

Yeşil Altyapı Sistemleri Kapsamında Yağmur Suyu Yönetimi: Malatya Kent Örneği[&]

Turgut DİNÇER^{1*}, Sevgi YILMAZ²

¹ Peyzaj Mimarlığı Bölümü, Fen Bilimleri Enstitüsü, 25240 Erzurum/Türkiye

² Peyