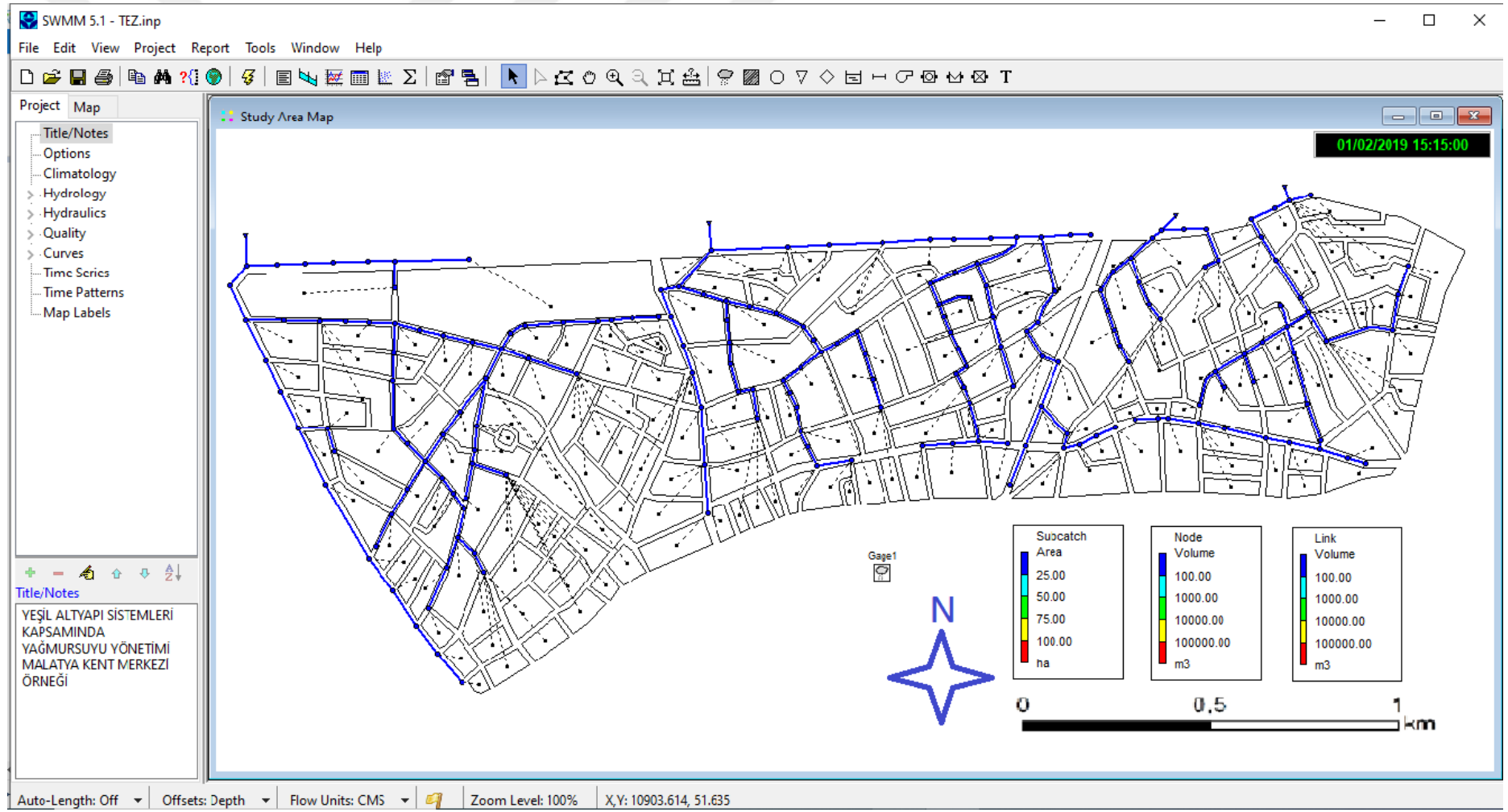
Yağmur Suyu Yönetim Modeli (SWMM), Amerika Birleşik Devletleri Çevre Koruma Ajansı (USEPA) tarafından kentsel alanlardaki yağış miktarı ve kalitesi yönetimindeki ihtiyacı karşılamak üzere 1971 yılında kamuya açık bir yazılım olarak geliştirilmiştir. Bu tarih aynı zamanda ABD’de temiz su yasasının yürürlüğe girmesiyle aynı tarihe denk gelmektedir (Huber et al., 1988). Daha sonra farklı tarihlerde çeşitli sürümleri çıkararak Düşük Etkili Gelişim bileşenlerine daha fazla yer verilmeye başlanmıştır. Aşağıdaki şekilde (şekil 30.) Yağmur Suyu Yönetim Modelinin (SWMM) ana ekran görüntüsü yer almaktadır.



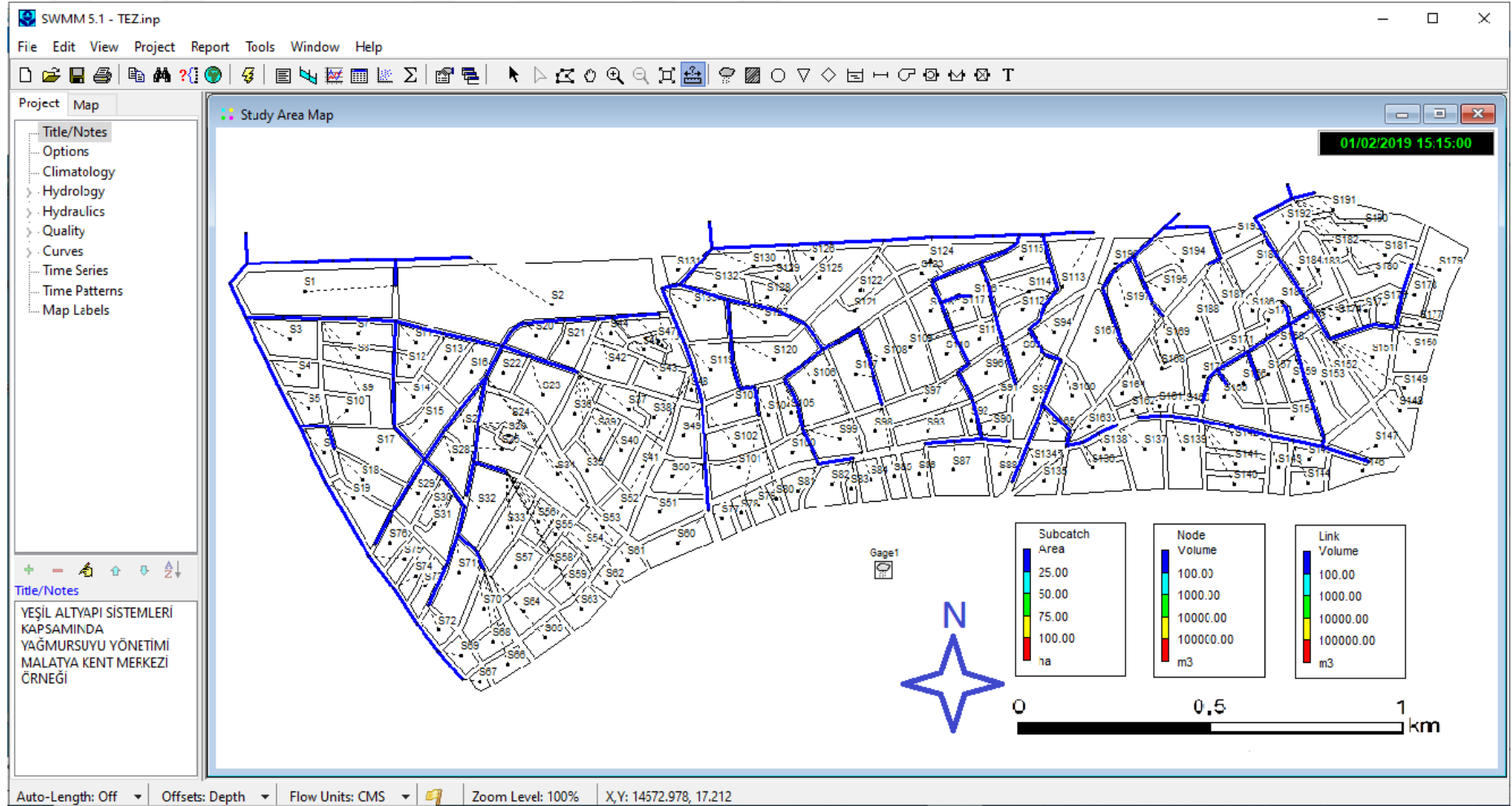
Şekil 30. Yağmur Suyu Yönetim Modeli (SWMM 5.1) ana ekran görüntüsü.

Model sisteme girilen kısa ve uzun süreli gerçek yağış verilerini kullanarak alanın yüzeysel akışlarını simüle etmektedir. Yağmur suyu yüzey akışlarının belirlenmesinde bilimsel çalışmalarla doğruluğu kanıtlanmış bir modeldir. Model ayrıca sisteme dâhil edilen Düşük Etkili Gelişim (DEG) bileşenlerinin etkinliğini ölçmeye imkân sağlayan en kullanışlı modellerden biridir. Hâlihazırda yağmur bahçeleri, yeşil çatılar, biyolojik filtreleme (bioretention) hücreleri, geçirimli kaplamalar, yağmur varilleri, bitkisel hendekler, sızdırma hendekleri ve çatı bağlantısının kesilerek yeşil alana yönlendirilmesi olarak 8 farklı DEG bileşenini modelleyebilmektedir (L. A. Rossman, 2010).

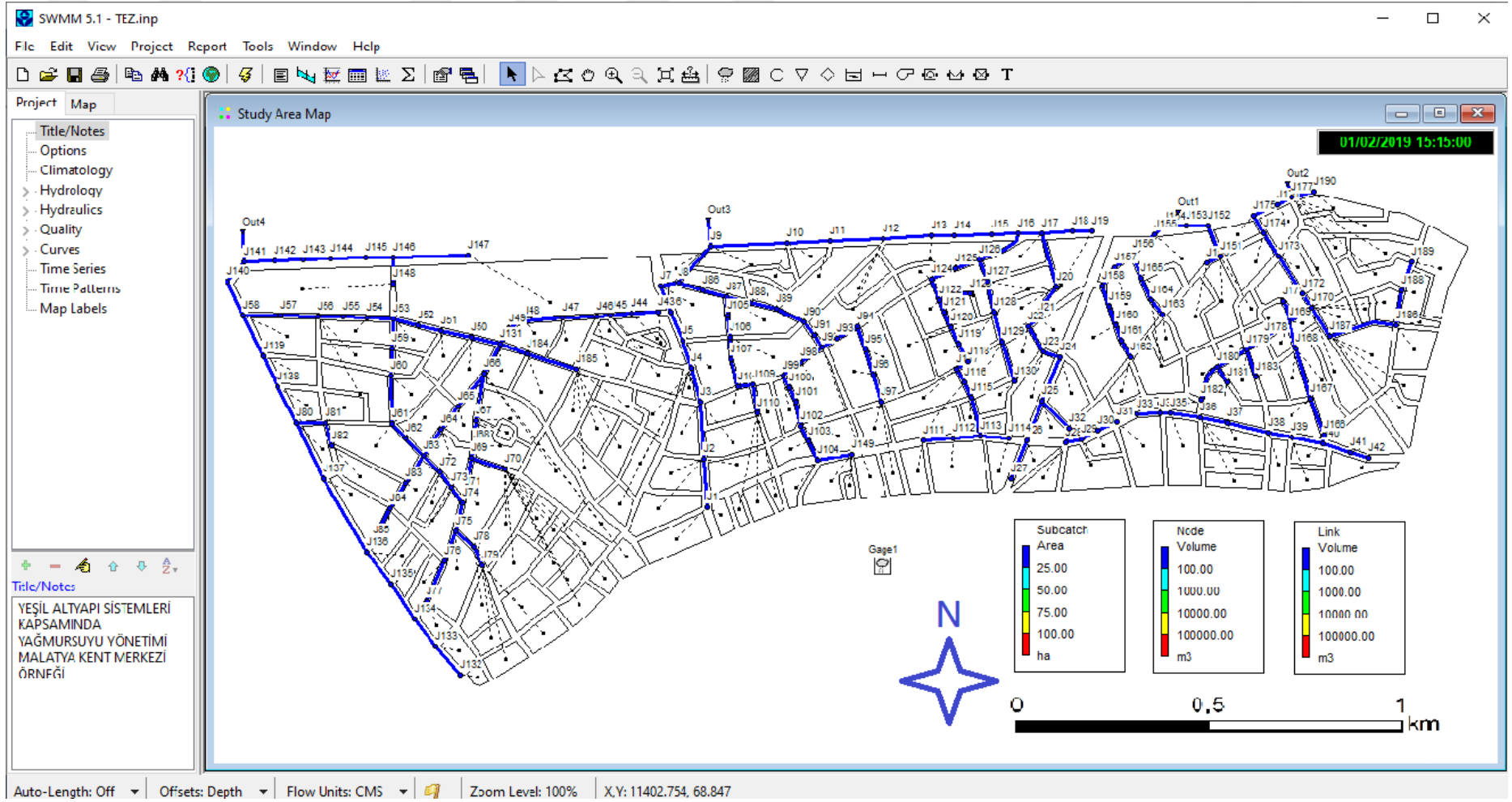
Model üzerinde planlama yapılırken öncelikle çalışma alanının yüksek çözünürlüğe sahip ortofoto görüntüsüyle mevcut yağmursuyu drenaj altyapı verileri sisteme yüklenmiş ve alan yağmur suyu drenaj kanallarının ve yapı adalarının konumlarına göre 197 alt havzaya (Subcatchment) ayrılmıştır. Daha sonra 197 alt havzaya ayrılan tüm alanların alan kullanım özellikleri (alanların miktarları, genişlikleri, eğimleri, geçirimli ve geçirimsiz alan yüzdeleri) ArcGIS yöntemi kullanılarak belirlenmiş ve elde edilen veriler sisteme manuel olarak girilmiştir. Tüm havzalara ait geçirimli ve geçirimsiz alanların manning'in N değerlerinde ise sistem tarafından oluşturulmuş değerler kullanılmıştır. Daha sonra Malatya Su ve Kanalizasyon İdaresi Başkanlığı tarafından elde edilen mevcut yağmur suyu altyapı verileri (kavşak düğümlerinin (junctionnode) konumları, yükseltileri (invert elevation) ve derinlikleri; boru bağlantıların (conduit) uzunlukları ve maksimum derinlikleri; çıkış düğümlerinin (outfall) yükseltileri) program üzerinde mevcut konumlarına yerleştirilerek ilgili değerler yine manuel olarak sisteme girilmiştir. Son olarak Malatya Meteoroloji Bölge Müdürlüğünden temin edilen ve 01.01.2019 ila 01.09.2021 tarihleri arasında kapsayan 32 aylık saatlik yağış verileri bir dosya haline dönüştürülerek programa yüklenmiş ve veriler programda yer alan yağmurölçere (raingage) atanarak çalışma planı tamamlanmıştır. Çalışma planı tamamlandıktan sonra herhangi bir Düşük Etkili Gelişim Bileşeni kullanılmadan simülasyon çalıştırılmış ve mevcut altyapının ilgili yağış verilerine göre yüzey akışları tespit edilmiştir. Daha sonra her bir alt havzaya belirli oranlarda Düşük Etkili Gelişim (DEG) bileşenleri entegre edilerek çeşitli senaryolar geliştirilmiş (**Bknz: Araştırma Bulguları**) ve simülasyonlar tekrar edilerek DEG bileşenlerinin yüzey akışları hangi oranlarda azalttığı tespit edilmiştir. Aşağıdaki şekillerde SWMM programında oluşturulmuş alanın planlı görüntüleri yer almaktadır. Şekillerden (**şekil 31.**) alanların kimlik numaralarının yer almadığı planlı görüntüsü, (**şekil 32.**) alanların alt havza (subcatchment) düğümlerinin yer aldığı planlı görüntüsü, (**şekil 33.**) alanların kavşak düğümleri (junctionnode) ve çıkış düğümlerinin (outfall) yer aldığı planlı görüntüsü ve (**şekil 34.**) alanların kanal düğümlerinin (conduit) yer aldığı planlı görüntüsünü göstermektedir.



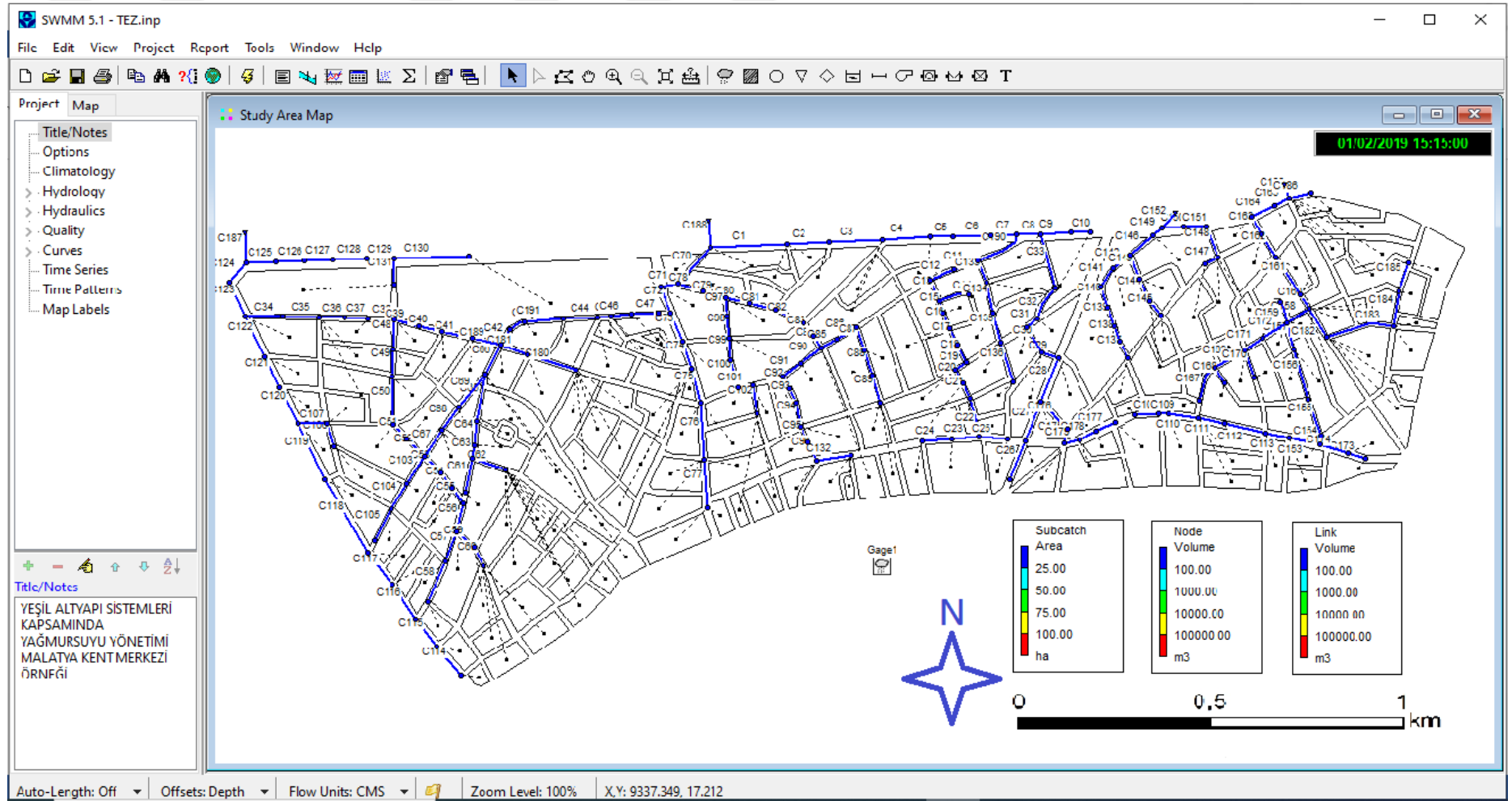
Şekil 31. Yağmur Suyu Yönetim Modelinde (SWMM) oluşturulmuş ve kimlik numaralarının yer almadığı alanın planlı görüntüsü.



Şekil 32. Alanların alt havza düğümlerinin (S1, S2, S3.....S197) yer aldığı planlı tasarımı. S=Subcatchment olarak temsil edilmektedir.



Şekil 33. Alanların kavşak düğümlerinin (J1, J2, J3.....J190) ve çıkış düğümlerinin (Out1, Out2, Out3, Out4) yer aldığı planlı tasarımı. J=JunctionNode ve Out= Outfall olarak temsil edilmektedir.



Şekil 34. Alanların kanal kimliklerinin (C1, C2, C3.....C183) yer aldığı planlı tasarımı. C=Conduit olarak temsil edilmektedir.

Model içerisinde suyun toprağa sızmasını belirlemek amacıyla 5 farklı infiltrasyon modeli bulunmaktadır. Bunlar; Horton, Düzeltilmiş Horton, Green-Amp, düzeltilmiş Green-Amp ve Eğri numarası metodlarıdır. Yapılan çalışmada infiltrasyon modeli olarak Değiştirilmiş Green-Amp modeli tercih edilmiştir. Modelin tercih edilmesinin sebebi; çeşitli saha alanlarında kullanımının kolay ve sade olmasıdır. Ayrıca yağış-akış modellemelerinde suyun toprağa sızmasını hesaplamada toprağın doygunluk seviyesine göre hesaplama yaptığı için daha doğru sonuçlar vermektedir (L. A. Rossman, 2010)

Değiştirilmiş Green-Amp Denklemleri

Değiştirilmiş Green-Amp modeli orijinal Green-Amp modelinin bazı özelliklerinin değiştirilmesi sonucu oluşturulmuş bir modeldir. Değişiklik olarak Mein and Larson (1973) tarafından önerilen değişiklikler formüle edilmiştir. Orijinal modelden farklı olarak düşük yağışlı ilk dönemlerde toprağın üst yüzey tabakasındaki nem miktarını düşürmeyerek toprağın doygunluk seviyesine göre sızmayı hesaplamaktadır (L. A. Rossman, 2010).

SWMM tarafından DEG bileşenlerinin simülasyonu için kullanılan Değiştirilmiş Green-Amp modeli aşağıdaki 3 denklemle ifade edilir. **1. denklemde** toprağın infiltrasyon oranını tahmin etmek üzere f_1 denklemi kullanılmıştır (L. A. Rossman et al., 2016).

$$1-f_1 = K_{S1} \left(1 + \frac{(\phi - \theta_1)(d_1 + \psi_1)}{F} \right)$$

Bu denklemde;

f_1 = İnfiltrasyon oranı (ft/s),

K_{S1} = Toprağın doymuş hidrolik iletkenliği (ft/s),

θ_1 = Torpak tabakasının üstündeki nem içeriği,

ψ_1 = Toprağın infiltrasyon cephesindeki emme yüksekliği (ft)

F = Birim alan başına düşen kümülatif sızma hacmi (ft) olarak tanımlanmaktadır.

2. denklemde; suyun toprak katmanından depolama katmanına infiltrasyon oranını tahmin etmek üzere f_2 denklemi Darcy yasasına göre tahmin edilmiştir (L. A. Rossman et al., 2016).

$$2-f_2 = \begin{cases} K_{S2} \exp(-HCO(\phi - \theta_2)), & \theta_2 > \theta_{FC} \\ 0, & \theta_2 \leq \theta_{FC} \end{cases}$$

Bu denklemde ise;

f_2 = Toprağın infiltrasyon hızı,

K_{S2} = Toprağın doymuş hidrolik iletkenliği (ft/s),

θ_2 = Toprak tabakasının üstündeki nem içeriği,

HCO = Nem tutma eğrisi verilerinden türetilmiş olan bir bozunma sabitidir.

θ_{FC} = Toprağın alan kapasitesinin nem içeriği olarak ifade edilir.

Bu denklemde; θ_2 yani toprak tabakasının nem içeriği, θ_{FC} 'nin altına düşerse infiltrasyon oranı sıfır olmaktadır.

3. denklemde ise; depolama alanından doğal toprak alanına sızmayı tahmin etmek üzere f_3 denklemi çözümlenmiştir (Baek et al., 2020; L. A. Rossman, Huber, W. C., 2016).

$$3-f_3 = \begin{cases} f_2 - \phi_2 \frac{\partial d_2}{\partial t}, & f_3 < K_3 \\ K_{S3}, & f_3 \geq K_3 \end{cases}$$

Bu denklemde ise;

f_3 = İnfiltrasyon hızı,

ϕ_2 = Depolama tabakasının boşluk oranı,

d_2 = Depolama tabakasındaki su derinliği(cm),

K_{S3} = Toprağın doymuş hidrolik iletkenliği(ft/s) olarak ifade edilir.

SWMM modelinde ayrıca suyun yağmursuyu drenaj kanallarından akışını yönlendirmek üzere 2 farklı dalga modeli bulunmaktadır. Bunlar; Kinematik ve Dinamik dalga modelleridir. Çalışmada dalga modeli olarak Dinamik dalga modeli tercih edilmiştir. Dinamik dalga modelinin tercih edilme sebebi, kanallarda biriken suyun maksimum seviyesini aştığında kanal üzerinde biriken suyun basınç oluşturma etkisini ve sisteme giren ve çıkan su kayıplarını hesaba katmasıdır. Ayrıca bu dalga modeliyle durgun su etkileri ve akışların tersine çevrilmesi gibi parametreler göz önünde bulundurulmaktadır. Bu nedenle sayısal kararlılığı korumak üzere daha küçük zaman aralıklarına göre hesaplama yapıldığından dolayı daha hassas sonuçlar vermektedir(L. A. Rossman, 2010).

Dinamik Dalga Teoremi

SWMM modeline entegre edilmiş Dinamik dalga modeli Saint Verant denklemlerine göre hesaplanmaktadır. Saint-Verant denklemleri aşağıdaki şekildedir(L. A. Rossman and Supply, 2006).

1-Süreklilik Denklemi: $\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0$

2-Momentum Denklemi: $\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial (\frac{Q^2}{A})}{\partial x} + gA \frac{\partial H}{\partial x} + gAS_f + gAh_L = 0$

Yukarda belirtilen denklemde; x kanal boyu mesafesini, t zamanı, A kesit alanını, Q akış hızını, H borudaki suyun hidrolik yüksekliğini, S_f sürtünme eğimini yani birim uzunluk başına yük kaybını, h_L birim uzunluk başına yerel enerji kaybını ve g yerçekimi ivmesini ifade etmektedir.

İki veya daha fazla kanalın birbiriyle bağlantılı olduğu kanallarda kanal ağını analiz ederken ek bir süreklilik ilişkisine gerek duyulmaktadır. SWMM’de kanal ağı analiz edilirken bağlantı düğümleri arasında damlalar meydana gelebilmektedir bu durumda düğümdeki hidrolik yükündeki zamana bağlı değişiklik aşağıdaki şekilde tanımlanmaktadır;

3-Ek Süreklilik Denklemi: $\frac{\partial H}{\partial t} = \frac{\Sigma Q}{A_{store} + \Sigma A_s}$

Yukarıdaki denklemde; A_{store} düğümün kendi yüzey alanını, ΣA_s kanallarda düğüme bağlanan yüzey alanını, ΣQ düğüme gelen net akışı ifade eder.

Yukarıda (1), (2) ve (3) olarak belirtilen Saint-Verant denklemleri SWMM tarafından her kanaldaki akışı ve yükü sonlu farklar şemasıyla çözümlemektedir. İlk olarak SWMM tarafından her kanal için akış hesaplanmaktadır. Hesaplama kullanılan akış denklemi ise şu şekildedir;

Denklem A $Q_{t+\Delta t} = \frac{Q_1 + \Delta Q_{yerçekimi} + \Delta Q_{eylemsizlik}}{1 + \Delta Q_{sürtünme} + \Delta Q_{kayıp}}$

ΔQ terimleri temsil ettikleri kuvvet türlerine göre aşağıdaki formüllerle açıklanmaktadır.

$\Delta Q_{yerçekimi} = g\bar{A}(H_1 - H_2)\Delta t/L$

$\Delta Q_{eylemsizlik} = 2\bar{V}(\bar{A} - A_1) + \bar{V}^2(A_2 - A_1)\Delta t/L$

$\Delta Q_{sürtünme} = \frac{gn^2|\bar{V}|\Delta t}{k^2 R^{4/3}}$

$$\Delta Q_{kayıp} = \frac{\sum_i K_i |V_i| \Delta t}{2L}$$

$\bar{A}$ = Kanaldaki ortalama kesitsel akış alanı,

$\bar{R}$ = Kanaldaki ortalama hidrolik yarıçap,

$\bar{V}$ = Kanaldaki ortalama akış hızı,

V_i = Kanal boyunca bir i konumunda meydana gelen yerel akış hızı,

K_i = Kanal boyunca bir i konumundaki yerel kayıp katsayısı,

H_1 = Borunun akıntıya karşı olan kısmındaki baş kısmı,

H_2 = Borunun akıntı yönünde olan kısmındaki baş kısmı,

A_1 = Kanalin akıntının tersi yöndeki enine kesit alanı,

A_2 = Kanalin akıntı yönündeki enine kesit alanı olarak ifade edilir.

İkinci olarak ise, düğüm başlarındaki kafalar süreklilik denklemleriyle çözümlenmektedir. Bu denklemler şu şekildedir;

$$\text{Denklem B} H_{t+\Delta t} = H_t + \frac{\Delta Vol}{(A_{store} + \sum A_s)_{t+\Delta t}}$$

Bu denklemde ΔVol zaman adımı boyunca düğümde akan net hacimi, A_{store} düğümün yüzey alanını ve $\sum A_s$, düğüme bağlı olan kanalların katkıda bulunduğu yüzey alanını ifade etmektedir.

SWMM tarafından çözümlenen A ve B denklemleri, kanal akışının bulunması (findConduitFlow) ve düğüm derinliğinin ayarlanması (setNodeDepth) kısımlarında kullanılmıştır.

ARAŞTIRMA BULGULARI

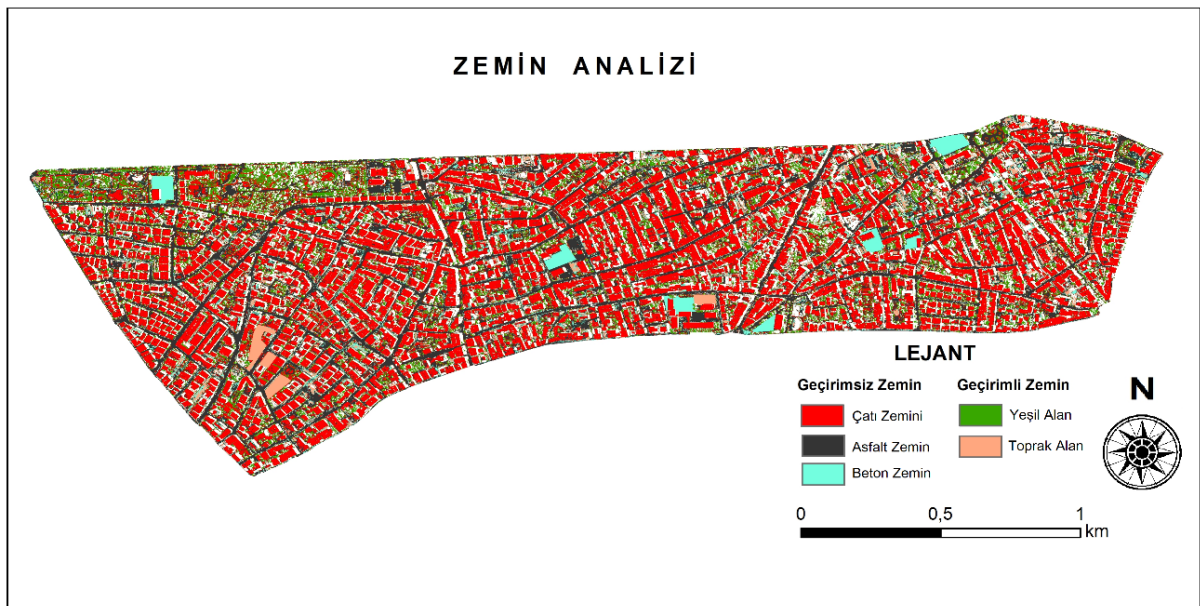
Yağmur Suyu Yüzey Akışlarını Belirlemede Kullanılan Parametreler

Yağmur Suyu Yönetim Modelinde (SWMM) kullanılacak olan parametrelerin doğru olarak girilmesi yapılacak olan simülasyon çalışmasının gerçeğe yakınlığı açısından büyük önem arz etmektedir. Bu sebeple havzaların; alan miktarları (hektar), geçirimli ve geçirimsiz alan yüzdeleri, eğimleri ve maksimum kara akış genişlikleri (metre) ArcGis yazılımı kullanılarak tespit edilmiş ve ilgili değerler programa manuel olarak girilmiştir. Programa girilmesi gereken geçirimli ve geçirimsiz alanların manning' in n değerleri için sistem tarafından belirlenmiş değerler kullanılmıştır. Alan içerisinde yer alan yağmur suyu drenaj kanallarının konumları, yükseklikleri, boru bağlantıları, uzunlukları, çapları gibi özellikler Malatya Su ve Kanalizasyon müdürlüğünden elde edilen verilerden elde edilerek programa entegre edilmiştir. Yağış verileri olarak Meteoroloji Müdürlüğünden temin edilen 01.01.2019-01.09.2021 tarihleri arasındaki 32 aylık bir dönemi kapsayan saatlik yağış verileri esas alınmış ve programa girilmiştir. 32 aylık yağış dönemi belirlenirken 2019-2020-2021 yılı içerisindeki yağış verileri dikkate alınmış ancak çalışmanın gerçekleştiği tarihte 2021 yılı tamamlanmadığı için ilk 8 ayı dikkate alınarak çalışma gerçekleştirilmiştir. Son olarak çalışmanın temel konusunu oluşturan Düşük Etkili Gelişim (DEG) bileşenleri için kullanılacak olan parametreler için bilimsel çalışmalarda kullanılan değerler esas alınmıştır. Elde edilen yer verileri ve meteorolojik girdiler Malatya kent merkezindeki 225,20 hektarlık bir alanın yağmur suyu yüzey akışlarının analiz edilmesi amacıyla SWMM yazılımına girilmiş ve Düşük Etkili Gelişim bileşenlerinin etkinlikleri değerlendirilmiştir.

Çalışma Alanına Ait Alan Verileri

Zemin Analizi

Çalışma alanına ait alan verileri (Alanların büyüklükleri, eğimleri, kara akış uzunlukları, geçirimli alan oranları ve geçirimsiz alan oranları) ArcGis yazılımı kullanılarak analiz edilmiştir. Aşağıdaki şekilde (**şekil 35.**) 197 alt havzaya ayrılmış alanın ArcGIS yazılımında oluşturulmuş zemin analiz görüntüsünü göstermektedir.



Şekil 35. ArcGIS yazılımında oluşturulmuş alanın zemin analiz görüntüsü.

Yapılan analiz sonucunda; çalışma alanı 225,20 hektarlık bir bölgeyi kapsamaktadır. Toplam alanın 30,11 hektarlık kısmını ölçüm yapılan adalar dışında kalan ve trafik aksını oluşturan asfalt yollar oluşturmaktadır. Geriye kalan 195,09 hektarlık alan ise ölçüm yapılan adaların toplam alan miktarlarını oluşturmaktadır. Ölçüm yapılan alanlarda toplam alanın 24,89 hektarlık kısmını yani %12,76'sını yeşil alanlar, 9,76 hektarlık bir kısmını yani %5,00'ini ise toprak zeminler oluşturmaktadır. Bu durumda geçirimli alan oranı (yeşil alan + toprak alanlar) %17,76 olarak tespit edilmiştir. Yine toplam alanın 94,83 hektarlık bir kısmını yani %48,61'ini çatı alanları ve 65,61 hektarlık bir kısmını yani %33,63'ünü ise asfalt ve beton alanlar oluşturmaktadır. Bu durumda geçirimsiz alan oranları (asfalt ve beton alanlar + çatı yüzeyleri) ise %82,24 olarak tespit edilmiştir. Aşağıdaki tabloda (**Tablo 10.**) alan miktarları ve yüzdeleri birlikte verilmiştir.

Alan verileri tüm havzalarda ayrı ayrı olarak hesaplanmış ve elde edilen veriler SWMM yazılımına eksiksiz olarak girilmiştir.

Tablo 10. Geçirimli ve geçirimsiz alan miktarları ve yüzdeleri

GEÇİRİMLİ ALANLAR				GEÇİRİMSİZ ALANLAR			
Yeşil Alanlar		Toprak Alanlar		Çatı Alanları		Beton ve Asfalt Alanlar	
Miktar (Hektar)	Yüzde (%)	Miktar (Hektar)	Yüzde (%)	Miktar (Hektar)	Yüzde (%)	Miktar (Hektar)	Yüzde (%)
24,89	%12,76	9,76	%5	94,83	%48,61	65,61	%33,63

Geçirimsiz alanlar, doğrudan bağlı geçirimsiz alanlar (DBGA) ve Dolaylı olarak bağlı geçirimsiz alanlar (DOGA) olarak ikiye ayrılmaktadır. Rossman (2010),DBGA'yı; yağmur sularının herhangi bir geçirimli yüzey üzerinden veya içerisinden geçmeden doğrudan olarak yağmursuyu kanalizasyon boruları veya kanalları vasıtasıyla alıcı sulara iletildiği geçirimsiz alanlar olarak, DOGA'yı ise; yağmur suyu akışlarını hemen bitişiğinde bulunan geçirimli alanlara yönlendiren geçirimsiz alanlar olarak tanımlamıştır. Yani geçirimsiz bir yolun veya bir alanın her iki yanı da geçirgen bir alan ile kaplı olduğu durumlarda buralardan süzülen yağmur suları direkt olarak kanalizasyon hattına bağlanmadığından dolayı bu alanlar geçirimsiz alan olarak kabul edilmemektedir. Kaldırım ve oluk sistemine sahip sokaklar, araba yolları, otopark alanları ve kaldırımlar ise DBGA olarak kabul edilmektedir. Alan içerisinde bulunan binaların tamamı ise DBGA olarak kabul edilmez. Bunun sebebi ise bazı binalarda çatı oluklarının kanalizasyon sistemlerine bağlanmadan doğrudan binanın bahçesine yönlendirilmesidir. Bu çalışma geniş bir alanı kapsadığı ve tüm binaların tek tek incelenme olanağı mümkün olmadığından binaların tamamı kanalizasyon sistemine bağlı yani DBGA olarak kabul edilmiştir. Aşağıdaki tablolarda (**Tablo 11. ve Devamı**) ArcGis yazılımından elde edilen istatistik değerler SWMM programında planlandığı gibi numaralarına göre sıralanmış bir şekilde gösterilmektedir.

Tablo 11. ArcGIS yazılımında elde edilen alana ait istatistiksel veriler

ALANLAR	ALAN BÜYÜKLÜKLE Rİ (m²)	GEÇİRİMLİ ALANLAR				TOPLAM (%)	GEÇİRİMSİZ ALANLAR				TOPLAM (%)
		Yeşil Alanlar		Toprak Alanlar			Çatı Alanları		Beton ve Asfalt Alanlar		
		Miktar (m²)	Yüzde (%)	Miktar (m²)	Yüzde (%)		Miktar (m²)	Yüzde (%)	Miktar (m²)	Yüzde (%)	
S1	49.82 9,10	14.662,02	29,43	2691,92	5,40	34,80	2.663,00	5,37	29.812,15	59,83	65,20
S2	113.2 31,67	42.101,88	37,18	9.185,17	8,11	45,29	16.683,63	14,74	45.260,99	39,97	54,71
S3	15.70 2,14	2.127,02	13,55	639,22	4,07	17,62	6.553,34	41,73	6.382,56	40,65	82,38
S4	7.903,60	1.146,08	14,50	291,16	3,68	18,18	3.980,70	50,36	2.485,66	31,45	81,82
S	6.803,08	721,38	10,600	210,02	3,09	13,69	3.584,27	52,70	2.287,41	33,61	86,31
S6	5.972,31	619,30	10,37	260,24	4,36	14,73	2.939,40	49,22	2.153,37	36,05	85,27
S7	11.97 2,41	1.499,70	12,53	604,93	5,05	17,58	5.501,56	45,96	4.366,22	36,46	82,42
S8	10.48 5,74	1.376,13	13,12	391,62	3,73	16,85	5.157,55	49,19	3.560,44	33,96	83,15
S9	14.04 6,01	1.457,31	10,38	668,42	4,76	15,14	7.233,68	51,50	4.686,60	33,36	84,86
S10	7.294,12	608,18	8,34	322,10	4,42	12,76	3.355,93	46,00	3.007,91	41,24	87,24
S11	7.173,66	1.270,08	17,70	275,87	3,85	21,55	3.005,22	41,89	2.622,49	36,56	78,45
S12	3.685,22	1.063,14	28,85	18,32	0,50	29,35	1.203,26	32,65	1.400,50	38,00	70,65
S13	7.809,51	833,76	10,68	358,69	4,59	15,27	3.768,32	48,26	2.848,74	36,47	84,73
S14	8.955,91	1.163,40	12,99	352,34	3,93	16,92	4.665,57	52,10	2.774,60	30,98	83,08
S15	11.00 3,35	1.018,11	9,25	448,72	4,08	13,33	6.126,62	55,68	3.409,90	30,99	86,67
S16	10.36 4,41	1.225,74	11,83	487,28	4,70	16,53	4.202,71	40,55	4.448,68	42,92	83,47
S17	19.38 5,57	1.963,19	10,13	609,12	3,14	13,27	10.081,57	52,01	6.731,69	34,72	86,73
S18	10.81 7,03	1.027,75	9,50	156,70	1,45	10,95	6.196,43	57,29	3.436,15	31,76	89,05
S19	11.25 3,34	601,88	5,35	384,39	3,42	8,77	5.970,14	53,05	4.296,93	38,18	91,23
S20	9.525,39	795,78	8,35	372,45	3,91	12,26	4.838,16	50,79	3.519,00	36,95	87,74
S21	8.344,97	819,12	9,82	318,82	3,82	13,64	4.333,26	51,93	2.873,77	34,43	86,36
S22	7.690,06	790,05	10,27	267,27	3,48	13,75	4.584,68	59,62	2.048,06	26,63	86,25
S23	15.07 6,48	2.021,92	13,41	431,63	2,86	16,27	8.058,37	53,45	4.564,56	30,28	83,73
S24	13.01 6,41	1.334,70	10,25	748,13	5,75	16,00	6.489,28	49,86	4.444,30	34,14	84,00
S25	9.763,17	830,37	8,51	556,22	5,7	14,21	4.675,23	47,88	3.701,35	37,91	85,79
S26	1.642,53	681,22	41,47	12,37	0,75	42,22	400,50	24,39	548,44	33,39	57,78
S27	7.490,98	546,99	7,30	400,38	5,35	12,65	4.158,00	55,51	2.385,61	31,84	87,35
S28	10.45 5,75	1.040,24	9,95	524,52	5,02	14,97	4.969,76	47,53	3.921,23	37,50	85,03

Tablo 11. Devamı

ALANLAR	ALAN BÜYÜKLÜĞÜ R _i (m ²)	GEÇİRİMLİ ALANLAR					GEÇİRİMSİZ ALANLAR				
		Yeşil Alanlar		Toprak Alanlar		TOPLAM (%)	Çatı Alanları		Beton ve Asfalt Alanlar		TOPLAM (%)
		Miktar (m ²)	Yüzde (%)	Miktar (m ²)	Yüzde (%)		Miktar (m ²)	Yüzde (%)	Miktar (m ²)	Yüzde (%)	
S29	8.590,59	466,20	5,43	320,88	3,74	9,17	6.326,80	73,64	1.476,71	17,19	90,83
S30	4.148,38	179,26	4,32	80,87	1,95	6,27	3.072,65	74,07	815,60	19,66	93,73
S31	8.850,88	927,23	10,48	606,90	6,86	17,34	3.817,32	43,13	3.499,43	39,53	82,66
S32	15.938,42	1.458,23	9,15	550,21	3,45	12,60	9.046,12	56,76	4.883,86	30,64	87,40
S33	14.323,06	1.318,17	9,20	341,05	2,38	11,58	8.677,97	60,59	3.985,87	27,83	88,42
S34	17.363,65	1.464,17	8,43	1.299,84	7,49	15,92	8.887,62	51,19	5.712,02	32,89	84,08
S35	9.597,88	694,65	7,24	551,35	5,74	12,98	5.966,67	62,17	2.385,21	24,85	87,02
S36	12.057,66	952,48	7,90	561,46	4,66	12,56	6.636,23	55,04	3.907,49	32,40	87,44
S37	7.858,36	633,85	8,07	168,98	2,15	10,22	4.654,28	59,23	2.401,25	30,55	89,78
S38	7.618,60	789,68	10,37	185,19	2,43	12,80	4.540,91	59,60	2.102,82	27,60	87,20
S39	8.628,35	783,09	9,08	150,67	1,75	10,83	6.009,74	69,65	1.684,85	19,52	89,17
S40	7.267,35	433,71	5,97	246,77	3,40	9,37	5.020,05	69,07	1.566,82	21,56	90,63
S41	8.788,43	1.071,39	12,19	212,25	2,42	14,61	4.779,63	54,39	2.725,16	31,00	85,39
S42	11.142,80	729,78	6,55	281,45	2,53	9,08	6.692,89	60,06	3.438,68	30,86	90,92
S43	8.515,44	646,47	7,59	283,11	3,33	10,92	5.220,97	61,31	2.364,89	27,77	89,08
S44	3.729,15	462,65	12,41	82,73	2,22	14,63	1.879,41	50,40	1.304,36	34,97	85,37
S45	3.196,96	308,41	9,65	57,78	1,81	11,46	1.904,05	59,55	926,72	28,99	88,54
S46	9.966,37	636,27	6,39	530,60	5,32	11,71	6.587,03	66,09	2.212,47	22,20	88,29
S47	1.771,89	424,74	23,97	8,76	0,50	24,47	606,60	34,23	731,79	41,30	75,53
S48	2.175,87	143,90	6,61	140,01	6,44	13,05	1.091,74	50,17	800,22	36,78	86,95
S49	10.535,42	1.248,13	11,85	186,32	1,77	13,62	6.042,38	57,35	3.058,59	29,03	86,38
S50	11.764,46	1.647,61	14,00	455,20	3,87	17,87	5.212,74	44,31	4.448,91	37,82	82,13
S51	14.028,45	1.349,57	9,62	581,41	4,15	13,77	7.662,74	54,62	4.434,73	31,61	86,23
S52	5.490,59	513,99	9,36	189,60	3,45	12,81	3.108,80	56,62	1.678,20	30,57	87,19
S53	5.368,73	583,98	10,88	349,36	6,51	17,39	2.321,86	43,24	2.113,53	39,37	82,61
S54	6.173,18	665,79	10,79	138,34	2,24	13,03	2.970,31	48,11	2.398,74	38,86	86,97
S55	2.754,27	210,31	7,64	24,86	0,90	8,54	1.759,75	63,89	759,35	27,57	91,46
S56	6.082,36	495,05	8,14	211,17	3,47	11,61	3.374,78	55,48	2.001,36	32,91	88,39
S57	10.505,14	1.023,03	9,74	326,37	3,10	12,84	6.267,05	59,66	2.888,69	27,50	87,16

Tablo 11. Devamı

ALANLAR	ALAN BÜYÜKLÜKLERİ (m ²)	GEÇİRİMLİ ALANLAR				GEÇİRİMSİZ ALANLAR					
		Yeşil Alanlar		Toprak Alanlar		TOPLAM (%)	Çatı Alanları		Beton ve Asfalt Alanlar		TOPLAM (%)
		Miktar (m ²)	Yüzde (%)	Miktar (m ²)	Yüzde (%)		Miktar (m ²)	Yüzde (%)	Miktar (m ²)	Yüzde (%)	
S58	6.808,92	301,83	4,43	669,00	9,83	14,26	2.861,10	42,02	2.976,99	43,72	85,74
S59	6.429,57	1.004,19	15,62	149,54	2,33	17,95	3.077,79	47,86	2.198,05	34,19	82,05
S60	14.201,83	1.713,79	12,07	476,87	3,36	15,43	6.927,07	48,77	5.084,10	35,80	84,57
S61	6.870,80	977,29	14,22	216,95	3,16	17,38	3.699,80	53,85	1.976,76	28,77	82,62
S62	4.112,24	369,35	8,98	81,37	1,98	10,96	2.591,74	63,02	1.069,78	26,02	89,04
S63	8.120,55	1.050,55	12,94	266,76	3,29	16,23	3.764,69	46,36	3.038,55	37,41	83,77
S64	10.443,70	1.250,03	11,97	271,51	2,60	14,57	4.978,62	47,67	3.943,54	37,76	85,43
S65	7.889,74	738,22	9,36	414,98	5,26	14,62	4.617,29	58,52	2.119,25	26,86	85,38
S66	7.081,79	779,46	11,00	281,03	3,97	14,97	4.081,75	57,64	1.939,55	27,39	85,03
S67	2.617,46	261,84	10,00	105,63	4,04	14,04	1.276,25	48,76	973,74	37,20	85,96
S68	5.659,25	1.025,03	18,11	130,36	2,31	20,42	2.711,47	47,91	1.792,39	31,67	79,58
S69	5.059,63	426,43	8,43	234,99	4,64	13,07	2.943,65	58,18	1.454,56	28,75	86,93
S70	9.745,48	1.214,83	12,47	385,83	3,96	16,43	4.884,00	50,11	3.260,82	33,46	83,57
S71	15.523,58	2.556,53	16,47	537,62	3,46	19,93	6.516,02	41,97	5.913,41	38,10	80,07
S72	4.506,63	326,98	7,26	172,81	3,83	11,09	2.352,53	52,20	1.654,31	36,71	88,91
S73	5.858,90	318,00	5,43	661,00	11,28	16,71	2.920,30	49,84	1.959,60	33,45	83,29
S74	5.263,24	315,80	6,00	293,73	5,58	11,58	3.013,07	57,25	1.640,64	31,17	88,42
S75	4.390,84	438,98	10,00	68,12	1,55	11,55	2.463,18	56,10	1.420,56	32,35	88,45
S76	6.766,98	680,24	10,05	487,26	7,20	17,25	2.829,44	41,81	2.770,04	40,94	82,75
S77	5.090,50	459,48	9,03	183,79	3,61	12,64	2.797,51	54,95	1.649,72	32,41	87,36
S78	3.728,72	147,52	3,96	278,10	7,46	11,42	2.247,70	60,28	1.055,40	28,30	88,58
S79	6.075,83	459,29	7,56	317,38	5,22	12,78	3.470,79	57,13	1.828,37	30,09	87,22
S80	3.153,38	190,80	6,05	394,30	12,50	18,55	1.564,12	49,60	1.004,16	31,85	81,45
S81	6.501,72	839,43	12,91	333,71	5,13	18,04	2.860,24	43,99	2.468,34	37,97	81,96
S82	11.690,05	1.154,88	9,88	769,19	6,58	16,46	4.692,87	35,14	5.073,11	43,40	78,54
S83	1.875,47	192,61	10,27	93,52	4,99	15,26	996,99	53,16	592,35	31,58	84,74
S84	7.913,61	725,47	9,17	429,23	5,42	14,59	4.601,48	58,15	2.157,43	27,26	85,41
S85	5.570,98	552,76	9,92	271,15	4,87	14,79	2.940,65	52,78	1.806,42	32,43	85,21
S86	8.294,75	761,84	9,18	369,62	4,46	13,64	4.402,52	53,08	2.760,77	33,28	86,36

Tablo 11. Devamı

ALANLAR	ALAN BÜYÜKLÜKLERİ (m ²)	GEÇİRİMLİ ALANLAR					GEÇİRİMSİZ ALANLAR				
		Yeşil Alanlar		Toprak Alanlar		TOPLAM (%)	Çatı Alanları		Beton ve Asfalt Alanlar		TOPLAM (%)
		Miktar (m ²)	Yüzde (%)	Miktar (m ²)	Yüzde (%)		Miktar (m ²)	Yüzde (%)	Miktar (m ²)	Yüzde (%)	
S87	20.623,65	2.362,60	11,46	568,32	2,76	14,22	6.824,63	33,09	10.868,10	52,69	85,78
S88	8.762,35	733,73	8,37	517,35	5,91	14,28	5.141,08	58,67	2.370,19	27,05	85,72
S89	13.626,55	1.757,60	12,90	427,27	3,14	16,04	7.291,03	53,50	4.150,65	30,46	83,96
S90	4.594,20	344,48	7,50	270,18	5,88	13,38	2.646,37	57,60	1.333,17	29,02	86,62
S91	5.546,19	635,35	11,46	216,41	3,90	15,36	3.527,55	63,60	1.166,88	21,04	84,64
S92	2.571,51	206,02	8,01	82,75	3,22	11,23	1.721,36	66,94	561,38	21,83	88,77
S93	12.069,79	1.415,31	11,73	345,61	2,86	14,59	7.360,38	60,98	2.948,49	24,43	85,41
S94	10.769,18	1.187,66	11,03	481,71	4,47	15,50	5.910,44	54,88	3.189,37	29,62	84,50
S95	7.837,69	1.336,90	17,06	552,90	7,05	24,11	3.471,45	44,29	2.476,44	31,60	75,89
S96	10.139,24	1.251,78	12,35	173,44	1,71	14,06	6.235,19	61,49	2.478,83	24,45	85,94
S97	12.686,22	1.033,51	8,15	301,22	2,37	10,52	8.714,78	68,70	2.636,71	20,78	89,48
S98	8.007,14	742,07	9,27	324,91	4,06	13,33	4.949,44	61,81	1.990,72	24,86	86,67
S99	11.144,75	921,88	8,27	496,88	4,46	12,73	6.228,35	55,88	3.497,64	31,39	87,27
S100	7.248,98	989,66	13,65	254,82	3,52	17,17	3.715,85	51,26	2.288,65	31,57	82,83
S101	12.508,48	1.031,42	8,25	601,74	4,81	13,06	6.759,40	54,04	4.115,92	32,90	86,94
S102	11.061,05	1.269,27	11,48	556,52	5,03	16,51	5.740,40	51,90	3.494,86	31,59	83,49
S103	9.465,66	925,14	9,77	331,36	3,50	13,27	4.864,30	51,39	3.344,86	35,34	86,73
S104	5.950,07	549,72	9,24	192,68	3,24	12,48	3.327,55	55,92	1.880,12	31,60	87,52
S105	5.154,59	195,19	3,79	235,54	4,57	8,36	3.584,40	69,53	1.139,46	22,11	91,63
S106	17.927,53	1.706,83	9,52	2.216,17	12,36	21,88	4.861,00	27,12	9.143,53	51,00	78,12
S107	15.079,13	1.002,12	6,65	831,81	5,52	12,17	8.966,37	59,46	4.278,83	28,37	87,83
S108	13.155,73	1.179,28	8,97	460,94	3,50	12,47	8.811,93	66,98	2.703,58	20,55	87,53
S109	17.135,39	1.703,67	9,94	605,65	3,54	13,48	10.213,02	59,60	4.613,05	26,92	86,52
S110	7.819,11	625,21	8,00	110,88	1,42	9,42	5.478,02	70,05	1.605,00	20,53	90,58
S111	8.000,73	674,05	8,42	167,77	2,10	10,52	4.340,09	54,25	2.818,82	35,23	89,48
S112	9.132,47	1.049,99	11,50	579,07	6,34	17,84	4.840,99	53,01	2.662,42	29,15	82,16
S113	17.720,03	1.811,70	10,22	1.228,98	6,94	17,16	9.195,63	51,89	5.483,72	30,95	82,84
S114	9.783,93	1.171,38	11,97	375,47	3,84	15,81	4.964,32	50,74	3.272,76	33,45	84,19

Tablo 11. Devamı

ALANLAR	ALAN BÜYÜKLÜKLERİ (m ²)	GEÇİRİMLİ ALANLAR				GEÇİRİMSİZ ALANLAR					
		Yeşil Alanlar		Toprak Alanlar		TOPLAM (%)	Çatı Alanları		Beton ve Asfalt Alanlar		TOPLAM (%)
		Miktar (m ²)	Yüzde (%)	Miktar (m ²)	Yüzde (%)		Miktar (m ²)	Yüzde (%)	Miktar (m ²)	Yüzde (%)	
S115	10.335,83	1.435,39	13,89	732,69	7,09	20,98	4.739,52	45,85	3.428,23	33,17	79,02
S116	10.726,96	1.760,12	16,41	298,89	2,79	19,20	5.370,50	50,06	3.297,45	30,74	80,80
S117	5.041,36	223,80	4,44	160,93	3,19	7,63	3.139,25	62,27	1.517,38	30,10	92,37
S118	8.413,58	541,81	6,44	291,85	3,47	9,91	5.778,66	68,68	1.801,26	21,41	90,09
S119	13.745,39	1.365,69	9,94	351,52	2,56	12,50	7.622,18	55,45	4.406,00	32,05	87,50
S120	20.720,44	2.253,80	10,88	748,09	3,61	14,19	10.624,31	51,27	7.094,24	34,24	85,51
S121	16.414,83	1.345,79	8,20	408,11	2,49	10,69	10.883,78	66,30	3.777,15	23,01	89,31
S122	7.785,43	1.225,69	15,74	314,56	4,04	19,78	3.792,86	48,72	2.452,32	31,50	80,22
S123	4.711,60	517,13	10,98	152,11	3,23	14,21	1.927,37	40,91	2.114,99	44,88	85,79
S124	17.453,48	2.430,82	13,93	1.335,59	7,65	21,58	7.996,34	45,82	5.690,73	32,60	78,42
S125	19.136,25	2.480,65	12,96	722,28	3,77	16,73	10.642,24	55,62	5.291,08	27,65	83,27
S126	5.211,29	352,82	6,77	167,79	3,22	9,99	3.670,80	70,44	1.019,88	19,57	90,01
S127	12.566,40	1.776,14	14,13	744,88	5,93	20,06	6.307,13	50,19	3.738,25	29,75	79,94
S128	4.870,94	515,15	10,58	186,96	3,84	14,42	2.606,17	53,50	1.562,66	32,08	85,58
S129	3.642,45	232,05	6,37	239,25	6,57	12,94	1.944,71	53,39	1.226,44	33,67	87,06
S130	11.083,09	1.406,67	12,69	594,67	5,37	18,06	4.650,22	41,96	4.431,53	39,98	81,94
S131	6.360,36	640,14	10,06	350,58	5,51	15,57	3.291,31	51,75	2.078,33	32,68	84,43
S132	8.173,11	386,33	4,73	272,05	3,33	8,06	6.280,36	76,84	1.234,37	15,10	91,94
S133	15.998,74	2.425,00	15,16	613,83	3,84	19,00	6.944,66	43,40	6.015,25	37,60	81,00
S134	5.679,82	292,62	5,15	103,81	1,83	6,98	3.892,62	68,53	1.390,77	24,49	93,02
S135	6.996,90	996,84	14,25	155,08	2,22	16,47	1.476,80	21,11	4.368,18	62,42	83,53
S136	17.024,78	2.632,64	15,46	720,92	4,23	19,69	6.975,98	40,98	6.695,24	39,33	80,31
S137	18.856,90	2.340,03	12,41	821,00	4,35	16,76	9.706,26	51,48	5.989,61	31,76	83,24
S138	5.851,73	763,70	13,05	106,40	1,82	14,87	3.467,59	59,26	1.514,04	25,87	85,13
S139	16.499,07	1.931,07	11,70	652,26	3,95	15,65	8.537,70	51,75	5.378,04	32,60	84,35
S140	7.921,11	863,80	10,91	301,28	3,80	14,71	3.966,34	50,08	2.789,69	35,21	85,29
S141	8.422,00	1.283,51	15,24	228,81	2,72	17,96	3.994,94	47,43	2.914,74	34,61	82,04
S142	9.124,51	1.828,63	20,04	130,78	1,43	21,47	4.360,24	47,79	2.804,86	30,74	78,53

Tablo 11. Devamı

ALANLAR	ALAN BÜYÜKLÜKLERİ (m ²)	GEÇİRİMLİ ALANLAR					GEÇİRİMSİZ ALANLAR				
		Yeşil Alanlar		Toprak Alanlar		TOPLAM (%)	Çatı Alanları		Beton ve Asfalt Alanlar		TOPLAM (%)
		Miktar (m ²)	Yüzde (%)	Miktar (m ²)	Yüzde (%)		Miktar (m ²)	Yüzde (%)	Miktar (m ²)	Yüzde (%)	
S143	7.184,60	598,42	8,33	167,90	2,34	10,67	4.456,63	62,03	1.961,65	27,30	89,33
S144	6.157,43	891,77	14,48	174,56	2,84	17,32	3.003,82	48,78	2.087,28	33,90	82,68
S145	6.007,60	831,93	13,85	291,59	4,85	18,70	3.115,09	51,85	1.768,99	29,45	81,30
S146	10.344,44	842,91	8,15	337,76	3,27	11,42	5.647,59	54,59	3.516,18	33,99	88,58
S147	16.118,38	1.235,06	7,66	1.140,43	7,08	14,74	8.648,49	53,65	5.094,40	31,61	85,26
S148	10.477,83	1.123,58	10,72	723,98	6,91	17,63	5.198,64	49,62	3.431,63	32,75	82,37
S149	8.094,40	892,83	11,03	463,31	5,72	16,75	4.501,91	55,62	2.236,35	27,63	83,25
S150	9.115,46	672,32	7,38	438,87	4,81	12,19	5.065,49	55,57	2.938,78	32,24	87,81
S151	17.972,63	2.541,37	14,14	1.132,66	6,30	20,44	8.123,57	45,20	6.175,03	34,36	79,56
S152	12.746,91	817,43	6,41	1.241,61	9,74	16,15	6.535,85	51,28	4.152,02	32,57	83,85
S153	13.137,07	749,02	5,70	651,04	4,96	10,66	8.840,28	67,29	2.896,73	22,05	89,34
S154	10.308,06	1.295,10	12,57	650,63	6,31	18,88	5.222,27	50,66	3.140,06	30,46	81,12
S155	13.328,96	1.704,44	12,79	525,93	3,95	16,74	7.562,41	56,73	3.536,18	26,53	83,26
S156	8.172,01	952,16	11,65	369,84	4,53	16,18	4.777,21	58,46	2.072,80	25,36	83,82
S157	8.422,88	777,08	9,23	449,83	5,34	14,57	4.724,01	56,08	2.471,96	29,35	85,43
S158	3.627,36	332,14	9,16	142,28	3,92	13,08	2.345,80	64,67	807,14	22,25	86,92
S159	5.872,22	820,26	13,97	151,75	2,58	16,55	3.684,92	62,75	1.215,29	20,70	83,45
S160	2.879,92	290,48	10,09	174,43	6,06	16,15	1.564,65	54,33	850,36	29,52	83,85
S161	1.408,10	81,74	5,80	72,20	5,13	10,93	874,68	62,12	379,48	26,95	89,07
S162	3.092,31	290,83	9,40	122,35	3,96	13,36	1.875,13	60,64	804,00	26,00	86,64
S163	7.214,19	797,52	11,05	425,45	5,90	16,95	3.504,02	48,57	2.487,20	34,48	83,05
S164	4.975,34	223,69	4,50	355,24	7,14	11,64	3.031,36	60,93	1.365,05	27,43	88,36
S165	5.594,26	427,12	7,63	313,94	5,61	13,24	3.069,40	54,87	1.783,80	31,89	86,76
S166	11.359,89	1.225,24	10,79	709,46	6,24	17,03	6.135,00	54,01	3.290,19	28,96	82,97
S167	27.215,21	4.329,66	15,91	912,27	3,35	19,26	12.203,34	44,84	9.769,94	35,90	80,74
S168	13.834,93	1.097,90	7,94	1.637,10	11,83	19,77	6.080,65	43,95	5.019,28	36,28	80,23
S169	5.412,49	509,87	9,42	161,80	2,99	12,41	3.239,01	59,84	1.501,81	27,75	87,59
S170	7.463,16	802,07	10,75	167,49	2,24	12,99	3.585,64	48,05	2.907,96	38,96	87,01
S171	3.604,53	251,28	6,97	265,88	7,38	14,35	1.935,10	53,68	1.152,27	31,97	85,65

Tablo 11. Devamı

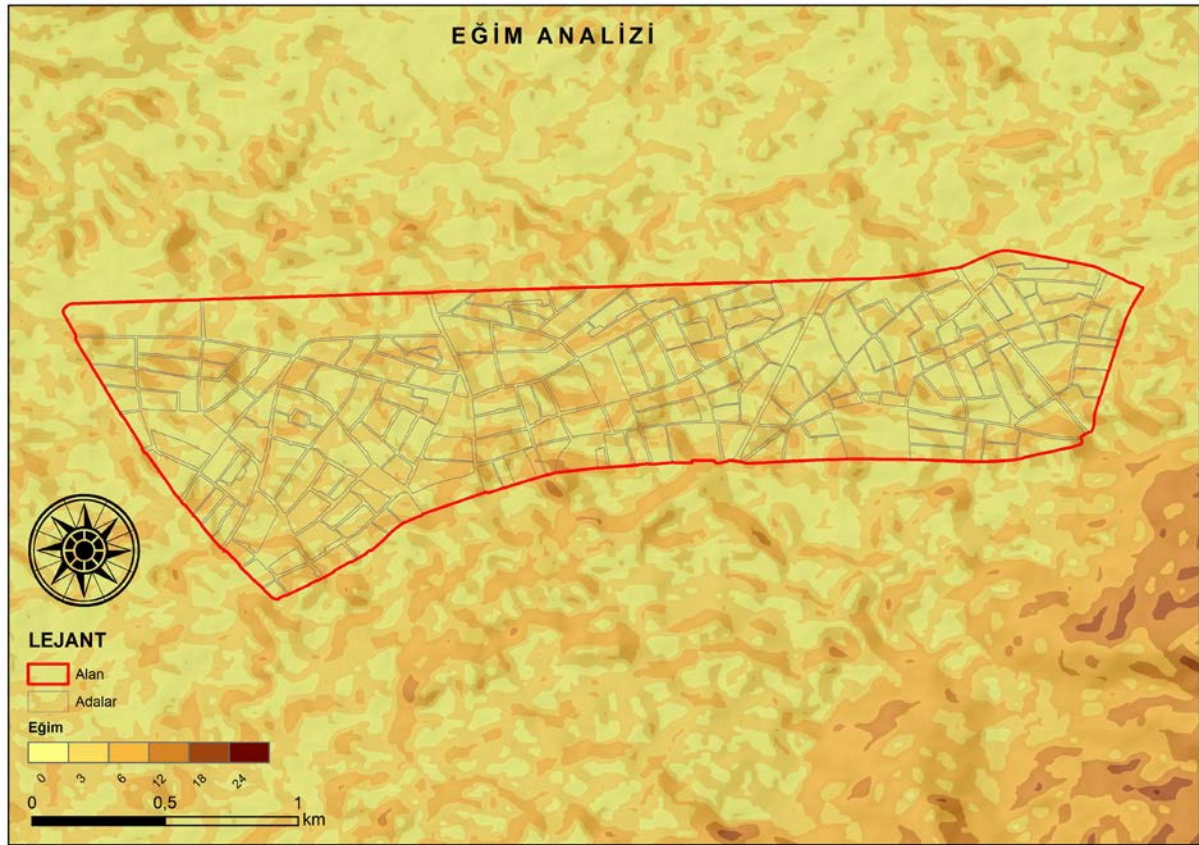
ALANLAR	ALAN BÜYÜKLÜKLERİ (m ²)	GEÇİRİMLİ ALANLAR					GEÇİRİMSİZ ALANLAR				
		Yeşil Alanlar		Toprak Alanlar		TOPLAM (%)	Çatı Alanları		Beton ve Asfalt Alanlar		TOPLAM (%)
		Miktar (m ²)	Yüzde (%)	Miktar (m ²)	Yüzde (%)		Miktar (m ²)	Yüzde (%)	Miktar (m ²)	Yüzde (%)	
S172	6.323,68	611,83	9,68	376,67	5,96	15,64	3.610,58	57,09	1.724,60	27,27	84,36
S173	2.866,14	189,04	6,59	148,43	5,18	11,77	1.860,70	64,92	667,97	23,31	88,23
S174	6.969,29	842,23	12,08	327,35	4,70	16,78	3.890,81	55,83	1.908,90	27,39	83,22
S175	2.819,49	161,72	5,74	262,18	9,30	15,04	1.516,59	53,79	879,00	31,17	84,96
S176	6.071,21	508,39	8,37	324,84	5,35	13,72	3.665,29	60,37	1.572,69	25,91	86,28
S177	2.663,13	449,73	16,89	128,43	4,82	21,71	1.359,69	51,05	725,28	27,24	78,29
S178	6.010,23	590,35	9,82	131,49	2,19	12,01	3.670,57	61,07	1.617,82	26,92	87,99
S179	18.978,96	2.282,25	12,03	588,40	3,10	15,13	8.073,89	42,54	8.034,42	42,33	84,87
S180	12.095,85	1.250,66	10,34	716,86	5,93	16,27	6.223,01	51,45	3.905,32	32,28	83,73
S181	9.404,98	1.253,89	13,33	206,12	2,19	15,52	5.126,65	54,51	2.818,32	29,97	84,48
S182	3.180,78	86,35	2,71	263,60	8,29	11,00	2.279,39	71,66	551,44	17,34	89,00
S183	11.726,58	645,85	5,51	818,47	6,98	12,49	7.015,00	59,82	3.247,26	27,69	87,51
S184	6.189,59	557,54	9,01	719,73	11,63	20,64	3.166,24	51,15	1.746,08	28,21	79,36
S185	9.515,05	574,43	6,04	761,60	8,00	14,04	4.572,89	48,06	3.606,13	37,90	85,96
S186	3.909,05	312,42	7,99	321,88	8,23	16,22	2.011,82	51,47	1.262,93	32,31	83,78
S187	11.648,13	937,71	8,05	1131,04	9,71	17,76	5.337,92	45,83	4.241,46	36,41	82,24
S188	15.103,56	2.052,29	13,59	1.357,06	8,99	22,58	5.631,28	37,28	6.062,93	40,14	77,42
S189	10.892,96	2.941,51	27,00	422,39	3,88	30,88	2.893,76	26,57	4.635,30	42,55	69,12
S190	14.624,26	1.248,45	8,54	1.031,15	7,05	15,59	7.765,89	53,10	4.578,77	31,31	84,41
S191	9.679,12	760,42	7,86	891,11	9,21	17,07	5.026,75	51,93	3.000,84	31,00	82,93
S192	7.434,30	2.413,47	32,46	33,50	0,45	32,91	1.097,66	14,77	3.889,67	52,32	67,09
S193	6.457,16	303,36	4,70	2.069,75	32,05	36,75	628,96	9,74	3.455,09	53,51	63,25
S194	18.876,69	2.081,30	11,03	2.138,19	11,33	22,36	6.654,59	35,25	8.002,61	42,39	77,64
S195	7.431,98	1.220,32	16,42	262,99	3,54	19,96	3.829,25	51,52	2.119,42	28,52	80,04
S196	7.122,91	467,67	6,57	875,99	12,30	18,87	3.486,18	48,94	2.293,07	32,19	81,13
S197	19.277,22	1.824,03	9,46	1.074,08	5,57	15,03	10.461,35	54,27	5.917,76	30,70	84,97
TOPLAM	1.950.877,31	248.875,46	12,76	97.627,06	5,00	17,76	948.288,70	48,61	656.086,09	33,63	82,24

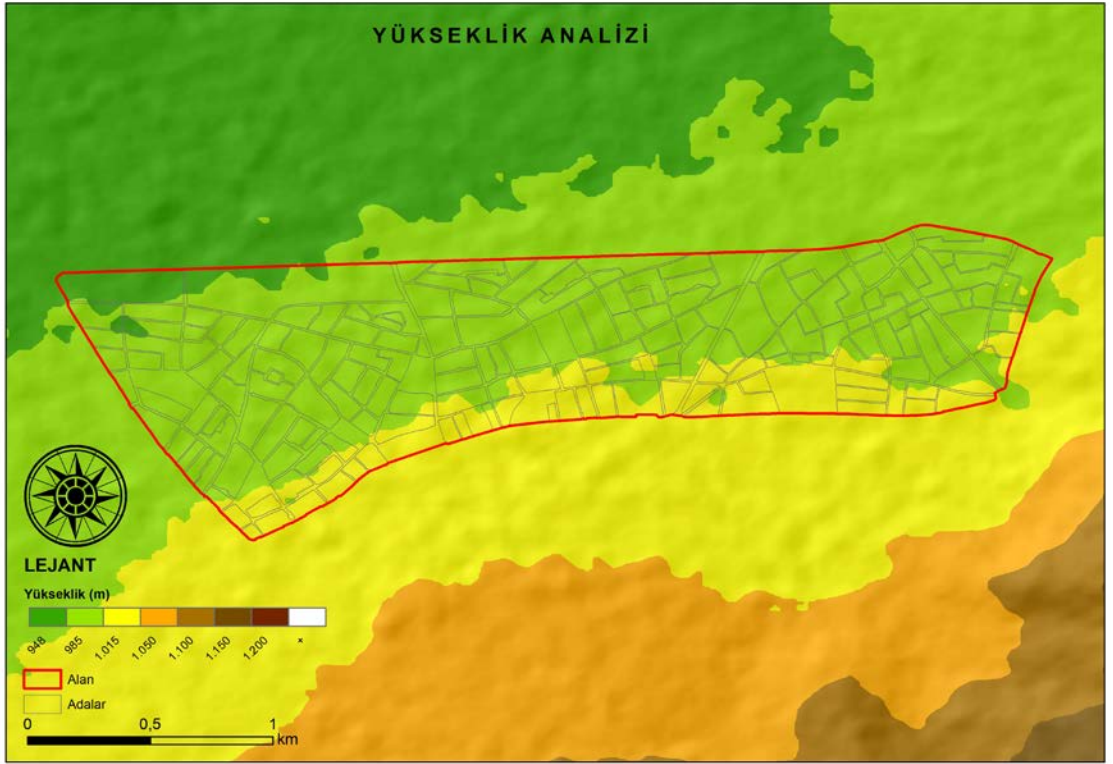
Yapılan analizlerde elde edilen verileri 225,20 hektarlık bir alan üzerinden değerlendirecek olursak, bir şehir merkezindeki toplam geçirimsiz alanların büyük bir kısmını %42,10'unu çatı alanlarıyla, %42,50'sini asfalt ve beton alanlarının oluşturduğu tespit edilmiştir. Bu sebeple şehirleşmenin meydana getirdiği yoğun yapılaşmadan dolayı geçirimli alan miktarları geçirimsiz alan miktarlarına nazaran çok düşük bir seviyede kalmaktadır.

Alan verileri dışında çalışma alanına ait eğim, bakı ve yükselti haritaları yine ArcGIS yazılımı yardımıyla elde edilip yağmursuyu drenaj kanallarının yükseltileri ve yağmursuyu yüzey akışlarının akış yönlerini tespit etmek üzere bu haritalardan yararlanılmıştır. Bu veriler aşağıda alt başlıklar şeklinde sıralanmaktadır.

Eğim Analizi

Eğim analizine göre, çalışma alanı genellikle düze yakın alanlardan oluşmaktadır. Alanın en yüksek kısmı ile en alçak kısmı arasında ortalama %15 eğim olduğu tespit edilmiştir. Tüm alanın eğim yönü ise alanın güney kısmından kuzey kısmına ve doğu kısmından batı kısmına doğrudur. Aşağıdaki şekil (şekil 36.) ArcGIS yazılımında oluşturulmuş alanın eğim analiz görüntüsünü ifade etmektedir.

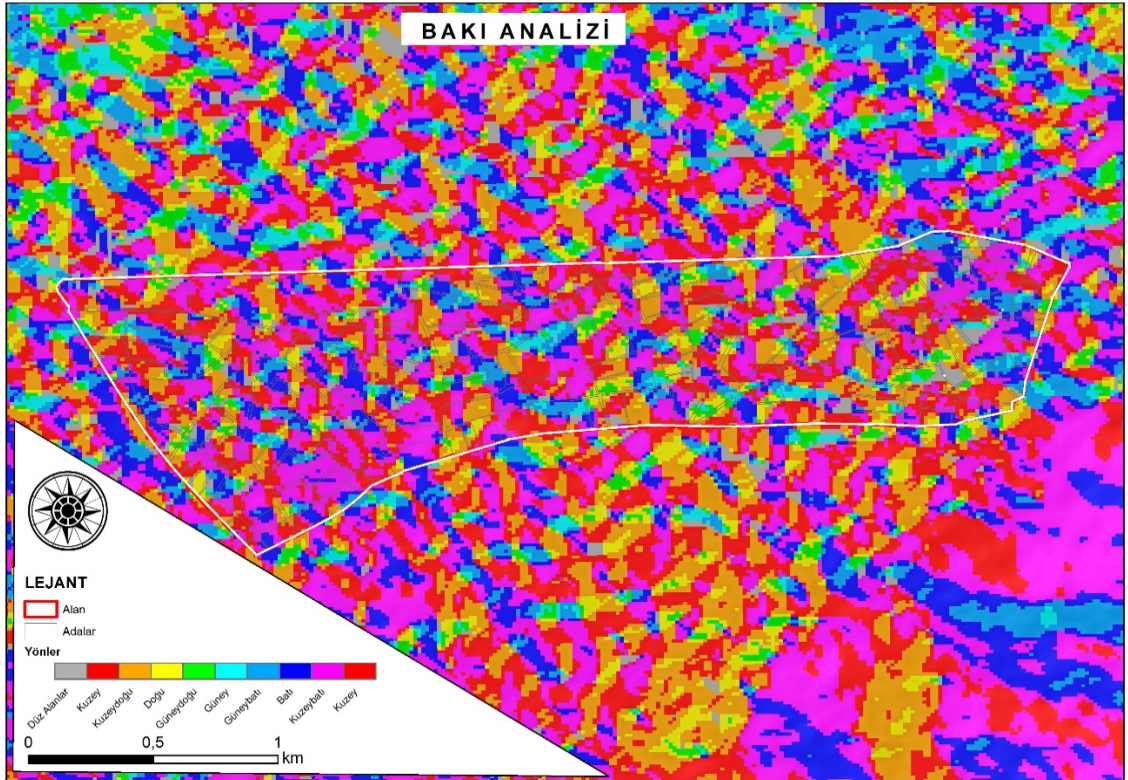




Şekil 37. ArcGIS yazılımında oluşturulmuş alana ait yükseklik analizi görüntüsü

Bakı Analizi

Çalışma alanı çoğunlukla kuzeybatı-kuzeydoğu yönlü cephelerden meydana gelmektedir. Bunun dışında, batı ve kuzey yönlü bakan cephelerde oldukça fazladır. Diğer yönlerle kıyasla güneydoğu-güneybatı, doğu ve güney yönlü bakan cepheler daha nadirdir. Aşağıdaki şekil (şekil 38.) alana ait bakı analiz haritasını göstermektedir.



Şekil 38. ArcGIS yazılımında oluşturulmuş alana ait bakı analizi görüntüsü.

Çalışma Alanına Ait Yağış Verileri

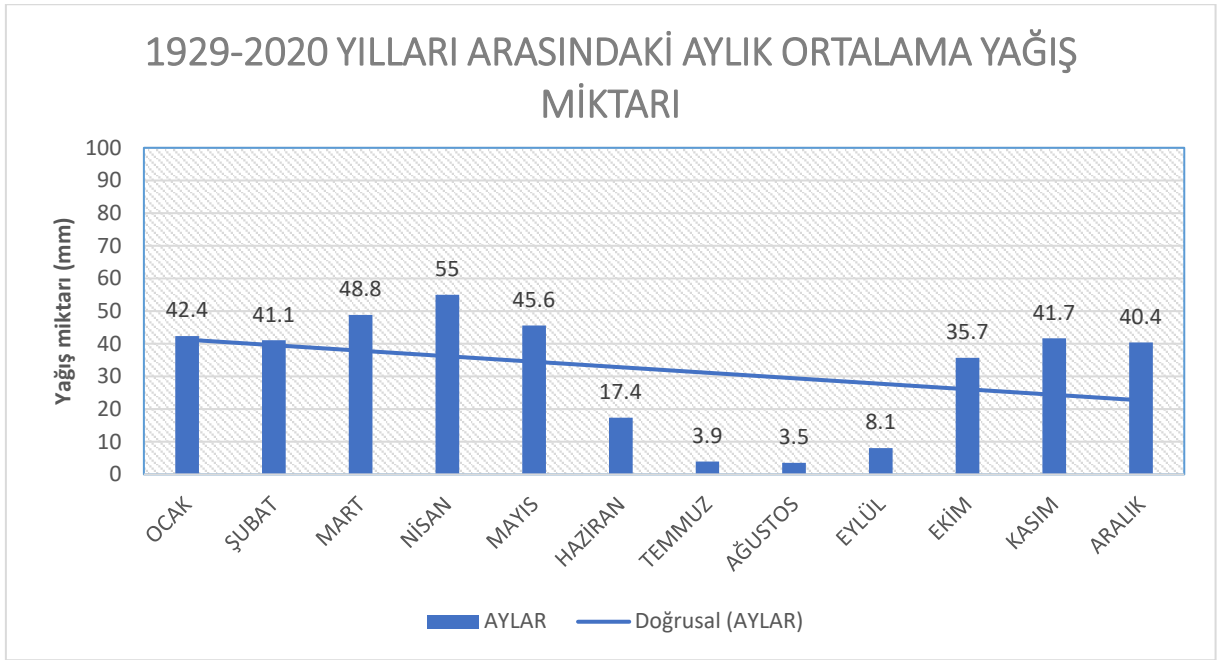
Çalışma alanına ait yağış verileri 01.01.2019 ila 01.09.2021 tarihleri arasındaki 32 aylık bir dönemi kapsamaktadır. Çalışmada, T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı Meteoroloji Genel Müdürlüğü tarafından elde edilen 17199 numaralı istasyonun saatlik yağış verilerinden yararlanılmıştır. Elde edilen yağış verileri SWMM programı tarafından otomatik olarak tanınması için kullanım kılavuzunda belirtilen bir formatta dat dosyası şekline dönüştürülmüş ve programa yüklenmiştir.

Çalışma alanı verileri dikkate alındığında, çalışmanın yapıldığı 01.01.2019 ila 01.09.2021 yılını kapsayan 32 aylık bir dönemde 285 gün yağışlı gün olarak kayıtlara geçmiştir. 2019 yılında toplam 115 gün, 2020 yılında toplam 110 gün, 2021 yılının ilk 8 ayında ise, toplam 60 gün yağışlı gün olarak ölçülmüştür. 32 aylık dönem içerisinde en fazla yağış alan ay 84.10mm yağışla 2020 yılının mart ayında en az yağış alan ay ise, hiç yağış almayan yine 2020 yılının ağustos ayında meydana gelmiştir. Çalışma döneminde en fazla yağış alan gün ise toplam 31,40mm yağışla 25.05.2020 tarihinde gerçekleşmiştir. Çalışmanın yapıldığı periyotta meydana gelen yağış olayları 4 farklı yağış şiddeti basamak aralığına ayrılarak değerlendirildiğinde, yağışlı geçen 285 günün toplam 261 günü 0,10-10,00mm arasında, 20 günü 10,00-20,00mm arasında, 4 günü 20,00-30,00mm arasında, 1 günü ise, 30-40mm arasında olduğu tespit edilmiştir. Aşağıdaki tablo (**Tablo 12.**) çalışma dönemi boyunca belirlenen yıllar arasındaki yağış sınıfı basamaklarına göre toplam yağışlı gün sayısını göstermektedir.

Tablo 12. Yağış sınıfı basamaklarına göre yağışlı günler

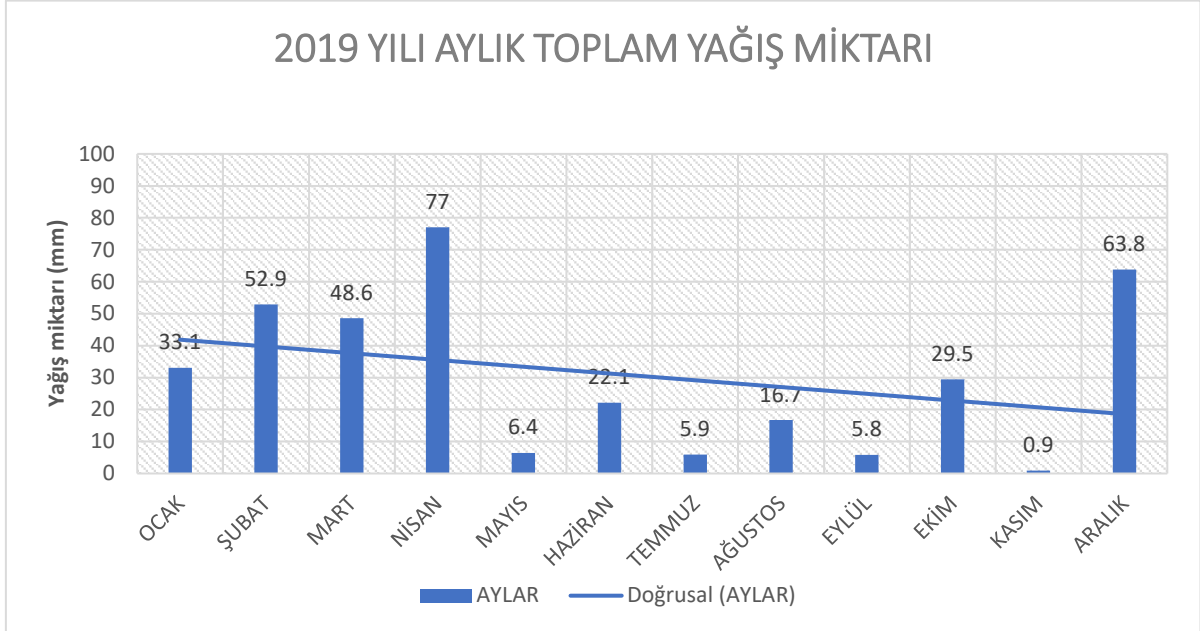
Yağış Şiddet Aralığı/Yıllar	2019	2020	2021 (İlk 8 ay)
00.10-10.00mm	103	100	58
10.00-20.00mm	10	8	2
20.00-30.00mm	2	2	0
30.00-40.00mm	0	1	0

Çalışma dönemi boyunca elde edilen istatistik verilerin geçmiş dönemlerde meydana gelen yağış olaylarıyla karşılaştırılması açısından eski dönemlere ait verilerin de incelenmesi önem arz etmektedir. Bu kapsamda T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı Meteoroloji Genel Müdürlüğü'nün geçmiş dönemlere ait verileri incelendiğinde; Malatya ili yıllık ortalama 383,6mm yağış almaktadır. 1929-2020 yılları arasındaki ölçüm periyodu sonuçlarına göre; ortalama en fazla yağış alan ay 55,00mm yağışla nisan ayı, en az yağış alan ay ise 3,50mm yağışla ağustos ayı olarak kayıtlara geçmiştir. Ölçüm periyodu içerisinde en fazla yağış alan gün ise; 52,60mm yağışla 05.04.1971 tarihinde kayıtlara geçmiştir. Aşağıdaki şekil (**şekil 39.**) 1929-2020 yılları arasındaki aylık ortalama yağış miktarlarını göstermektedir.



Şekil 39. 1929-2020 yılları arasında kentte meydana gelen aylık yağış ortalamaları

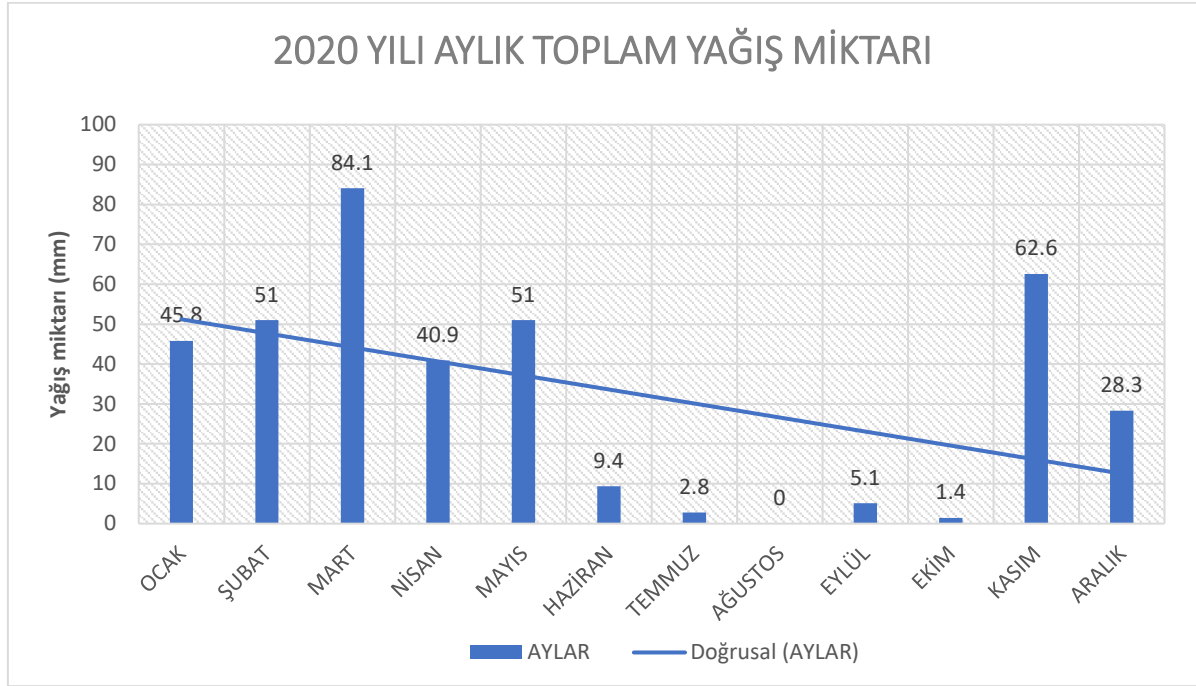
Çalışma periyodu içerisindeki (2019-2020-2021/8ay) veriler dikkate alındığında ise yıllık yağış miktarları belirtilen yıllar için ortalama verilerin altında kalmıştır. Aylık toplam yağış miktarları ise, bazı aylarda ortalamanın üzerine çıkarken bazı aylarda ise mevsim normallerinin altına düşmüştür. Aşağıdaki şekillerden (**şekil 40.**) 2019 yılında, (**şekil 41.**) 2020 yılında ve (**şekil 42.**) 2021 yılının ilk 8 ayında meydana gelen aylık toplam yağış miktarlarını göstermektedir.



Şekil 40. 2019 yılında kentte meydana gelen aylık toplam yağış miktarı

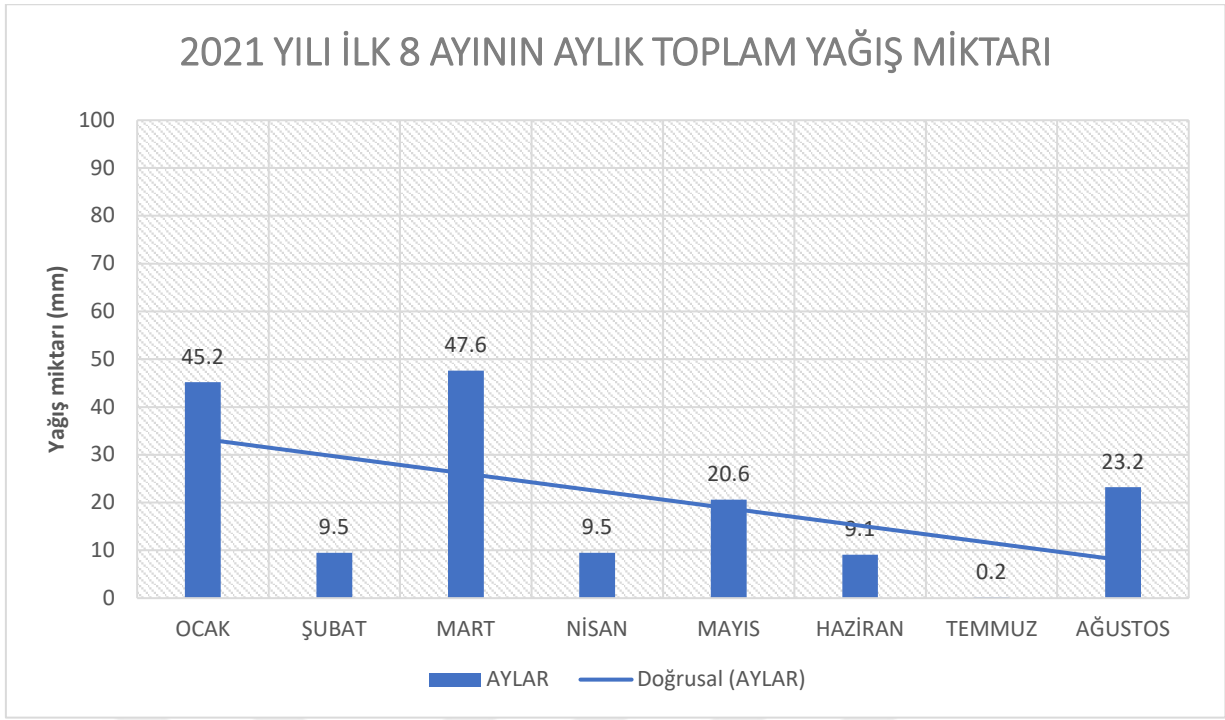
2019 yılı itibariyle en fazla yağış alan ay, toplam 77,00mm yağışla nisan ayı, en az yağış alan ay ise toplam 0,90mm yağışla kasım ayı olarak tespit edilmiştir. Yıllık toplam yağış miktarı ise; 362,70mm olarak kayıtlara geçmiştir. Meteoroloji Genel Müdürlüğü'nün 91 yıllık yağış verileri incelendiğinde, 2019 yılında meydana gelen toplam yağış miktarı 20,90mm daha az olarak mevsim normallerinin altında kalmıştır. Aylık ortalama yağış miktarları göz önüne alındığında ise; şubat, nisan, haziran, temmuz, ağustos ve aralık ayları

olmak üzere toplam 6 aylık bir dönem ortalamasının üzerinde seyrederken, ocak, mart, mayıs, eylül, ekim ve kasım aylarını içeren toplam 6 aylık bir dönem ise ortalamasının altında seyretmiştir.



Şekil 41. 2020 yılında kentte meydana gelen aylık toplam yağış miktarı

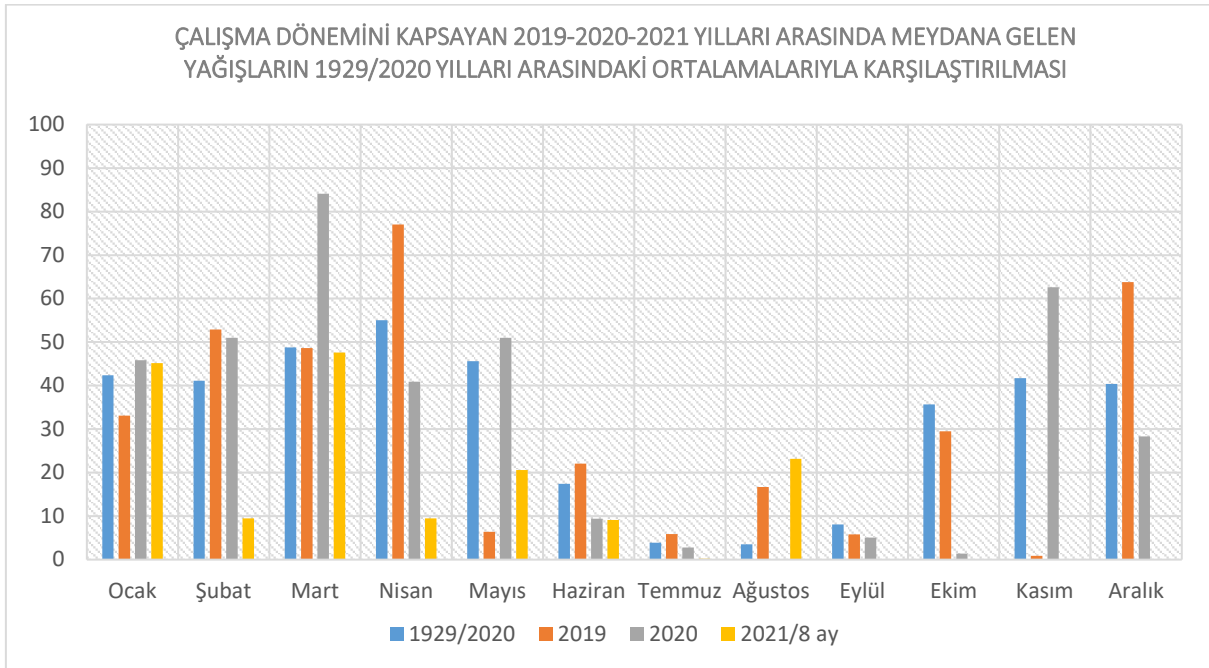
2020 yılı itibariyle en fazla yağış, toplam 84,10mm yağışla mart ayında, en az yağış ise herhangi bir gününde yağış almayan ağustos ayında meydana gelmiştir. Yıllık toplam yağış miktarı ise; 382,40mm olarak ölçülmüştür. Meteoroloji Genel Müdürlüğü'nün 91 yıllık yağış verileri ele alındığında, 2020 yılında meydana gelen toplam yağış miktarı 1,20mm daha az olarak yıllık ortalamasının altında seyretmiştir. Aylık ortalama yağış miktarları ele alındığında ise; ocak, şubat, mart, mayıs ve kasım aylarını içeren toplam 5 aylık bir periyod ortalamasının üzerinde seyrederken; nisan, haziran, temmuz, ağustos, eylül, ekim ve aralık aylarını içeren toplam 7 aylık bir zaman dilimi ise ortalamasının altında seyretmiştir.



Şekil 42. 2021 yılının ilk sekiz ayında kentte meydana gelen aylık toplam yağış miktarı

2021 yılının ilk 8 ayı itibariyle en fazla yağış, toplam 47,60mm yağışla mart ayında, en az yağış ise 0,20mm yağışla temmuz ayında ölçülmüştür. Çalışma alanı 8 aylık bir zaman diliminde toplam 164,90mm yağış olarak diğer yılların aynı periyoduna kıyasla büyük ölçüde altında kalarak kurak bir dönem yaşamıştır.

Çalışma döneminde elde edilen yağış verileri, hem birbirleriyle hem de T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı Meteoroloji Genel Müdürlüğü'nün geçmiş dönemlere (1929/2020) ait aylık toplam yağış verileriyle kıyaslanabilmesi açısından aşağıdaki şekilde (**şekil 43.**) tek bir grafik üzerinden ele alınmıştır.



Şekil 43. T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı Meteoroloji Genel Müdürlüğü'nün 1929/2020 yılları arasındaki verileriyle çalışma dönemine (2019-2020-2021/8ay) ait aylık toplam yağış(mm) verilerinin karşılaştırılması.

Çalışma Alanına Ait Yağmursuyu Altyapı Verileri

YAĞMURSUYU DRENaj HATTI GENEL ŞABLONU



0 1km

Düşük Etkili Gelişim Parametreleri

83

performansı üzerinde değerlendirme yapılmıştır. Bu bileşenler çalışma alanının uygun kısımlarına belli oranlarda entegre edilerek yüzey akışlarını ne derece azaltıldığı üzerinde durulmuştur. Bileşenlerin teknik değerleri belirlenirken referans değerler olarak Bai et al. (2019)' un yapmış olduğu LID bileşenlerinin kapsamlı performans değerlendirmesi modelindeki ve Chui et al. (2016)'nın büyük fırtına olayları karşısında LID uygulama tasarımlarının maliyet etkinliğinin değerlendirildiği çalışmalar esas alınmıştır. Aşağıdaki tablolarda; **Tablo (13.)** yeşil çatılar için, **Tablo (14.)** geçirimli kaplamalar için, **Tablo (15.)** yağmur bahçeleri için ve **Tablo (16.)** ise yağmur varilleri için kullanılan parametreleri ayrıntılı bir şekilde göstermektedir.

Tablo 13. Yeşil çatılar için kullanılan parametreler (Chui et al., 2016; Bai et al., 2019).

Yüzey Katmanı	Sedde Yüksekliği (mm)	Bitki Örtüsü Hacim Oranı		Yüzey Pürüzlülüğü		Yüzey Eğimi (%)	
	50	0.20		0.13		1	
Toprak Katmanı	Kalınlık (mm)	Gözenek lilik	İletkenlik	Alan Kapasite si	İletke nlik Eğimi	Solma Noktası	Emme Başlığı
	200	0.50	750	0.30	10	0.10	87.50
Drenaj katmanı	Kalınlık (mm)	Boşluk Oranı		Pürüzlülük		-	
	60	0.43		0.03		-	

Tablo 14. Geçirimli kaplama için kullanılan parametreler (Chui et al., 2016; Bai et al., 2019).

Yüzey Katmanı	Sedde Yüksekliği	Bitki Örtüsü Hacim Oranı	Yüzey Pürüzlülüğü	Yüzey Eğimi (%)
	25	0	0.12	1
Toprak Katmanı	Kalınlık (mm)	Gözeneklilik	Emme Başlığı	
	150	0.50	45	-
Kaplama Katmanı	Kalınlık (mm)	Boşluk Oranı	Geçirgenlik (mm/h)	
	60	0.13	200	-
Depolama Katmanı	Kalınlık (mm)	Boşluk Oranı	Sızıntı Oranı	Tıkanma Faktörü
	250	0.43	600	0
Boşaltma Katmanı	Akış Katsayısı	Akış Kuvveti	Ofset yüksekliği (mm)	
	0.69	0.50	6	-

Tablo 15. Yağmur bahçesi için kullanılan parametreler (Chui et al., 2016; Bai et al., 2019).

Yüzey Katmanı	Sedde Yüksekliği (mm)		Bitki Örtüsü Hacim Oranı		Yüzey Pürüzlülüğü		Yüzey Eğimi
	150		0.10		0.12		0.30
Toprak Katmanı	Kalınlık (mm)	Gözeneklilik	Alan Kapasitesi	Solma Noktası	İletkenlik (mm/h)	İletkenlik Eğimi	Emme Başlığı
	500	0.30	0.20	0.10	500	10	87.50
Depolama Katmanı	Kalınlık (mm)		Boşluk Oranı		Sızıntı Oranı (mm/h)		Tıkanma Faktörü
	250		0.3		400		0
Boşaltma Katmanı	Akış Katsayısı		Akış Kuvveti		Ofset Yüksekliği (mm)		-
	0		0.50		6		-

Tablo 16. Yağmur varili için kullanılan parametreler (Chui et al., 2016; Bai et al., 2019).

Depolama Katmanı	Varil Yüksekliği (mm)			
	2000			
Boşaltma Katmanı	Akış Katsayısı	Akış Kuvveti	Ofset Yüksekliği(mm)	Boşaltma Gecikmesi (saat)
	0.68	0.50	125	5.8

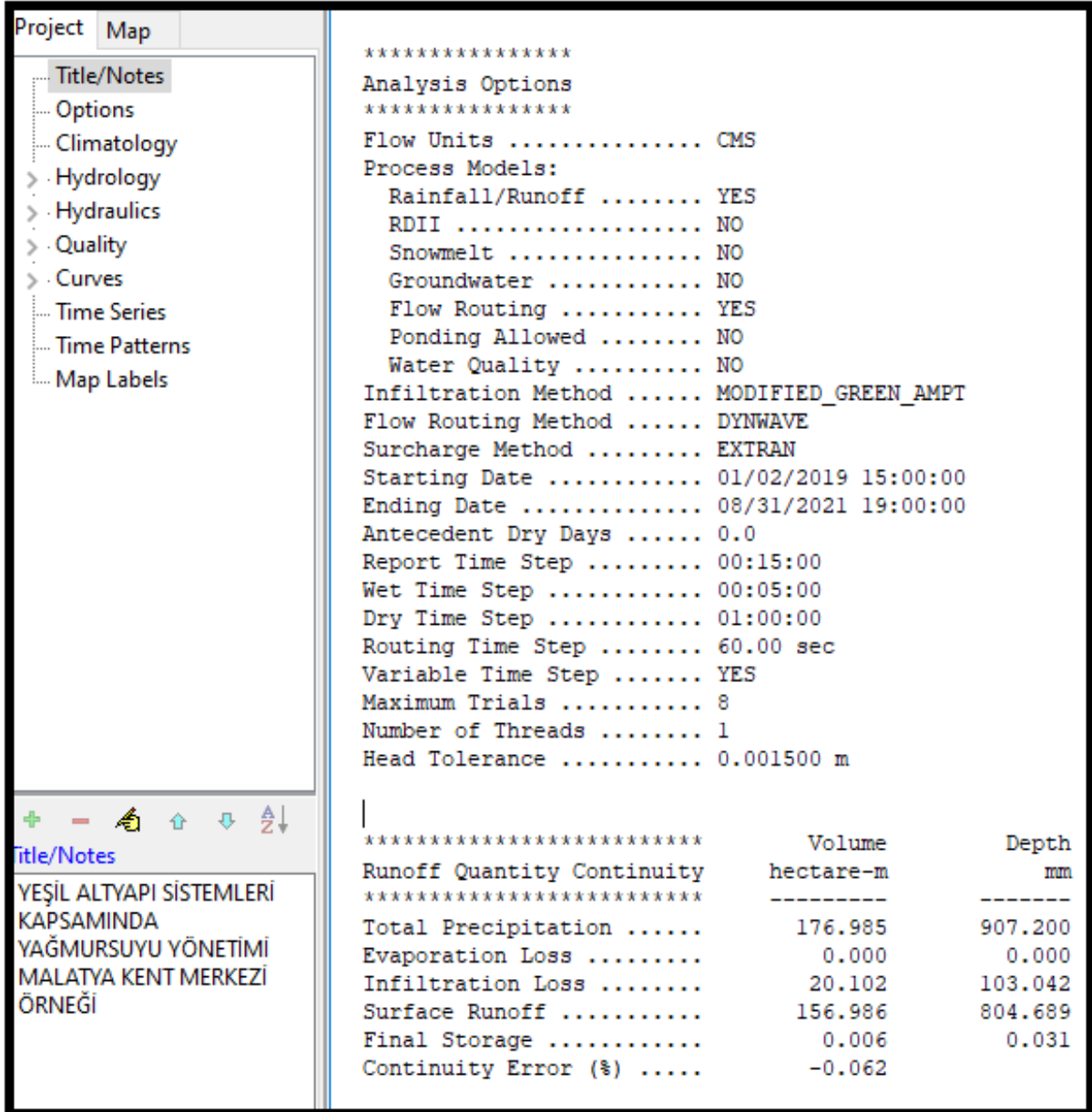
Farklı Senaryolara Göre Yağmur Suyu Yüzey Akışlarının Hesaplanması

Çalışma alanı öncelikle mevcut yağmursuyu altyapısının potansiyelinin anlaşılması ve eldeki veriler ışığında mevcut altyapının meydana getirdiği yüzeysel akış miktarının belirlenmesi amacıyla herhangi bir DEG bileşeni kullanılmadan simüle edilmiş ve gerekli ölçümler yapılmıştır. Daha sonra 6 farklı senaryo geliştirilerek 4 farklı DEG bileşeninin (yeşil çatı, yağmur bahçesi, geçirgen kaplama ve yağmur varilleri) ayrı ayrı ve birleşik olarak etkinliği tespit edilmiştir. Geliştirilen senaryolar şu şekildedir.

- ❖ Senaryo 1: Herhangi bir DEG bileşeni olmadan mevcut altyapının analizi,
- ❖ Senaryo 2: Tüm havzalardaki toplam çatı alanlarının %20'sinin yeşil çatı olarak planlanması,
- ❖ Senaryo 3: Tüm havzalardaki toplam çatı alanlarının %20 oranlık bir kısmından yağmurların toplanması üzere yağmur varillerinin entegre edilmesi,
- ❖ Senaryo 4: Tüm havzalardaki çatı alanları dışında kalan geçirimsiz alanların %20'si geçirimli kaplama ile tasarlanması,
- ❖ Senaryo 5: Tüm havzalardaki toplam geçirimsiz alanların %20'si yağmur bahçesi olarak tasarlanması,
- ❖ Senaryo 6: Tüm sistemlerin belirtilen oranlarda birlikte tasarlanması.

Senaryo 1: Mevcut Altyapı Analizi

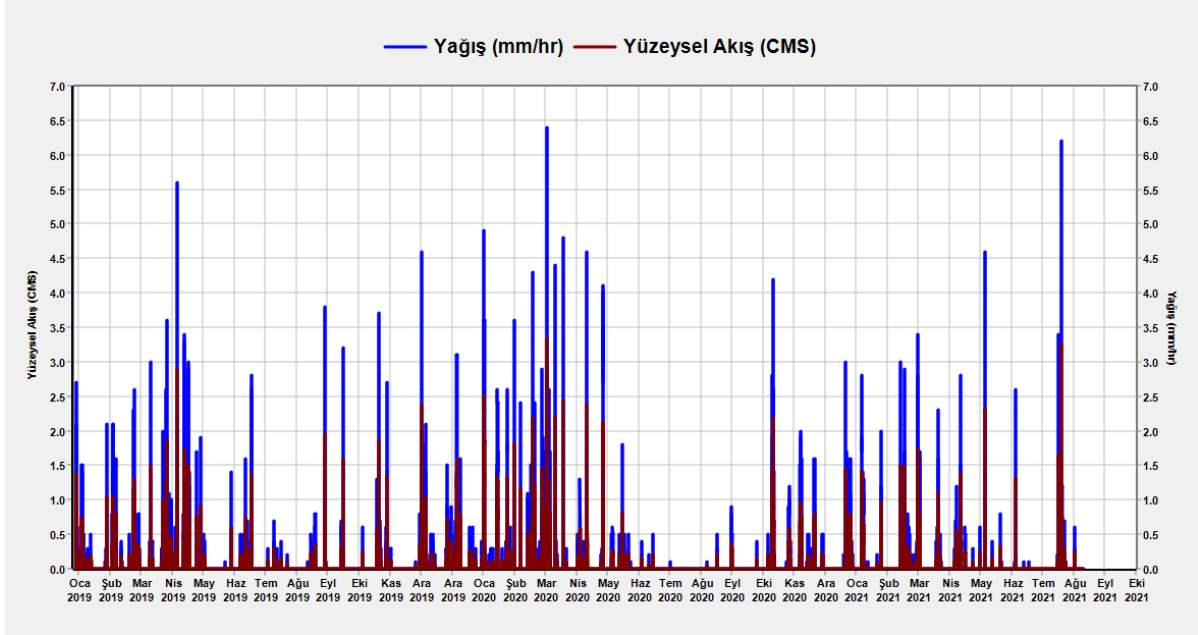
Planlama sahası mevcut altyapı verileri kullanılarak simüle edilmiş ve simülasyon sonuçları %0.062 süreklilik hatasıyla oldukça ihmal edilebilir bir kütle dengesi olduğunu göstermiştir. Ölçüm sonuçlarına göre; çalışma alanına 32 aylık bir dönemde düşen toplam 907,20 mm yağışın 804,689 mm sinin yüzeysel akışa geçtiği tespit edilmiştir. Havzalarda meydana gelen yüzeysel akışın çıkış noktalarındaki maksimum toplam değeri 8,378 m³/s olarak ölçülmüştür. Bu durumda havzalarda meydana gelen toplam yüzeysel akış değeri %88,70 olarak meydana gelmiştir. Aşağıdaki şekilde (**şekil 45.**) SWMM programında ölçülen 01.02.2019 tarihi ile 08.31.2021 tarihleri arasındaki özet sonuçlarını göstermektedir. Ölçüm değerleri cm³/s olarak ölçülmüş olup buharlaşmadan kaynaklı kayıplar göz ardı edilmiştir. Ölçümler 60 saniyelik zaman adımına göre tespit edilmiş ve raporlanmıştır.



Şekil 45. Mevcut altyapı verileriyle SWMM programında oluşturulmuş özet sonuçları

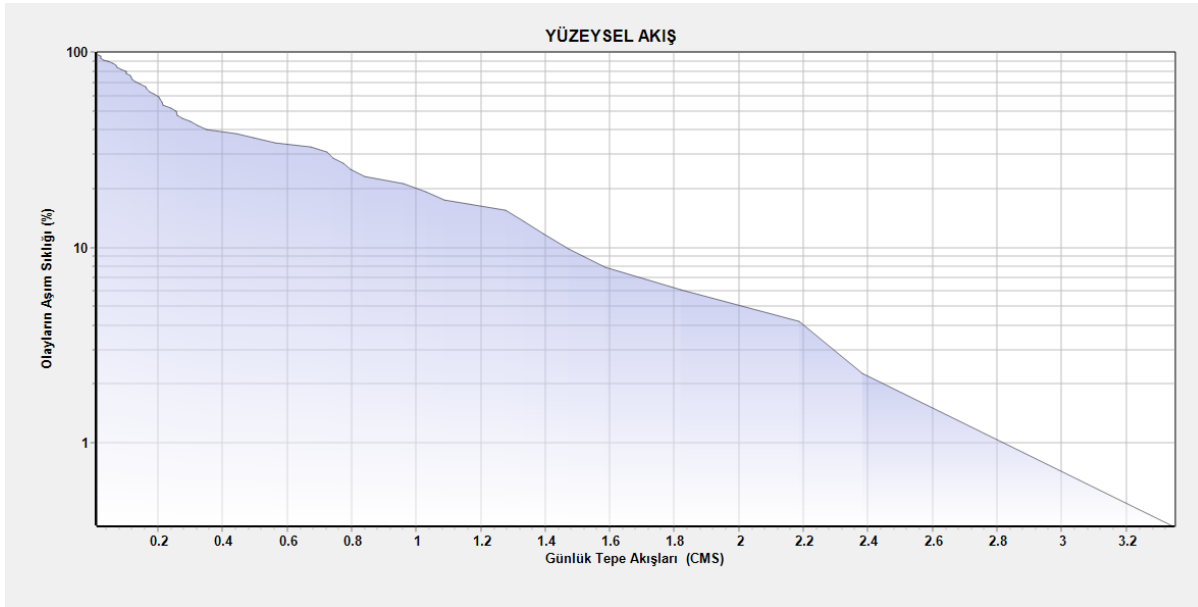
Havzalarda meydana gelen yüzeysel akışlar, yağış yoğunluğunun 3mm üzerine çıktığı zaman diliminde 1,5 m³/s üzerine çıktığı, yağış yoğunluğunun 5 mm'nin üzerine çıktığı zaman diliminde ise 2,5 m³/s üzerine çıktığı tespit edilmiştir. Havzalarda meydana gelen en fazla yüzeysel akış miktarı yağış yoğunluğunun 6.40 mm olduğu 31.03.2020 tarihinde 3,34 m³/s

olarak ölçülmüştür. En fazla yüzeysel akışlar geçirimsiz alan miktarlarının en fazla olduğu alanlarda meydana gelmiş olup genellikle $2\text{m}^3/\text{s}$ altında kalmıştır. Aşağıdaki şekil (şekil 46.) havlarda meydana gelen yüzeysel akışın yağış yoğunluğuna göre zamana bağlı miktarını göstermektedir.



Şekil 46. DEG bileşenleri olmadan meydana gelen yüzeysel akış-yağış grafiği

Çalışma periyodu boyunca günlük bazda meydana gelen tepe akış olaylarının sayısı 263 olarak gerçekleşmiştir. Olayların sıklığı 0,271 olup maksimum değer $3,34\text{ m}^3/\text{s}$ olarak ölçülmüştür. Aşağıdaki şekil (şekil 47.) günlük tepe akış oranlarına göre meydana gelen olayların aşım sıklığını göstermektedir.



Şekil 47. DEG bileşenleri olmadan meydana gelen olayların aşım sıklığı-günlük tepe akışları grafiği

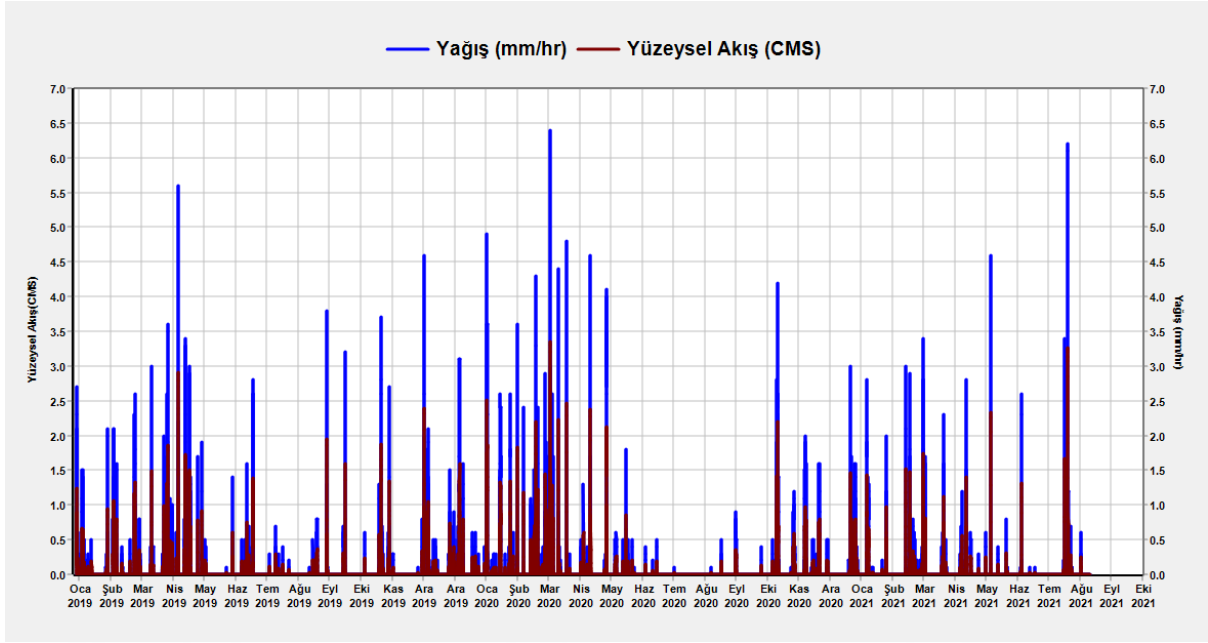
Senaryo 2: Havzalara Yeşil Çatı Entegre Edilmesi

Planlama sahasına mevcut altyapıya ilaveten her bir havzanın toplam çatı alanlarının %20'sini (bu alanlar 189.658 m²'lik bir alanı kapsamakta olup toplam alanın %9,72'sine tekabül etmektedir) kapsayacak şekilde yeşil çatı bileşeni entegre edilmiş ve simülasyon sonuçları tekrar edilmiştir. Yeşil çatı bileşenleri her bir havzaya 50m²'lik üniteler şeklinde ve toplam havza alanlarıyla orantılı bir şekilde yerleştirilmiştir. Ünitelerin drenaj tabakası tarafından tahliye edilen yağmur suları ise geçirimli alanlara yönlendirilmiştir. Simülasyon sonuçları %0.064 süreklilik hatasıyla oldukça ihmal edilebilir bir kütle dengesi olduğunu ortaya koymuştur. Ölçüm sonuçlarına göre; havzalarda meydana gelen toplam yüzeysel akış miktarı 787,786mm ve yüzeysel akış yüzdesi %86,80 olarak gerçekleşmiştir. Aşağıdaki şekil (şekil 48.) yeşil çatı bileşenlerinin havzalara eklenmesinden sonra Yağmur Suyu Yönetim Modelinde (SWMM) oluşturulmuş durum özet raporunu göstermektedir.

*****	Volume	Depth
Runoff Quantity Continuity	hectare-m	mm
*****	-----	-----
Initial LID Storage	0.378	1.940
Total Precipitation	176.985	907.200
Evaporation Loss	0.000	0.000
Infiltration Loss	22.552	115.599
Surface Runoff	153.689	787.786
LID Drainage	0.095	0.489
Final Storage	1.141	5.847
Continuity Error (%)	-0.064	

Şekil 48. Yeşil çatı bileşenlerinin yer aldığı durum rapor özeti.

Sonuçlar her bir yeşil çatı ünitesinin 2mm altındaki tüm yağışları depoladığını göstermektedir. Yüzeysel akış miktarı ise yeşil çatı sistemlerinde mevcut altyapı verilerine istinaden çok fazla düşüş göstermemiştir. Bunun sebebi yeşil çatı sistemlerinin diğer alanlardan yağış almayarak sadece üzerine düşen yağışı alması ve alanda bulunan yapıların eski olmasından dolayı toprak (yetiştirme) katmanının ince olarak seçilmesidir. Ayrıca alan olarak büyük bir havzada çalışma yapılması ve yeşil çatı sistemlerinin toplam alan miktarına göre düşük seviyede entegre edilmesi bu durumun yaşanmasının başlıca sebepleri arasında gösterilebilmektedir. Bu olumsuzluklara karşın yeşil çatı sistemleri mevcut altyapı sistemleriyle entegreli bir şekilde planlandığında toplam yüzey akışlarında %2,15 oranında bir düşüş meydana gelmiştir. Zamana bağlı yağış-yüzeysel akış grafiğine göre havzalarda meydana gelen maksimum yüzeysel akış miktarı 3,35 m³/s olarak gerçekleşmiştir. Aşağıdaki şekil (şekil 49.) yeşil çatı bileşenlerinin eklenmesiyle meydana gelen yüzeysel akış-yağış grafiğini göstermektedir.



Şekil 49. Yeşil Çatı sistemlerinin eklenmesiyle oluşan yüzeysel akış-yağış grafiği

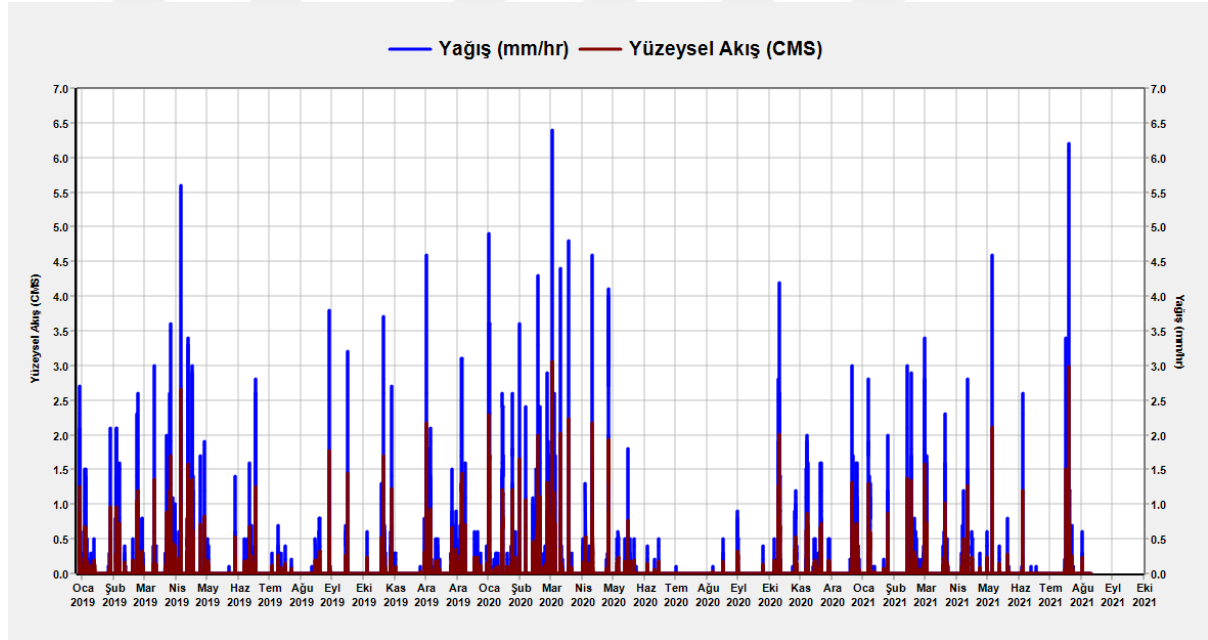
Senaryo 3: Havzalara Yağmur Varili Entegre Edilmesi:

Planlama sahasında yer alan her bir havzadaki toplam çatı alanlarının %20'sinden akan yağmur sularının depolanması ve daha sonraki içilemez su ihtiyaçlarında kullanılmak üzere her bir havzaya yaklaşık 500m²'lik çatı alanına 1 adet olmak üzere 4m³ depolama hacmine (Yükseklik: 2000 mm, Çap: 1600 mm) sahip yağmur varilleri entegre edilmiştir. Bu depolama üniteleri her bir havzaya alanlarıyla orantılı olacak şekilde toplamda 1872 adet yerleştirilmiştir. Bu ünitelerinin toplam depolama hacmi ise 7.488m³ olup çalışma periyodu boyunca her bir ünite dolduğu zaman kullanılması koşuluyla 23 defa tam kapasiteyle dolabilmektedir. Bu durumda 172.057 m³ bir su tasarrufu sağlanmış olacaktır. Tema'nın verileri dikkate alındığında; konutlarda kullanılan suyun %26'sı tuvaletlerde kullanıldığı ve günlük kişi başı belediye şebekesinden 217litre su kullanıldığı belirtilmektedir. Bu durumda günlük kişi başı tuvaletlerde kullanılan su miktarı 56.50 litre olmaktadır. Çalışma alanında toplanan suların tuvaletlerde kullanılması değerlendirilirse 3 kişilik bir aileye sahip 10.000 konutun 101 günlük tuvalet giderlerini karşılayabileceği hesap edilmiştir. Bunun yanı sıra simülasyon sonuçları uzun süreli yağış olaylarında kullanılan yağmur varili/sarnıç gibi sistemlerin toplam yüzeysel akışları azalttığını ortaya koymuştur. Simülasyon sonuçlarına; çalışma periyodu boyunca düşen toplam 907,20mm yağışın 731,079mm'si yüzeysel akışa sebebiyet verdiğini ve yüzeysel akış oranının %80,60 olduğunu göstermektedir. Mevcut altyapı bulguları dikkate alındığında toplam yüzeysel akış miktarı %88,70 den %80,60'a gerileyerek %8,10 oranında bir düşüş meydana gelmiştir. Aşağıdaki şekil (şekil 50.) yağmur varili bileşenlerinin havzalara eklenmesinden sonra Yağmur Suyu Yönetim Modelinde (SWMM) oluşturulmuş durum özet raporunu göstermektedir.

*****	Volume	Depth
Runoff Quantity Continuity	hectare-m	mm
*****	-----	-----
Total Precipitation	176.985	907.200
Evaporation Loss	0.000	0.000
Infiltration Loss	34.416	176.412
Surface Runoff	142.626	731.079
Final Storage	0.053	0.272
Continuity Error (%)	-0.062	

Şekil 50. Yağmur varili sistemlerinin yer aldığı durum raporları.

Çalışma periyodu boyunca havzalarda meydana gelen maksimum yüzeysel akış miktarı ise yağış derinliğinin 6,40mm olduğu zaman diliminde 3,05 m³/s olarak ölçülmüştür. Aşağıdaki şekil (şekil 51.) yağmur varili bileşenlerinin eklenmesiyle meydana gelen yüzeysel akış-yağış grafiğini göstermektedir.



Şekil 51. Yağmur varili sistemlerinin eklenmesiyle oluşan yüzeysel akış-yağış grafiği

Senaryo 4: Havzalara Geçirimli Kaplama Entegre Edilmesi:

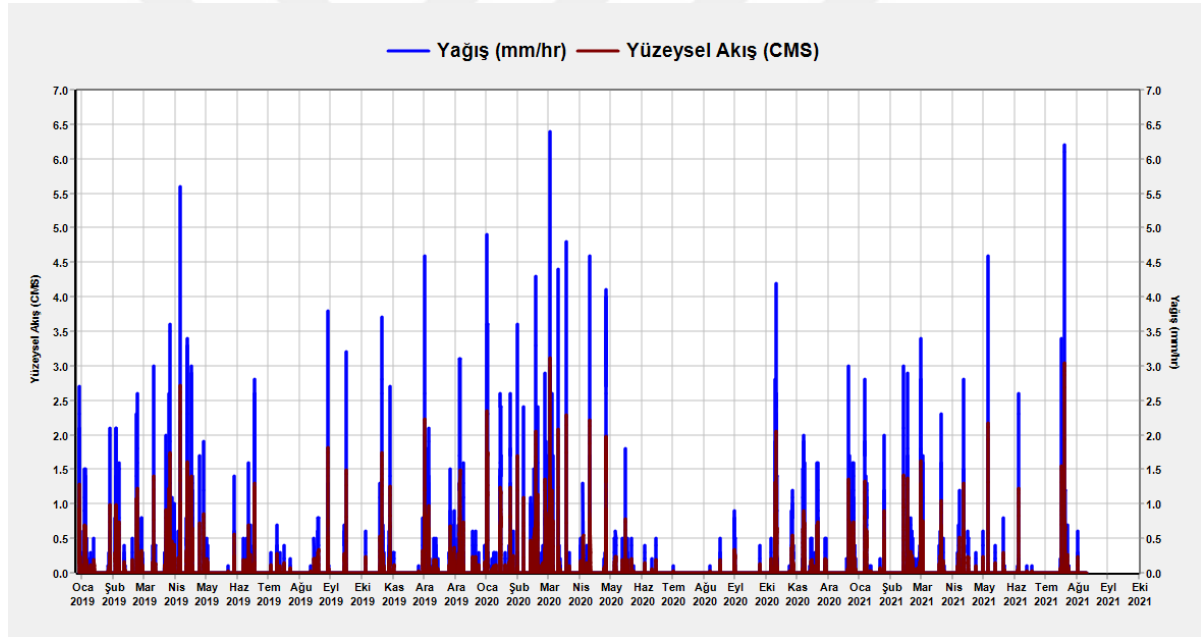
Planlama sahasında yer alan bölünmüş havzaların çatı alanları hariç diğer geçirimsiz alanların (beton ve asfalt yüzeyler) %20'sine geçirimli kaplama entegre edilerek simülasyon sonuçları tekrar edilmiştir. Geçirimli kaplamanın entegre edildiği alanlar yaklaşık olarak tüm alanın %6,73 üne tekabül etmektedir. Simülasyon sonuçlarına göre; çalışma periyodu içerisinde düşen toplam 907,20mm yağışın 751,60mm si yüzeysel akışa geçmiş ve geri kalan yağışın 155,11mm si ise geçirimli yüzeyler tarafından infiltre edilmiştir. Simülasyon tarafından elde edilen özet ve durum raporları aşağıdaki şekilde (şekil 52.) gösterilmiştir.

***** Runoff Quantity Continuity *****			Volume hectare-m	Depth mm
Initial LID Storage			0.196	1.006
Total Precipitation			176.985	907.200
Evaporation Loss			0.000	0.000
Infiltration Loss			30.260	155.111
Surface Runoff			146.629	751.601
Final Storage			0.398	2.041
Continuity Error (%)			-0.060	

Outfall Node	Flow Freq. Pcnt.	Avg. Flow CMS	Max. Flow CMS	Total Volume 10^6 ltr
Out1	36.52	0.016	0.218	100.594
Out2	72.44	0.078	6.329	1184.119
Out3	59.95	0.031	0.647	364.208
Out4	50.05	0.060	0.962	525.860

Şekil 52. Geçirimli kaplama sistemlerinin yer aldığı durum ve özet raporları

Dört adet çıkış noktasının bulunduğu sistemde tüm havzalarda meydana gelen toplam akışın çıkış noktasındaki maksimum değerleri 8,156m³ olarak ölçülmüştür. Havzalarda meydana gelen yüzeysel akışın yüzdelik olarak değeri ise, %82,85 olarak tespit edilmiştir. Aşağıdaki şekil (**şekil 53.**) geçirimli kaplama bileşenlerinin eklenmesiyle meydana gelen yüzeysel akış-yağış grafiğini göstermektedir.



Şekil 53. Geçirimli kaplama sistemlerinin eklenmesiyle oluşan yüzeysel akış-yağış grafiği

Havzalarda meydana gelen en fazla yüzeysel akış miktarı, yağış yoğunluğunun 6,40mm olduğu zaman diliminde 3,12m³ olarak tespit edilmiştir. Bu değer herhangi bir DEG bileşeni kullanılmadan önce ölçülen değere göre 0,22m³ daha düşük bir değerdir.

Senaryo 5: Havzalara Yağmur Bahçesi Entegre Edilmesi:

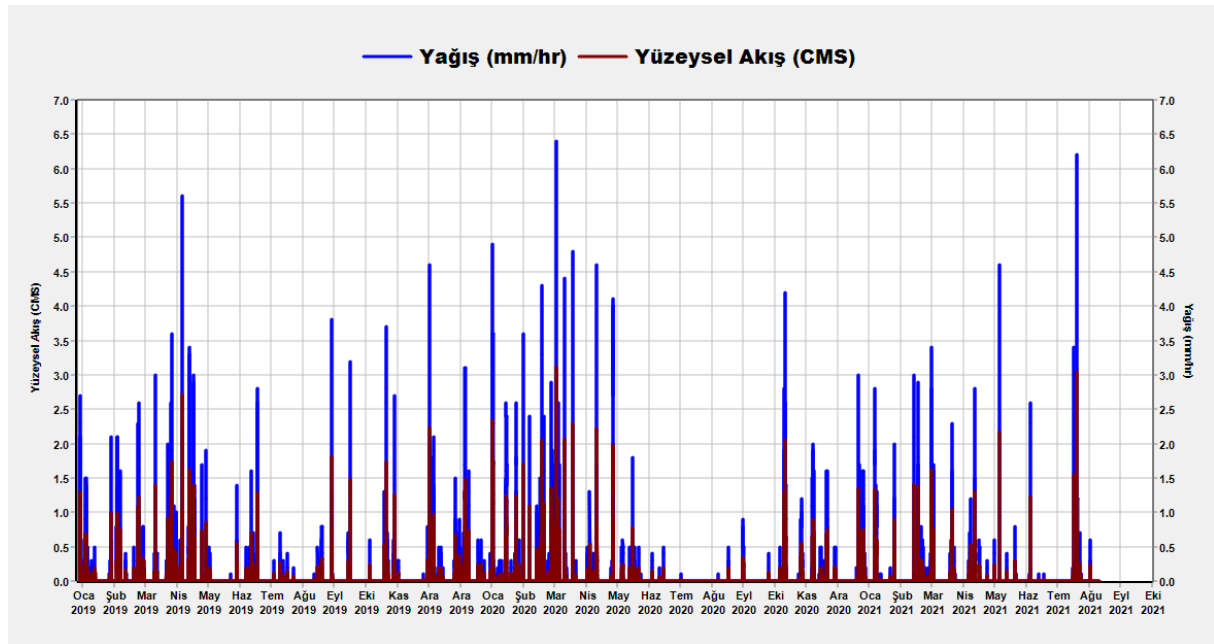
Çalışma alanına, her bir havzanın çatı alanları hariç diğer geçirimsiz alanların %20'sinden akan suları tutması üzerine havzaların alanlarıyla orantılı olmak üzere yağmur bahçesi üniteleri yerleştirilmiş ve simülasyon sonuçları tekrar edilmiştir. Simülasyon sonuçları %0.060 süreklilik hatasıyla ihmal edilebilir bir kütle dengesi olduğunu göstermiştir. Simülasyon sonuçlarına göre 32 aylık bir çalışma periyodu içerisinde düşen toplam 907,20mm yağışın 152,763mm'si geçirimli yüzeyler ve DEG üniteleri tarafından emilerek infiltre edilmiştir. Toplam yağışın 751,60mm'si ise yüzey akışlarına sebep olmuştur. Yüzdelik

bir dilim içerisinde alana düşen toplam yağışın %82,85'i yüzeysel akışa geçmiştir. Alana yerleştirilen Düşük Etkili Gelişim (DEG) ünitelerinin ilk depolama miktarı 3,35mm ve son depolama miktarı 6,74mm olarak ölçülmüştür. Aşağıdaki şekil (şekil 54.) yağmur bahçesi bileşenlerinin havzalara eklenmesinden sonra Yağmur Suyu Yönetim Modelinde (SWMM) oluşturulmuş durum raporunu göstermektedir.

*****	Volume	Depth
Runoff Quantity Continuity	hectare-m	mm
*****	-----	-----
Initial LID Storage	0.654	3.354
Total Precipitation	176.985	907.200
Evaporation Loss	0.000	0.000
Infiltration Loss	29.802	152.763
Surface Runoff	146.629	751.601
Final Storage	1.314	6.736
Continuity Error (%)	-0.060	

Şekil 54. Yağmur Bahçesi sistemlerinin yer aldığı simülasyon durum raporları

Çalışma periyodu boyunca meydana gelen maksimum yüzeysel akış miktarı 3,12 m³/s olarak tespit edilmiştir. Havzaların çıkış noktalarındaki maksimum akış hacmi ise 8,16 m³/s olarak ölçülmüştür. Günlük bazda meydana gelen yüzeysel akış olaylarının sayısı 263 ve olayların meydana gelme sıklığı ise 0,271 olarak belirlenmiştir. Günlük maksimum tepe akışı 01.04.2020 tarihinde 3,12 m³/s olarak gerçekleşmiştir. Zamana bağlı olarak meydana gelen yüzeysel akış-yağış grafiğine göre; havzalara yağmur bahçesi sistemlerinin yerleştirilmesiyle toplam yüzeysel akış oranı %88,70 den %82,85'e gerileyerek %6,60 oranında bir düşüş meydana gelmiştir. Aşağıdaki şekil (şekil 55.) yağmur bahçesi bileşenlerinin eklenmesiyle meydana gelen yüzeysel akış-yağış grafiğini göstermektedir.



Şekil 55. Yağmur bahçesi sistemlerinin eklenmesiyle oluşan yüzeysel akış-yağış grafiği

Havzalarda meydana gelen yüzeysel akışlar daha çok Eylül 2019-Mayıs2020 tarihleri arasında gerçekleşmiştir. Yağış miktarının 2 m³/s olduğu zaman diliminde alana 4mm üzerinde, yağış miktarının 3m³/s olduğu zaman diliminde ise alana 6mm üzerinde yağış düştüğü tespit edilmiştir.

Senaryo 6: Tüm Sistemlerin Bir Arada Değerlendirilmesi

Havzalara, daha önceden simüle edilmiş olan ilk 5 senaryonun birleşimi olarak 6. bir senaryo geliştirilerek tüm sistemler bir arada değerlendirilmiştir. Havzalara yerleştirilen DEG bileşenlerinin toplam alana göre oranları ise şu şekildedir.

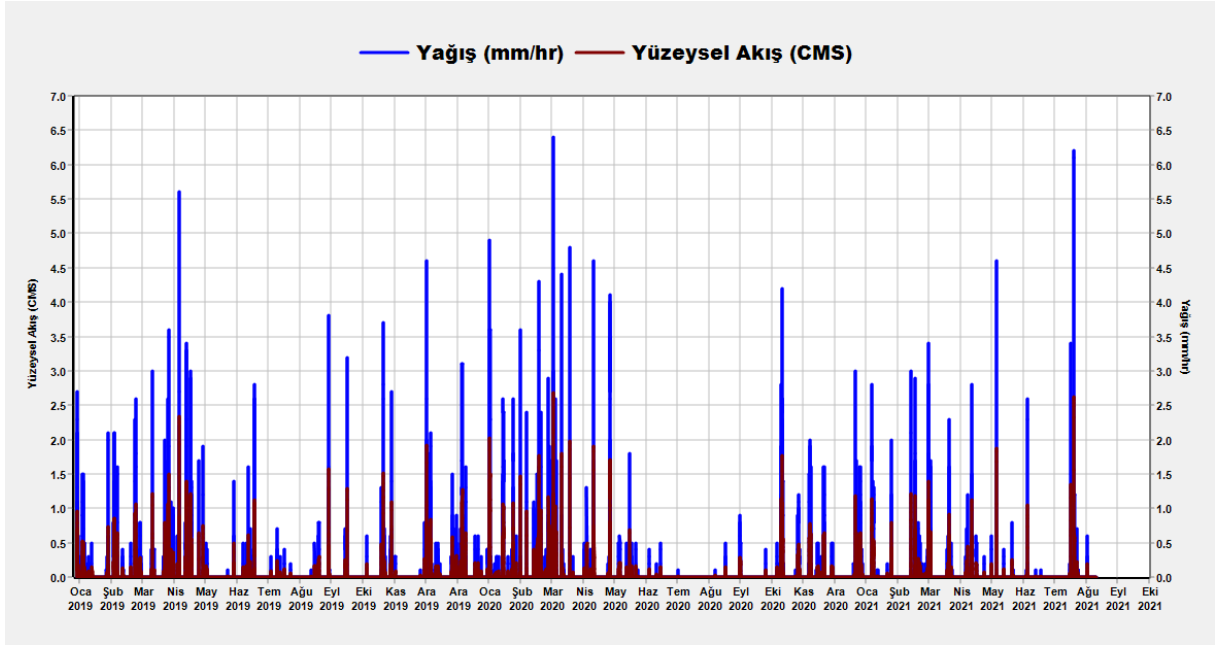
- ❖ Yeşil Çatı: Toplam çatı alanlarının %20 sine tekabül etmekte olup tüm alanın %9,72'ini kapsamaktadır.
- ❖ Yağmur Varilleri: Toplam çatı alanlarının %20 sinden yağmur sularının toplanması düşünülmüş olup tüm alanın %9,72'ine tekabül etmektedir.
- ❖ Geçirimli Kaplamalar: Çatı alanları dışında kalan diğer geçirimsiz alanların %20'sini kapsamakta olup, toplam alanın %6,73'ine tekabül etmektedir.
- ❖ Yağmur Bahçeleri: Çatı alanları dışında kalan geçirimsiz alanların %20'sini kapsamakta olup, toplam alanın %6,73'ine tekabül etmektedir.

Tüm sistemler havzalara yerleştirildikten sonra toplam alanın %32,8'ini direkt (yeşil çatı, geçirimli kaplama, yağmur bahçeleri) ve dolaylı yoldan (yağmur varilleri) Düşük Etkili Gelişim (DEG) bileşenleri oluşturmuştur. DEG bileşenleri eklendikten sonra çalışma periyodunu kapsayacak şekilde simülasyon sonuçları tekrar edilmiş ve %0,061 süreklilik hatasıyla oldukça ihmal edilebilir bir kütle dengesi olduğunu göstermiştir. Simülasyon sonuçlarına göre; çalışma periyodu süresince metrekaareye düşen toplam 907,20mm yağışın 626mm si yüzeysel akışa neden olmuştur. Bu durumda toplam yüzeysel akış oranı %69 olarak gerçekleşmiştir. Aşağıdaki şekil (**şekil 56.**) tüm bileşenlerin (yeşil çatı-yağmur varili-geçirimli kaplama-yağmur bahçesi) havzalara eklenmesinden sonra Yağmur Suyu Yönetim Modelinde (SWMM) oluşturulmuş durum raporunu göstermektedir.

*****	Volume	Depth
Runoff Quantity Continuity	hectare-m	mm
*****	-----	-----
Initial LID Storage	1.230	6.305
Total Precipitation	176.985	907.200
Evaporation Loss	0.000	0.000
Infiltration Loss	53.304	273.227
Surface Runoff	122.127	626.008
Final Storage	2.892	14.824
Continuity Error (%)	-0.061	

Şekil 56. Tüm sistemlerin entegreli bir şekilde yer aldığı simülasyon durum raporları

Mevcut altyapının meydana getirdiği toplam yüzeysel akış oranı (%88,70) dikkate alındığında DEG bileşenlerinin eklenmesiyle toplam %22,20 oranında bir azalma meydana gelmiştir. Aşağıdaki şekil (**şekil 57.**) tüm bileşenlerin (yeşil çatı-yağmur varili-geçirimli kaplama-yağmur bahçesi) havzalara eklenmesiyle meydana gelen yüzeysel akış-yağış grafiğini göstermektedir.



Şekil 57. Tümü bileşenlerin eklenmesiyle meydana gelen yüzeysel akış-yağış grafiği

Grafiğe göre havzalarda meydana gelen en fazla yüzeysel akış miktarı yağış yoğunluğunun 6,40mm olduğu zaman diliminde 2,69 m³/s olarak tespit edilmiştir. Toplam yüzeysel akışın çıkış noktalarındaki maksimum değeri ise 7,96 m³/s olarak ölçülmüştür.

Günlük tepe akış istatistiklerine göre; toplam çalışma periyodu boyunca 269 olay meydana gelmiştir. Olayların meydana gelme sıklığı 0,277 olarak tespit edilmiş olup maksimum değer 2,688 m³/s ve ortalama değer ise; 0,434 m³/s olarak ölçülmüştür. Aşağıdaki şekil (şekil 58.) Yağmur Suyu Yönetim Modelinde (SWMM) elde edilen özet istatistiklerini göstermektedir.

SUMMARY STATISTICS	
Object	System
Variable	Runoff (CMS)
Event Period	Daily
Event Statistic	Peak (CMS)
Event Threshold	Runoff > 0.0000 (CMS)
Event Threshold	Event Volume > 0.0000 (m3)
Period of Record	01/02/2019 to 08/31/2021
Number of Events	269
Event Frequency*.....	0.277
Minimum Value	0.000
Maximum Value	2.688
Mean Value	0.434
Std. Deviation	0.520
Skewness Coeff.	1.746
*Fraction of all days containing an event.	

Şekil 58. Tümü sistemlerin kullanılmasıyla tespit edilen özet istatistikleri.

Tümü sistemler entegreli bir şekilde planlandığında bir sistemde biriken fazla suyun tahliyesi başka bir sisteme yönlendirilebilmektedir. Örneğin yağmur varillerinde depolanan sular yağmur varillerindeki depolama hacmini aştığında fazla suyun tahliyesi yağmur

bahçelerine yönlendirilmektedir. Benzer şekilde yeşil çatılarda tutulan yağmur sularının tahliyesi yine drenaj kanalları vasıtasıyla yeşil alanlara veya yağmur bahçesine yönlendirilerek belediye altyapısına olabilecek baskı azaltılmaktadır. Yapılan çalışmalarda sistemlerde biriken suların tahliyesi geçirimli alanlara yönlendirilmiştir.



SONUÇ VE ÖNERİLER

Sonuçlar

Yapılan çalışma Yeşil altyapı / DEG bileşenlerinin şehirlerde geleneksel gri altyapıya alternatif olarak kullanılabileceğini ve yağmur suyunun meydana getirdiği yüzeysel akışları belli oranlarda azalttığı tespit edilmiştir. 32 aylık yağış verileri kullanılarak yapılan ölçümlerde mevcut yağmursuyu altyapısının mevcut alan verileriyle %88,70 oranında yüzeysel akışa sebep olduğu belirlenmiştir. Buna karşın toplam çatı alanlarının %20 si (tüm alanın yaklaşık %9,72'si) yeşil çatı bileşenleriyle kaplandığında toplam yüzeysel akışların %2,15 oranında azaldığı, toplam çatı alanlarının %20 sinden toplanan suların yağmur varillerine yönlendirilmesiyle yüzeysel akışların %8,10 oranında azaldığı, çatı alanları dışında kalan diğer geçirimsiz alanların %20'si (tüm alanın yaklaşık 6,73'ü) geçirimli kaplama ile planlandığında yüzeysel akışların %6,60 oranında azaldığı ve yine çatı alanları dışında kalan geçirimsiz alanların %20 si yağmur bahçesi ile planlandığında yüzeysel akışların aynı oranda %6,60 oranında azaldığı tespit edilmiştir. Aşağıdaki tabloda (**Tablo 17.**) bileşenlerin eklenme oranları ve akış yüzdeleri özet olarak verilmiştir.

Tablo 17. Geliştirilen senaryolara göre bileşenlerin eklenme oranları ve yüzeysel akış yüzdeleri.

SENARYOLAR	EKLENEN BİLEŞEN	BİLEŞENLERİN EKLENME YÜZESİ	TOPLAM ALANA GÖRE EKLENME YÜZDESİ	TOPLAM YÜZEYSEL AKIŞ YÜZDESİ	MEVCUT ALTYAPIYA GÖRE DÜŞÜŞ ORANI
1	Mevcut Altyapı (Bileşen Yok)	-----	-----	%88,70	-----
2	Yeşil Çatı	Çatı Alanlarının %20	%9,72	%86,80	%2,15
3	Yağmur Varili	Çatı Alanlarının %20	%9,72	%80,60	%8,10
4	Geçirimli Kaplama	Çatı alanları hariç diğer geçirimsiz alanların %20	%6,73	%82,85	%6,60
5	Yağmur Bahçesi	Çatı alanları hariç diğer geçirimsiz alanların %20	%6,73	%82,85	%6,60
6	Tüm Sistemlerin Birlikte Kullanılması	Toplam Çatı Alanlarının %40'ı ve toplam geçirimsiz alanların %40'ı	%32,90	%69	%22,20

Yeşil altyapı / DEG bileşenleri geleneksel altyapı uygulamalarıyla entegre bir şekilde planlandığında mevcut altyapı üzerindeki baskıyı azaltarak yağmur suyunun meydana getirdiği olumsuzlukları azaltmaktadır. Tüm sistemlerin mevcut altyapıyla entegreli bir biçimde planlanmasıyla toplam yüzeysel akışların %22,20 oranında azaldığı yapılan ölçümlerle tespit edilmiştir. Bu sistemler içerisinde yağmur varilleriyle birlikte en fazla alana sahip olmasına karşın yeşil çatı sistemlerinin en az etkili olduğu diğer yandan ortalama yeşil çatı alanından %30 daha az olmasına rağmen geçirimli kaplama ve yağmur bahçeleri gibi sistemlerin daha etkili olduğu belirlenmiştir.

Havzalarda meydana gelen en fazla yüzeysel akış miktarları dikkate alındığında yüzeysel akışların maksimum olduğu seviye yağış yoğunluğunun 6,40mm olduğu zaman diliminde gerçekleşmiştir. Bu oran yeşil çatı sistemlerinde 3,35 m³/s, geçirimli kaplama ve

yağmur bahçelerinde 3,12 m³/s iken yağmur varillerinde 3,05 m³/s olarak ölçülmüştür. Tüm sistemler entegreli bir şekilde planlandığında ise bu oran 2,69m³/s olarak ölçülmüştür.

Yeşil altyapı / DEG bileşenleri şehirleşmenin meydana getirdiği betonlaşmanın kısmen önüne geçerek kentlerde yeşil alan miktarlarının artmasına ve yağmur suyunu emmeyen geçirimsiz yüzeylerin azalmasına yardımcı olmaktadır. Yapılan çalışmada tüm alanın %9,72'si yeşil çatı sistemleri ve tüm alanın %6,73'ü yağmur bahçesi olarak planlandığında toplam alanda yer alan geçirimsiz alanların %16,45'i yeşil alana dönüştürülerek yeşil alan miktarlarının artması sağlanmıştır.

Yeşil altyapı / DEG bileşenleri yüksek su tutma potansiyelleri sebebiyle yağmur sularının depolanıp daha sonraki ihtiyaçlarda tekrar kullanılmasına ve küresel iklim değişikliğinin meydana getirdiği sorunlarda su kaynaklarının daha verimli bir şekilde kullanılmasına olanak tanımaktadır. Yapılan çalışmada 32 aylık yağış verileri kullanılarak yapılan ölçümlerde toplam çatı alanlarının %20'sinden akan yağmur sularının 4m³ hacme sahip toplam 1872 adet yağmur varillerine depolanmasıyla 3 kişilik 10 bin ailenin 101 günlük tuvalet temizlik ihtiyaçlarını karşıladığı belirlenmiştir. Ayrıca diğer sistemlerin ilk depolama miktarları karşılaştırıldığında geçirimli kaplama sistemlerinin ilk depolama hacmi 1,00mm, yeşil çatıların 1,94mm, yağmur bahçelerinin 3,35mm olarak tespit edilmiştir. Tüm bileşenlerin entegreli bir şekilde kullanılmasıyla bu oran 6,30mm olarak ölçülmüştür. İlk depolama miktarlarında en etkili sistemin yağmur bahçeleri olduğu belirlenmiştir.

Tartışma

Şu ana kadar yapılan çalışmalar genelde mahalle veya site ölçeğinde yapılmış olup kent ölçeğinde yapılan çalışmalara fazla yer verilmemiştir. Yapılan bu çalışma ise kent ölçeğinde ele alınıp ona göre değerlendirme yapılmıştır. Bu şekilde yapılan çalışmanın olumlu ve olumsuz yönlerinin olduğu anlaşılmıştır. Olumlu olarak bu sistemler bir şehir ölçeğinde bütüncül olarak ele alınıp geleneksel altyapı sistemleriyle kıyaslanması daha gerçekçi sonuçlar ortaya çıkarmaktadır. Olumsuz olarak ise arazi kontrolünde güçlükler meydana gelmekte ve alan içerisinde yer alan her bir sitenin kontrollü bir şekilde incelenmesi ve çatı bağlantılarının belediye kanalizasyon şebekesine bağlı olup olmadığı tespit edilememektedir. Bu sebeple çalışmada tüm sitelerin bağlantıları belediye şebekesine bağlantılı olarak değerlendirilmiştir.

Yapılan çalışmada değerlendirmesi yapılan 4 farklı Düşük Etkili Gelişim bileşeni (yeşil çatı, yağmur bahçesi, geçirimli kaplamalar, yağmur varilleri) arasında en etkili bileşenin oransal olarak yağmur varili olarak görünmesine karşın eşit orandaki diğer bileşenlere kıyasla, geçirimli kaplama ve yağmur bahçesinin daha fazla etki gösterdiği, etkinin en az olduğu bileşen ise yeşil çatı sistemi olduğu tespit edilmiştir. Yeşil çatı bileşeninin daha az etkili olmasındaki sebep alandaki binaların eski yapılardan oluşması ve bu sayede oluşturulacak yeşil çatı sistemlerindeki toprak (yetiştirme) katmanının ince olarak seçilmesi ve diğer sistemler gibi farklı alanlardan akan yağmur suyunu değil direkt olarak üzerine düşen yağışı alması olarak sıralanabilmektedir. Yapılan akademik çalışmalarda da benzer sonuçlar ortaya çıkmaktadır. Anonim, (2007) ve Gülbaz vd, (2018)' in yapmış olduğu çalışmalarda yağmur suyu yönetiminde en etkili bileşenin geçirimli kaplamalar olduğu sonucuna varılmıştır. Ancak bu bileşenler arasındaki etki mevsimsel iklim özellikleri farklı olan şehirlerde farklılıklar gösterebilir. Örneğin; soğuk iklim bölgelerinde geçirimli kaplamaların dayanımları ve gözeneklerinde meydana gelen donmalar vs. dikkate alındığında bileşenler arasındaki etki sıralamasında yer değişimleri ortaya çıkabilir. Bu sebeple soğuk iklim bölgelerinde geçirimli kaplamaların dayanımları hususu daha fazla araştırılması gereken bir konudur.

Yapılan çalışmada Yeşil altyapı / Düşük Etkili Gelişim bileşenlerinin geçirimsiz alanların fazla olduğu kentlerde yağmur suyunun meydana getirdiği olumsuzlukları ve yüzey akışlarını

azaltmada etkili bir şekilde kullanılabilecek sistemler olduğu ve geleneksel altyapı sistemlerine alternatif olarak kullanılabileceği tespit edilmiştir. Çalışmada bir şehir merkezinde geleneksel altyapı sistemlerine alternatif olarak kullanılan entegreli Düşük Etkili Gelişim Bileşenlerinin yüzeysel akışları %22,20 oranında azalttığı belirlenmiştir. Bu konu üzerine yapılan çalışmalarda da benzer sonuçlar ortaya çıkmıştır. Bedan ve Clausen, (2019) Düşük Etkili Bileşenlerinin kullanılmasıyla yağmur suyu yüzey akışlarının %42 azaldığını, Gülbaz vd, (2018) ise bir kampüs alanında belirli konumlarında uygulanan 4 farklı Düşük Etkili Gelişim bileşeninin (yeşil çatı, sızdırma hendeği, geçirgen kaldırım, yağmur bahçesi) toplam yüzeysel akışları %12 azalttığını tespit etmiştir. Oranların farklı olmasındaki sebep, geçirimsiz alan miktarlarının, kullanılan bileşenlerin boyutlarının ve teknik özelliklerinin (alt yapı drenaj sistemleri, eğimleri, toprak katmanının derinliği vb.) farklı olması ve bunun yanında tasarlanan bölgenin iklim ve yağış koşullarının, kurak gün sayılarının farklı olmasından kaynaklanmaktadır.

Düşük Etkili Gelişim bileşenleri yağmur suyu hacimlerini azalttığından ve yağmur suyundan kaynaklı problemlere noktasal olarak çözüm ürettiğinden dolayı geleneksel kanalizasyon sistemleri üzerindeki baskıyı azaltıp su baskınlarını ve olası sel felaketlerini engellemekte ve geleneksel sistemlere göre daha sürdürülebilir bir çözüm sunmaktadır. Yapılan çalışmalarda bu sistemlerin hacimsel olarak etkinliği değerlendirilmiş olup önemli miktarlarda yağmur suyu hacmini azaltarak geleneksel altyapı üzerindeki baskıyı düşürmüş ve bu sayede olası su baskını ve sel gibi sorunların önlenmesine yardımcı olmuştur. Benzer çalışmalarda Claus and Rousseau, (2012) Düşük Etkili Gelişim bileşenlerinin yağmur sularını tutarak geleneksel kanalizasyon sistemleri üzerindeki baskıyı azalttığını ve bu sayede sel riskini önlediği, Qin et al, (2013) ise bu bileşenlerin geleneksel sistemlere göre daha sürdürülebilir bir çözüm olduğunu ve kentlerdeki sel olaylarını azaltmada daha etkili bir yöntem olduğunu tespit etmişlerdir.

Düşük Etkili Gelişim bileşenlerinden yağmur varillerinin yerleşim alanlarına entegre edilmesiyle alternatif su temini sağlanacağı ve yüzey akışlarının azaltılacağı tespit edilmiştir. Yapılan çalışmada toplam çatı alanlarının %20'sinden toplanan suların yağmur varili gibi sistemlerde depolanmasıyla toplam yüzeysel akışlarda %8,10 oranında bir düşüş meydana geldiği ve 3 kişilik 10 bin ailenin 101 günlük tuvalet temizlik ihtiyacının karşılandığı tespit edilmiştir. Benzer çalışmalarda; Ahiablame et al, (2013), yüksek yoğunluklu yerleşim alanlarındaki toplam çatı alanlarının %25' inden toplanan suların yağmur varillerinde depolanmasıyla yüzeysel akışlarda %6 azalma olduğunu, Hatt et al, (2006), büyük hacimli yağmur suyu toplama sistemlerinin yıllık yüzey akışlarını %20-100 oranında azalttığını, Valencia and Zambrona, (2009), yağmur varillerinin yüzey akışlarını %3-14 oranında azalttığını tespit etmişlerdir. Ayrıca su temini açısından yapılan çalışmalarda, Kılıç ve Abuş, (2018), konut alanlarının çatılarından toplanan suların depolanmasıyla %14 su tasarrufu sağlandığını ve Eren vd, (2016), bir kampüs alanındaki çatılardan toplanan suların %10,90 su tasarrufu sağladığını tespit ederek benzer sonuçlara ulaşmışlardır.

Düşük Etkili Gelişim bileşenleri geçirimsiz alanların geçirimli alanlara dönüştürülmesine imkân sağlayarak kaybolan yeşil alanı yeniden tesis edilmesini sağlamaktadır. Yapılan çalışmada bir şehir merkezindeki toplam geçirimsiz alanların %42,10' unu geleneksel çatı alanlarının oluşturduğu tespit edilmiştir. Stovin et al, (2012)' in yapmış olduğu geleneksel çatıların gelişmiş şehirlerin çoğunda kentteki toplam geçirimsiz alanların %40-50' sini oluşturduğunu dair çalışmada benzer bir sonuca ulaşılmıştır. Bu çalışmada toplam çatı alanlarının %20'si yeşil çatı sistemlerine ve toplam geçirimsiz alanların %20'si yağmur bahçesine dönüştürüldüğünden %16,45 oranında yeşil alanların artması sağlanmıştır. Benzer çalışmada, VanWoert et al (2003), yeşil çatılarla bir bitki örtüsünün oluşturulması kaybolan yeşil alanın yeniden tesis edilmesini sağlayacağını belirterek, Düşük Etkili Gelişim bileşenlerinin yeşil alan miktarlarını artırdığına vurgu yapmıştır.

KAYNAKÇA

- Abi Aad, M. P., Suidan, M. T., & Shuster, W. D. (2010). Modeling techniques of best management practices: Rain barrels and rain gardens using EPA SWMM-5. *Journal of hydrologic engineering*, 15(6), 434-443.
- Abida, H., & Sabourin, J. (2006). Grass swale-perforated pipe systems for stormwater management. *Journal of irrigation and drainage Engineering*, 132(1), 55-63.
- Ackerman, D., & Stein, E. D. (2008). Evaluating the effectiveness of best management practices using dynamic modeling. *Journal of Environmental Engineering*, 134(8), 628-639.
- Ahern, J. (2007). *Green infrastructure for cities: the spatial dimension*. In. Paper presented at the Cities of the future: towards integrated sustainable water and landscape management. IWA Publishing.
- Ahiablame, L. M., Engel, B. A., & Chaubey, I. (2013). Effectiveness of low impact development practices in two urbanized watersheds: Retrofitting with rain barrel/cistern and porous pavement. *Journal of Environmental Management*, 119, 151-161.
- Ahmad, K. A., Abdullah, M. E., Hassan, N. A., Daura, H. A., & Ambak, K. (2017). A review of using porous asphalt pavement as an alternative to conventional pavement in stormwater treatment. *World Journal of Engineering*.
- Alam, T., Mahmoud, A., Jones, K. D., Bezares-Cruz, J. C., & Guerrero, J. (2019). WinSLAMM simulation of hydrologic performance of permeable pavements—A case study in the semi-arid Lower Rio Grande Valley of South Texas, United States. *Water*, 11(9), 1865.
- AmericanRivers. (2012). Banking on green: A Look at How Green Infrastructure Can Save Municipalities Money and Provide Economic Benefits Community-wide. Retrieved from <https://www.americanrivers.org/wp-content/uploads/2017/03/banking-on-green-report.pdf>. (08.06.2021)
- Ando, A. W., & Freitas, L. P. (2011). Consumer demand for green stormwater management technology in an urban setting: The case of Chicago rain barrels. *Water Resources Research*, 47(12).
- Anonim. (2007). USE OF PERVIOUS CONCRETE ELIMINATES OVER \$260,000 IN CONSTRUCTION COSTS. *Previous Congrete*. Retrieved from <https://www.concretenetwork.com/pervious/design-ideas/pervious-concrete-washington.html> (10.04.2021)
- Anonim. (2009). *IOWA Storm Water Management Manual*. IOWA/USA: Department of Natural Resources Retrieved from http://www.iowadnr.gov/Portals/idnr/uploads/water/stormwater/manual/iswmm_chapter09.pdf?ver=2016-04-13-113918-843×tamp=1505433710000. (02.05.2021)
- Anonim. (2012). Swales. *SuDS Components*. Retrieved from <https://www.susdrain.org/delivering-suds/using-suds/suds-components/swales-and-conveyance-channels/swales.html>. (15.04.2021)
- Anonim. (2013a). Available stormwater models and selecting a model. *Defining Model Objectives and Selecting a Stormwater Model*. Retrieved from https://stormwater.pca.state.mn.us/index.php/Available_stormwater_models_and_selecting_a_model. (10.05.2021)

- Anonim. (2013b). What is a Green Roof? *Green Roofs*. Retrieved from <https://www.nps.gov/tps/sustainability/new-technology/green-roofs/define.htm> (01.04.2021)
- Anonim. (2013c). WHAT IS A RAIN GARDEN? *ALL ABOUT RAIN GARDENS*. Retrieved from <https://www.groundwater.org/action/home/raingardens.html>. (05.04.2021)
- Anonim. (2014). Curbside Rain Garden. Retrieved from <http://www.saveitlancaster.com/wp-content/uploads/2014/12/bioswale-enlargement.jpg>. (10.06.2021)
- Anonim. (2017). The Sustainable-Enough Garden. Retrieved from <http://thesustainable-enoughgarden.blogspot.com/2017/09/>. (10.01.2021)
- Anonim. (2018a). Geçirgen Beton Uygulama Klavuzu. Retrieved from http://www.thbb.org/media/281170/gecirimli_beton_uygulama_k%C4%B1lavuzu_147.pdf (10.04.2021)
- Anonim. (2018b). Yağmur Bahçesi Uygulama Klavuzu. Retrieved from https://webdosya.csb.gov.tr/db/mpgm/haberler/yagmur-bahces-_230718-20180724082855.pdf. (16.03.2021)
- Anonim. (2018c). Yeşil Çatılar 4: Nanyang Teknoloji Üniversitesi. Retrieved from <https://www.ekoyapidergisi.org/4432-yesil-catilar-4-nanyang-teknoloji-universitesi.html>. (10.06.2021)
- Anonim. (2019). MUSIC (Model for Urban Stormwater Improvement Conceptualisation) is Australia's leading tool for water sensitive urban design. *A wide range of stormwater treatment options*. Retrieved from <https://ewater.org.au/products/music/>. (27.05.2021)
- Anonim. (2021a). Allen Street Rain Gardens. Retrieved from <https://content.civicplus.com/api/assets/fec85e67-1576-4f0d-a35d-af4a0f0401d2?version=0&q=2e1ed6ac-1625-45e5-5b8f-db736afc96f4>. (13.05.2021)
- Anonim. (2021b). Big Greenscaping for a Big City. Retrieved from <https://www.pinterest.fr/pin/553028029224792640/>. (10.01.2021)
- Anonim. (2021c). Seven Reasons Why You Should Have a Green Roof. Retrieved from <https://www.arch2o.com/7-reasons-green-roof/>. (11.01.2021)
- Anonim. (2021d). 20 Dakikalık Sağanak Yağış Malatya'yı Felç Etti. Retrieved from https://www.ntv.com.tr/galeri/turkiye/20-dakikalik-saganak-yagis-malatyayi-felc-etti,mfIUZ8bwzEGRS4JOZT_LRg/YERTUHLQOE-2QL5-ZoL2Pg. (01.07.2022)
- APAO. (2013). Porous asphalt pavement. *Porous asphalt pavement structure*. Retrieved from http://www.apao.org/porous_asphalt.html. (29.04.2021)
- Ardiclioglu, M. (2018). *Kanalizasyon sistemleri ders notu, Urban Sewerage systems Lecture Notes*. İnşaat Mühendisliği Bölümü, Erciyes Üniversitesi, Kayseri: Yayınlanmamış ders notu.
- Armson, D., Stringer, P., & Ennos, A. R. (2013). The effect of street trees and amenity grass on urban surface water runoff in Manchester, UK. *Urban Forestry & Urban Greening*, 12(3), 282-286. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ufug.2013.04.001>
- Arup. (2015). Cities Alive. Retrieved from <https://www.arup.com/perspectives/cities-alive>. (03.04.2021)
- Aslan, B. G., & Yazıcı, K. (2016). Yeşil Altyapı Sistemlerinde Mevcut Uygulamalar. *Ziraat Mühendisliği*(363), 31-37.

- Atchison, D., & Severson, L. (2004). RECARGA User's Manual. *Madison: University of Wisconsin*.
- Autixier, L., Mailhot, A., Bolduc, S., Madoux-Humery, A.-S., Galarneau, M., Prévost, M., & Dorner, S. (2014). Evaluating rain gardens as a method to reduce the impact of sewer overflows in sources of drinking water. *Science of The Total Environment*, 499, 238-247. doi:<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.08.030>
- Baek, S.-S., Ligaray, M., Pyo, J., Park, J.-P., Kang, J.-H., Pachepsky, Y., . . . Cho, K. H. (2020). A novel water quality module of the SWMM model for assessing low impact development (LID) in urban watersheds. *Journal of Hydrology*, 586, 124886. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.124886>
- Bai, Y., Li, Y., Zhang, R., Zhao, N., & Zeng, X. (2019). Comprehensive Performance Evaluation System Based on Environmental and Economic Benefits for Optimal Allocation of LID Facilities. *Water*, 11, 341. doi:10.3390/w11020341
- Barrett, M. E. (2008). Comparison of BMP performance using the international BMP database. *Journal of irrigation and drainage Engineering*, 134(5), 556-561.
- Bartens, J., Day, S. D., Harris, J. R., Dove, J. E., & Wynn, T. M. (2008). Can urban tree roots improve infiltration through compacted subsoils for stormwater management? *Journal of environmental quality*, 37(6), 2048-2057.
- Beach, D. (2003). *Coastal sprawl: The effects of urban design on aquatic ecosystems*. Paper presented at the of the United States, Pew Oceans Commission 2002.
- Bedan, E. S., & Clausen, J. C. (2009). Stormwater runoff quality and quantity from traditional and low impact development watersheds 1. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 45(4), 998-1008.
- Benedict, M. A., & McMahon, E. T. (2002). Green infrastructure: smart conservation for the 21st century. *Renewable resources journal*, 20(3), 12-17.
- Berland, A., Shiflett, S. A., Shuster, W. D., Garmestani, A. S., Goddard, H. C., Herrmann, D. L., & Hopton, M. E. (2017). The role of trees in urban stormwater management. *Landscape and Urban Planning*, 162, 167-177. doi:<https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2017.02.017>
- Bettencourt, L., & West, G. (2010). A unified theory of urban living. *Nature*, 467(7318), 912-913.
- Bisht, D. S., Chatterjee, C., Kalakoti, S., Upadhyay, P., Sahoo, M., & Panda, A. (2016). Modeling urban floods and drainage using SWMM and MIKE URBAN: a case study. *Natural hazards*, 84(2), 749-776.
- Boancă, P., Dumitraș, A., Luca, L., Bors-Opriș, S., & Laczi, E. (2018). Analysing Bioretention Hydraulics and Runoff Retention through Numerical Modelling Using RECARGA: a Case Study in a Romanian Urban Area. *Polish Journal of Environmental Studies*, 27(5).
- Boverket, S. (1992). Storstadsuppdraget: En forstudie om storstadernas miljö (A Preliminary Study of the Environment in Big Cities)(Karlskrona, The National Board of Housing, Building and Planning).
- Brenneisen, S. (2006). Space for urban wildlife: designing green roofs as habitats in Switzerland. *Urban habitats*, 4.
- Brudler, S., Arnbjerg-Nielsen, K., Hauschild, M. Z., Ammitsøe, C., Hénonin, J., & Rygaard, M. (2019). Life cycle assessment of point source emissions and infrastructure impacts

- of four types of urban stormwater systems. *Water Research*, 156, 383-394. doi:<https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.03.044>
- Carter, T., & Keeler, A. (2008). Life-cycle cost–benefit analysis of extensive vegetated roof systems. *Journal of Environmental Management*, 87(3), 350-363. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2007.01.024>
- CASQA. (2021). WinSLAMM Complex Models. Retrieved from <https://www.casqa.org/model/winslamm>. (23.05.2021)
- Chui, T. F. M., Liu, X., & Zhan, W. (2016). Assessing cost-effectiveness of specific LID practice designs in response to large storm events. *Journal of Hydrology*, 533, 353-364. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.12.011>
- Cipolla, S. S., Maglionico, M., & Stojkov, I. (2016). A long-term hydrological modelling of an extensive green roof by means of SWMM. *Ecological Engineering*, 95, 876-887.
- Clark, C., Adriaens, P., & Talbot, F. B. (2008). Green roof valuation: a probabilistic economic analysis of environmental benefits. *Environmental science & technology*, 42(6), 2155-2161.
- Claus, K., & Rousseau, S. (2012). Public versus private incentives to invest in green roofs: A cost benefit analysis for Flanders. *Urban Forestry & Urban Greening*, 11(4), 417-425. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ufug.2012.07.003>
- Claytor, R. A., & Schueler, T. R. (1996). Design of Stormwater Filtering Systems. Center for Watershed Protection, Ellicott City, MD. . In *Open Vegetated Channels* (pp. 1-220). U.S. Environmental Protection Agency: The Center for Watershed Protection.
- CNT. (2006). Green values stormwater management calculator. *About the Calculator*. Retrieved from <https://greenvalues.cnt.org/about.php>. (24.05.2021)
- CNT. (2010). *The value of green infrastructure: A guide to recognizing its economic, environmental and social benefits*, W. North Avenue, Chicago.
- Coffman, L. S. (2002). Low-impact development: an alternative stormwater management technology. *Handbook of water sensitive planning and design*, 97-123.
- CSB. (2018). Yağmur Hasadında Küçük Ama Etkili Bir Adım “Yağmur Bahçeleri”. Retrieved from <https://mpgm.csb.gov.tr/yagmur-hasadinda-kucuk-ama-etkin-bir-adim-yagmur-bahceleri-haber-228890>. (08.04.2021)
- CTCN. (2016). Bioswales. *CONNECTING COUNTRIES TO CLIMATE TECHNOLOGY SOLUTIONS*. Retrieved from <https://www.ctc-n.org/technologies/bioswales>. (23.04.2021)
- Czemiel Berndtsson, J. (2010). Green roof performance towards management of runoff water quantity and quality: A review. *Ecological Engineering*, 36(4), 351-360. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2009.12.014>
- Çelebi, H. (1973). *Yüzey akış ve yüzey akış miktarını hesaplama metotları*. Ankara: Atatürk Üniversitesi Yayınları No:193.
- Damodaram, C., Giacomoni, M. H., Prakash Khedun, C., Holmes, H., Ryan, A., Saour, W., & Zechman, E. M. (2010). Simulation of combined best management practices and low impact development for sustainable stormwater management 1. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 46(5), 907-918.
- Davies, J., Pratt, C., & Scott, M. (2002). Laboratory study of permeable pavement systems to support hydraulic modeling. In *Global Solutions for Urban Drainage* (pp. 1-9).

- 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., Stagge, J. H., Jamil, E., & Kim, H. (2012). Hydraulic performance of grass swales for managing highway runoff. *Water Research*, 46(20), 6775-6786. doi:<https://doi.org/10.1016/j.watres.2011.10.017>
- DeBusk, K., & Wynn, T. (2011). Storm-water bioretention for runoff quality and quantity mitigation. *Journal of Environmental Engineering*, 137(9), 800-808.
- Deletic, A. (2001). Modelling of water and sediment transport over grassed areas. *Journal of Hydrology*, 248(1), 168-182. doi:[https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(01\)00403-6](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(01)00403-6)
- Demir, D. (2012). *Konvansiyonel Yağmursuyu Yönetim Sistemleri ile Sürdürülebilir Yağmursuyu Yönetim Sistemlerinin Karşılaştırılması: İTÜ Ayazağa Yerleşkesi Örneği*. (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi,
- DHI. (2007). MIKE URBAN. *Integrated urban water modelling*. Retrieved from <https://www.mikepoweredbydhi.com/products/mike-urban>. (22.05.2021)
- 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.
- DiGiovanni, K., Gaffin, S., & Montalto, F. (2010). Green roof hydrology: Results from a small-scale lysimeter setup (Bronx, NY). In *Low impact development 2010: Redefining water in the city* (pp. 1328-1341).
- Dinic Brankovic, M., Mitković, P., Bogdanovic Protic, I., Igić, M., & Đekić, J. (2019). *Bioswales as elements of green infrastructure – foreign practice and possibilities of use in the district of the City of Nis, Serbia*.
- Dizdar, M. Y. (2003). *Türkiye'nin Toprak Kaynakları*. Ankara: TMMOB Ziraat Mühendisleri Odası.
- Dreelin, E. A., Fowler, L., & Ronald Carroll, C. (2006). A test of porous pavement effectiveness on clay soils during natural storm events. *Water Research*, 40(4), 799-805. doi:<https://doi.org/10.1016/j.watres.2005.12.002>
- DSİ. (2020). Su Kaynakları. *Toprak Su Kaynakları*. Retrieved from <https://dsi.gov.tr/Sayfa/Detay/754>. (18.04.2021)
- DSİ. (2022). Malatya'nın Sulama Projeleri Dikkat Çekiyor. Retrieved from <https://www.dsi.gov.tr/Haber/Detay/5674>. (01.07.2022)
- Dunnett, N. (2018). The rain gardens and planted outdoor study tables are looking great on the @sheffielduni campus today! Retrieved from <https://twitter.com/NigelDunnett/status/997435322546999297>. (10.01.2021)
- Dunnett, N., & Kingsbury, N. (2008). *Planting Green Roofs and Living Walls*: Timber Press.
- Eckart, K., McPhee, Z., & Bolisetti, T. (2017). Performance and implementation of low impact development – A review. *Science of The Total Environment*, 607-608, 413-432. doi:<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.06.254>
- EEA. (2011). Green infrastructure and territorial cohesion The concept of green infrastructure and its integration into policies using monitoring systems. 142. doi:10.2800/88266

- Ekşi, M. & Uzun, A. (2016). Yeşil çatı sistemlerinin su ve enerji dengesi açısından değerlendirilmesi . *Journal of the Faculty of Forestry Istanbul University* , 66 (1) , 119-138 . DOI: 10.17099/jffiu.67110
- Elliott, A. H., & Trowsdale, S. A. (2007). A review of models for low impact urban stormwater drainage. *Environmental Modelling & Software*, 22(3), 394-405. doi:<https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2005.12.005>
- EPA. (2012). Managing Urban Runoff. Retrieved from <https://archive.epa.gov/water/archive/web/html/point7.html>. (09.03.2021)
- EPA. (2014a). Storm Water Management Model (SWMM). Retrieved from <https://www.epa.gov/water-research/storm-water-management-model-swmm>. (11.03.2021)
- EPA. (2014b). System for Urban Stormwater Treatment and Analysis IntegratioN (SUSTAIN). *Tool for Selecting Best Management Practices to Protect Water Quality*. Retrieved from <https://www.epa.gov/water-research/system-urban-stormwater-treatment-and-analysis-integration-sustain>. (17.05.2021)
- EPA. (2015). What is Green Infrastructure? Retrieved from <https://www.epa.gov/green-infrastructure/what-green-infrastructure>. (08.03.2021)
- Eren, B., Aygün, A., Likos, S., & Damar, A. I. (2016). *Yağmur Suyu Hasadı: Sakarya Üniversitesi Esentepe Kampüs Örneği*. Paper presented at the 4th International Symposium on Innovative Technologies in Engineering and Science (ISITES2016) 3-5 Nov 2016 Alanya/Antalya-Turkey.
- Ertin, D., Yılmaz, G., & Zülfiyar, C. (2012). Sürdürülebilir Peyzaj Tasarımında Yeşil Altyapı Uygulamalarından Yağmur Bahçeleri: Edirne Örneği. *Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi, GreenAge Sempozyumu, İstanbul*.
- Eumorfopoulou, E., & Aravantinos, D. (1998). The contribution of a planted roof to the thermal protection of buildings in Greece. *Energy and Buildings*, 27(1), 29-36. doi:[https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(97\)00023-6](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(97)00023-6)
- EuropeanCommission. (2013). Swales. *Natural Water Retention Measures*. Retrieved from <http://nwrn.eu/measure/swales>. (15.04.2021)
- Fernández-Barrera, A. H., Castro-Fresno, D., Rodríguez-Hernández, J., & Calzada-Pérez, M. A. (2008). Infiltration capacity assessment of urban pavements using the LCS permeameter and the CP infiltrometer. *Journal of irrigation and drainage Engineering*, 134(5), 659-665.
- Fletcher, T. D., Andrieu, H., & Hamel, P. (2013). Understanding, management and modelling of urban hydrology and its consequences for receiving waters: A state of the art. *Advances in water resources*, 51, 261-279.
- Gao, J., Pan, J., Hu, N., & Xie, C. (2018). Hydrologic performance of bioretention in an expressway service area. *Water science and technology*, 77(7), 1829-1837.
- Getter, K. L., Rowe, D. B., & Andresen, J. A. (2007). Quantifying the effect of slope on extensive green roof stormwater retention. *Ecological Engineering*, 31(4), 225-231.
- Gill, S. E., Handley, J. F., Ennos, A. R., & Pauleit, S. (2007). Adapting cities for climate change: the role of the green infrastructure. *Built environment*, 33(1), 115-133.
- Goel, M. K. (2011). Runoff Coefficient. In V. P. Singh, P. Singh, & U. K. Haritashya (Eds.), *Encyclopedia of Snow, Ice and Glaciers* (pp. 952-953). Dordrecht: Springer Netherlands.

- Goonetilleke, A., Thomas, E., Ginn, S., & Gilbert, D. (2005). Understanding the role of land use in urban stormwater quality management. *Journal of Environmental Management*, 74(1), 31-42. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2004.08.006>
- Gould, J., & Nissen-Petersen, E. (1999). *Rainwater catchment systems for domestic supply: Intermediate Technology*.
- Graham, P., Maclean, L., Medina, D., Patwardhan, A., & Vasarhelyi, G. (2004). The role of water balance modelling in the transition to low impact development. *Water Quality Research Journal*, 39(4), 331-342.
- Grant, G., Engleback, L., Nicholson, B., Gedge, D., Frith, M., & Harvey, P. (2003). Green roofs: their existing status and potential for conserving biodiversity in urban areas. *English Nature Research Reports*, 498, 9-59.
- GÜLBAZ, S., KAYA, Y. E., & ALHAN, C. M. K. (2018). Düşük Etkili Kentleşme Uygulamalarının Yüzeysel Akışa Etkisi: İstanbul Üniversitesi Avcılar Kampüsü Örneği. *İklim Değişikliği ve Çevre*, 3(1), 45-50.
- Hammes, G., Thives, L. P., & Ghisi, E. (2018). Application of stormwater collected from porous asphalt pavements for non-potable uses in buildings. *Journal of Environmental Management*, 222, 338-347. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.05.094>
- Hathaway, A. M., Hunt, W. F., & Jennings, G. D. (2008). A field study of green roof hydrologic and water quality performance. *Transactions of the ASABE*, 51(1), 37-44.
- Hatt, B., Deletic, A., & Fletcher, T. (2006). A review of integrated stormwater treatment and re-use in Australia. *Journal of Environmental Management*, 79(1), 102-113.
- 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), 310-321. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2008.12.001>
- Hein, D. K., Strecker, E., Poresky, A., Roseen, R., & Venner, M. (2013). Permeable shoulders with stone reservoirs. *NCHRP Project 25-25/Task 82. Applied Research Associates Inc., Champaign, Ill. Available online at*. Retrieved from [http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/nchrp/docs/NCHRP25-25\(82\)_FR.pdf](http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/nchrp/docs/NCHRP25-25(82)_FR.pdf). (30.04.2021)
- Hernes, R. R., Gragne, A. S., Abdalla, E. M., Braskerud, B. C., Alfredsen, K., & Muthanna, T. M. (2020). Assessing the effects of four SUDS scenarios on combined sewer overflows in Oslo, Norway: evaluating the low-impact development module of the Mike Urban model. *Hydrology Research*, 51(6), 1437-1454.
- Hsieh, C.-h., & Davis, A. P. (2005). Evaluation and optimization of bioretention media for treatment of urban storm water runoff. *Journal of Environmental Engineering*, 131(11), 1521-1531.
- Huber, W. C., Dickinson, R. E., Barnwell Jr, T. O., & Branch, A. (1988). Storm water management model; version 4. *Environmental Protection Agency, United States*.
- Hunt, W., Jarrett, A., Smith, J., & Sharkey, L. (2006). Evaluating bioretention hydrology and nutrient removal at three field sites in North Carolina. *Journal of irrigation and drainage Engineering*, 132(6), 600-608.
- İHA. (2022). Malatya'yı Sağanak Vurdu. Retrieved from <https://www.ihacom.tr/haber-malatya-yi-saganak-vurdu-1070534/>. (01.07.2022)

- Imteaz, M. A., Ahsan, A., Rahman, A., & Mekanik, F. (2013). Modelling stormwater treatment systems using MUSIC: Accuracy. *Resources, Conservation and Recycling*, 71, 15-21. doi:<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2012.11.007>
- İNAN, Z. (2020). SÜRDÜRÜLEBİLİR KENTLER İÇİN GRİDEN YEŞİLE OTOPARK TASARIMI. *PEYZAJ*, 2(1), 22-32.
- Jaffe, M. (2010). Environmental reviews & case studies: reflections on Green Infrastructure economics. *Environmental Practice*, 12(4), 357-365.
- Jayasooriya, V. M., & Ng, A. W. M. (2014). Tools for Modeling of Stormwater Management and Economics of Green Infrastructure Practices: a Review. *Water, Air, & Soil Pollution*, 225(8), 2055. doi:[10.1007/s11270-014-2055-1](https://doi.org/10.1007/s11270-014-2055-1)
- 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), 468. doi:[10.1007/s11270-017-3636-6](https://doi.org/10.1007/s11270-017-3636-6)
- Jiang, W., Sha, A., Xiao, J., Li, Y., & Huang, Y. (2015). Experimental study on filtration effect and mechanism of pavement runoff in permeable asphalt pavement. *Construction and Building Materials*, 100, 102-110. doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.09.055>
- Jones, M. P., & Hunt, W. F. (2010). Performance of rainwater harvesting systems in the southeastern United States. *Resources, Conservation and Recycling*, 54(10), 623-629. doi:<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2009.11.002>
- KANTAROĞLU, Ö. (2009). Yağmur Suyu Hasadı Plan Ve Hesaplama Prensipleri. *IX. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi*, 6-9.
- KILIÇ, M. Y., & Abuş, M. N. (2018). Bahçeli Bir Konut Örneğinde Yağmur Suyu Hasadı. *Uluslararası Tarım ve Yaban Hayatı Bilimleri Dergisi*, 4(2), 209-215.
- Kjølby, M. J. (2017). LID Controls in MIKE URBAN. *MIKE URBAN-LID Controls*. Retrieved from http://www.evanet.dk/wp-content/uploads/2017/05/4_Modelling-af-LAR-anl%C3%A6g.pdf. (22.05.2021)
- Kosareo, L., & Ries, R. (2007). Comparative environmental life cycle assessment of green roofs. *Building and Environment*, 42(7), 2606-2613. doi:<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.06.019>
- KTB. (2019a). Coğrafi Konum. Retrieved from <https://malatya.ktb.gov.tr/TR-58265/cografi-konumu.html>. 25.11.2021
- KTB. (2019b). İklim ve Bitki Örtüsü. Retrieved from <https://malatya.ktb.gov.tr/TR-58266/iklim-ve-bitki-ortusu.html>. (25.011.2021)
- Legret, M., & Colandini, V. (1999). Effects of a porous pavement with reservoir structure on runoff water: Water quality and fate of heavy metals. *Water science and technology*, 39(2), 111-117. doi:[https://doi.org/10.1016/S0273-1223\(99\)00014-1](https://doi.org/10.1016/S0273-1223(99)00014-1)
- Leroy, M.-c., Portet-Koltalo, F., Legras, M., Lederf, F., Moncond'huy, V., Polaert, I., & Marcotte, S. (2016). Performance of vegetated swales for improving road runoff quality in a moderate traffic urban area. *Science of The Total Environment*, 566-567, 113-121. doi:<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.05.027>
- Liesecke, H., & Borgwardt, H. (1997). Abbau von Luftschadstoffen durch extensive Dachbegrünungen. *Stadt Grün*, 33, 245-251.

- Liu, W., Chen, W., & Peng, C. (2014). Assessing the effectiveness of green infrastructures on urban flooding reduction: A community scale study. *Ecological Modelling*, 291, 6-14. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2014.07.012>
- Liu, W., Chen, W., & Peng, C. (2015). Influences of setting sizes and combination of green infrastructures on community's stormwater runoff reduction. *Ecological Modelling*, 318, 236-244. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2014.11.007>
- Lombardo, J. (2020). How It Works: Porous Asphalt Pavements. Retrieved from <https://www.forconstructionpros.com/asphalt/article/21134321/how-it-works-porous-asphalt-pavements>. (13.10.2021)
- Lu, J.-X., Yan, X., He, P., & Poon, C. S. (2019). Sustainable design of pervious concrete using waste glass and recycled concrete aggregate. *Journal of Cleaner Production*, 234, 1102-1112. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.06.260>
- Lucke, T., Mohamed, M. A. K., & Tindale, N. (2014). Pollutant removal and hydraulic reduction performance of field grassed swales during runoff simulation experiments. *Water*, 6(7), 1887-1904.
- Malcolm, M., & Lewis, M. (2008). North Shore City Bioretention Guidelines First Edition. *Bioretention gardens*. 1. Retrieved from <https://documents.in/document/new-zealand-bioretention-guidelines-rain-garden-north-shore-city-council.html>. (30.05.2021)
- Mein, R. G., & Larson, C. L. (1973). Modeling infiltration during a steady rain. *Water Resources Research*, 9(2), 384-394.
- Mittman, T., & Kloss, C. (2015). The Economic Benefits of Green Infrastructure: A Case Study of Lancaster, PA.
- Monterusso, M., Rowe, D., Rugh, C., & Russell, D. (2002). *Runoff water quantity and quality from green roof systems*. Paper presented at the XXVI International Horticultural Congress: Expanding Roles for Horticulture in Improving Human Well-Being and Life Quality 639.
- Moran, A., Hunt, B., & Jennings, G. (2003). *A North Carolina field study to evaluate greenroof runoff quantity, runoff quality, and plant growth*. Paper presented at the World Water & Environmental Resources Congress 2003.
- Morrison, C. (2019). Previous congrate the smart stormwater solution. *Previous congrate*. Retrieved from <http://perviouscrete.com/smart-stormwater/> (10.04.2021)
- Muharrem, E., & Hamza, A. (2004). Kent yönetimi, kentlileşme ve göç: sorunlar ve çözüm önerileri. *Sosyal Siyaset Konferansları Dergisi*(48).
- Nations, U. (2018). World urbanization prospects: the 2018 revision. *CD-ROM Edition*.
- Niazi, M., Nietch, C., Maghrebi, M., Jackson, N., Bennett, B. R., Tryby, M., & Massoudieh, A. (2017). Storm water management model: Performance review and gap analysis. *Journal of Sustainable Water in the Built Environment*, 3(2), 04017002.
- Nordman, E. E., Isely, E., Isely, P., & Denning, R. (2018). Benefit-cost analysis of stormwater green infrastructure practices for Grand Rapids, Michigan, USA. *Journal of Cleaner Production*, 200, 501-510. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.07.152>
- NWRM. (2013). SWALES. *Integration of Natural Water Retention Measures in River basin management*. Retrieved from <http://nwrn.eu/measure/swales>. (18.04.2021)
- Öztürk, M. (2017). Su geçiren beton ve asfaltlar. *Su geçireb beton uygulaması*. Retrieved from

- http://www.cevresehirkutuphanesi.com/assets/files/slider_pdf/248HQ7HaxmKA.pdf. (29.04.2021)
- Paithankar, D. N., & Taji, S. G. (2020). Investigating the hydrological performance of green roofs using storm water management model. *Materials Today: Proceedings*, 32, 943-950. doi:<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.05.085>
- Palmstrom, N., & Walker, W. (1990). The P8 urban catchment model for evaluating nonpoint source controls at the local level. *Enhancing States' Lake Management Programs*, US EPA.
- PCI. (2019). Pervious Congrete, Inc. *Stratford Place*. Retrieved from <http://perviouscrete.com/stratford-place/#%20url>. (10.06.2021)
- Peck, S. W., Callaghan, C., Kuhn, M. E., & Bass, B. (1999). Greenbacks from green roofs: forging a new industry in Canada.
- Pitt, R., & Voorhees, J. (2004). WinSLAMM and low impact development. *Putting the LID on Stormwater Management*, College Park, MD, 13.
- Pitt, R., & Voorhees, J. (2009). *Green infrastructure performance modeling with WinSLAMM*. Paper presented at the Proceedings of the 9th EWRI Water and Environment Congress, Kansas City, MO, USA.
- Pratt, C., Wilson, S., & Cooper, P. (2002). *Source control using constructed pervious surfaces: Hydraulic, structural and water quality performance issues*.
- Qin, H.-p., Li, Z.-x., & Fu, G. (2013). The effects of low impact development on urban flooding under different rainfall characteristics. *Journal of Environmental Management*, 129, 577-585. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.08.026>
- Raei, E., Reza Alizadeh, M., Reza Nikoo, M., & Adamowski, J. (2019). Multi-objective decision-making for green infrastructure planning (LID-BMPs) in urban storm water management under uncertainty. *Journal of Hydrology*, 579, 124091. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124091>
- Rangari, V. A., Patel, A. K., & Umamahesh, N. (2015). Review of urban stormwater models. *Environ. Model. Softw*, 16, 37.
- Revitt, D. M., Ellis, J. B., & Lundy, L. (2017). Assessing the impact of swales on receiving water quality. *Urban water journal*, 14(8), 839-845.
- Rey Valencia, D., & Zambrano Nájera, J. (2019). APPLICATION OF RAIN BARRELS FOR FLOOD CONTROL IN AN URBAN MOUNTAIN BASINS.
- Rodríguez-Sinobas, L., Zubelzu, S., Perales-Momparler, S., & Canogar, S. (2018). Techniques and criteria for sustainable urban stormwater management. The case study of Valdebebas (Madrid, Spain). *Journal of Cleaner Production*, 172, 402-416. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.10.070>
- Roseen, R. M., Ballesterio, T. P., Houle, J. J., Briggs, J. F., & Houle, K. M. (2012). Water quality and hydrologic performance of a porous asphalt pavement as a storm-water treatment strategy in a cold climate. *Journal of Environmental Engineering*, 138(1), 81-89.
- Rossman, L. (2004). Storm Water Management Model (SWMM version 5.0) user's manual. *United States Environment Protection Agency*.
- Rossman, L. A. (2010). *Storm water management model user's manual, version 5.0*: National Risk Management Research Laboratory, Office of Research and

- Rossman, L. A., Huber, W. C. (2016). Storm Water Management Model Reference Manual, Volume III Water Quality. (EPA/600/R-16/093). from U.S. Environmental Protection Agency
- Rossman, L. A., & Supply, W. (2006). *Storm water management model, quality assurance report: dynamic wave flow routing*: US Environmental Protection Agency, Office of Research and Development
- Rovira, M. D., Rovira, C., & Masferrer, M. (2020). Is-Rainwater-Harvesting-a-Solution-for-Water-Access-in-Latin-America-and-the-Caribbean-An-Economic-Analysis-for-Underserved-Households-in-El-Salvador. doi:10.18235/0002689
- Roy, A. H., Wenger, S. J., Fletcher, T. D., Walsh, C. J., Ladson, A. R., Shuster, W. D., . . . Brown, R. R. (2008). Impediments and solutions to sustainable, watershed-scale urban stormwater management: lessons from Australia and the United States. *Environmental management*, 42(2), 344-359.
- Rushton, B. T. (2001). Low-impact parking lot design reduces runoff and pollutant loads. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 127(3), 172-179.
- Rutgers. (2014). Green Infrastructure Guidance Manual For New Jersey. *THE EFFECT OF THE URBAN WATER CYCLE* Retrieved from http://water.rutgers.edu/Green_Infrastructure_Guidance_Manual/2015-03-31_Manual.compressed.pdf. (21.04.2021)
- Scharenbroch, B. C., Morgenroth, J., & Maule, B. (2016). Tree species suitability to bioswales and impact on the urban water budget. *Journal of environmental quality*, 45(1), 199-206.
- Schaus, L. K. (2007). *Porous asphalt pavement designs: Proactive design for cold climate use*. University of Waterloo,
- Scholz, M., & Uzomah, V. C. (2013). Rapid decision support tool based on novel ecosystem service variables for retrofitting of permeable pavement systems in the presence of trees. *Science of The Total Environment*, 458-460, 486-498. doi:<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.04.062>
- Simmons, M. T., Gardiner, B., Windhager, S., & Tinsley, J. (2008). Green roofs are not created equal: the hydrologic and thermal performance of six different extensive green roofs and reflective and non-reflective roofs in a sub-tropical climate. *Urban Ecosystems*, 11(4), 339-348.
- Smith, M. M. S. (2015). *Evaluation of stormwater BMP alternatives in the Malden River Watershed*. Massachusetts Institute of Technology,
- Soulis, K. X., Valiantzas, J. D., Ntoulas, N., Kargas, G., & Nektarios, P. A. (2017). Simulation of green roof runoff under different substrate depths and vegetation covers by coupling a simple conceptual and a physically based hydrological model. *Journal of Environmental Management*, 200, 434-445.
- Stovin, V., Vesuviano, G., & Kasmin, H. (2012). The hydrological performance of a green roof test bed under UK climatic conditions. *Journal of Hydrology*, 414-415, 148-161. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.10.022>
- SUTEMA. (2015). Mavi Gezegen. *Su Döngüsü*. Retrieved from <https://sutema.org/mavi-gezegen/su-dongusu.2.aspx>. (05.06.2021)
- Tan, K. M., Seow, W. K., Wang, C. L., Kew, H. J., & Parasuraman, S. B. (2019). Evaluation of performance of Active, Beautiful and Clean (ABC) on stormwater runoff

- management using MIKE URBAN: a case study in a residential estate in Singapore. *Urban water journal*, 16(2), 156-162. doi:10.1080/1573062X.2019.1634744
- Tanik, A. (2017). *Yağmur Suyu Toplama, Biriktirme ve Geri Kullanımı*. Yüksek Lisans Tezi, İTÜ İnşaat Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü,
- TDK. (1980). Kenbilim Terimleri Sözlüğü. Retrieved from <https://sozluk.gov.tr/>. (08.03.2021)
- TDK. (2019). Güncel Türkçe Sözlük. Retrieved from <https://sozluk.gov.tr/>. (08.03.2021)
- Tennis, P. D., Leming, M. L., & Akers, D. J. (2004). *Pervious concrete pavements*: CiteSeer.
- TheWorldBank. (2021). Urban population (% of total population). *United Nations Population Division. World Urbanization Prospects: 2018 Revision*. Retrieved from <https://data.worldbank.org/indicator/SP.URB.TOTL.IN.ZS>. (04.06.2021)
- Thiagarajan, M., Newman, G., & Zandt, S. V. (2018). The Projected Impact of a Neighborhood-Scaled Green-Infrastructure Retrofit. *Sustainability*, 10(10), 3665. Retrieved from <https://www.mdpi.com/2071-1050/10/10/3665>
- Thomas, T. (1998). Domestic water supply using rainwater harvesting. *Building Research & Information*, 26(2), 94-101.
- Thompson, D. B. (2006). The Rational Method. Retrieved from <http://drdbthompson.net/writings/rational.pdf>. (06.06.2021)
- Uğur, Ü., & AKYÜZ, D. E. (2017). Sürdürülebilir Kentsel Drenaj Sistemlerinde Yağmur Hendeklerinin Değerlendirilmesi. *Uluslararası Sürdürülebilir Mühendislik ve Teknoloji Dergisi*, 1(1), 15-24.
- Un, K. (2016). Cisterns and Rain Barrels. *Applications and desing principles*. Retrieved from <https://www.mapc.org/resource-library/fact-sheet-cisterns-and-rain-barrels/>. (03.05.2021)
- USEPA, S. (1999). Stormwater technology fact sheet: porous pavement. In: United States Environmental Protection Agency Washington, DC.
- USGS. (2016). WinSLAMM (Source Loading And Management Model): An urban area nonpoint source water-quality model for Wisconsin. *An urban area nonpoint source water-quality model for Wisconsin*. Retrieved from https://www.usgs.gov/centers/umid-water/science/slamm?qt-science_center_objects=0#qt-science_center_objects. (22.05.2021)
- Van Renterghem, T., & Botteldooren, D. (2009). Reducing the acoustical façade load from road traffic with green roofs. *Building and Environment*, 44(5), 1081-1087. doi:<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2008.07.013>
- VanWoert, N. D., Rowe, D. B., Andresen, J. A., Rugh, C. L., Fernandez, R. T., & Xiao, L. (2005). Green roof stormwater retention: effects of roof surface, slope, and media depth. *Journal of environmental quality*, 34(3), 1036-1044.
- Velasquez, R. A. F. (2018). *Application of WinSLAMM to evaluate the effect of green infrastructure implementation in Northern Utah*. Utah State University,
- Voyde, E., Fassman, E., & Simcock, R. (2010). Hydrology of an extensive living roof under sub-tropical climate conditions in Auckland, New Zealand. *Journal of Hydrology*, 394(3), 384-395. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.09.013>
- Voyde, E., Fassman, E., Simcock, R., & Wells, J. (2010). Quantifying evapotranspiration rates for New Zealand green roofs. *Journal of hydrologic engineering*, 15(6), 395-403.

- Wang, J., Endreny, T. A., & Nowak, D. J. (2008). Mechanistic simulation of tree effects in an urban water balance model 1. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 44(1), 75-85.
- WDNR. (2020a). Recarga Model. *Storm water technical standards, models and bmps*. Retrieved from <https://dnr.wisconsin.gov/topic/Stormwater/standards/recarga.html>. (16.05.2021)
- WDNR. (2020b). SLAMM AND P-8 MODELS. *P-8 URBAN CATCHMENT MODEL*. Retrieved from <https://dnr.wisconsin.gov/topic/Stormwater/standards/slamm.html>. (21.05.2021)
- WERF. (2013). WERF SELECT MODEL. Retrieved from <http://www.werf.org/i/c/Tools/SELECT.aspx>. (23.05.2021)
- Winston, R. J., Dorsey, J. D., & Hunt, W. F. (2016). Quantifying volume reduction and peak flow mitigation for three bioretention cells in clay soils in northeast Ohio. *Science of The Total Environment*, 553, 83-95. doi:<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.02.081>
- Woods-Ballard, B., Kellagher, R., Martin, P., Jefferies, C., Bray, R., & Shaffer, P. (2007). *The SUDS manual* (Vol. 697): Ciria London.
- Xiao, Q., & McPherson, E. (2011). Performance of engineered soil and trees in a parking lot bioswale. *Urban water journal*, 8, 241-253. doi:10.1080/1573062X.2011.596213
- Yazgı, D., & Yılmaz, K. (2016). *Yeşil Altyapı Kavramının İlgili Yasal Düzenlemeler İçerisindeki Yeri ve Uygulamaya Yönelik Öneriler*. Paper presented at the 6. Peyzaj Mimarlığı Kongresi Söylem ve Eylem, 08-11 Aralık 2016, Antalya.
- Yeh, C.-H., & Labadie, J. W. (1997). Multiobjective watershed-level planning of storm water detention systems. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 123(6), 336-343.
- Yocum, D. (2021). Design Manual: Biological Filtration Canal (Bioswale). *Bren School of Environmental Science and Management, University of California, Santa Barbara*.
- Zaqout, T., & Andradóttir, H. Ó. (2021). Hydrologic performance of grass swales in cold maritime climates: Impacts of frost, rain-on-snow and snow cover on flow and volume reduction. *Journal of Hydrology*, 597, 126159. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126159>
- Zoppou, C. (2001). Review of urban storm water models. *Environmental Modelling & Software*, 16(3), 195-231. doi:[https://doi.org/10.1016/S1364-8152\(00\)00084-0](https://doi.org/10.1016/S1364-8152(00)00084-0)

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler	
Adı Soyadı:	Turgut DİNÇER
Eğitim	
Lise:	Sümer Lisesi
Lisans:	Atatürk Üniversitesi, Mimarlık ve Tasarım Fakültesi
Yüksek lisans:	Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Peyzaj Mimarlığı Anabilim Dalı (2022)
Doktora:	
Yabancı Dil Bilgisi	
İngilizce:	B1
Üye Olunan Mesleki Kuruluşlar	
Tezden Üretilmiş Yayınlar	
1. Düşük Etkili Gelişim Bileşenlerinin Yağmur Suyu Yönetimindeki Etkinlikleri: Malatya Kent Merkezi Örneği.	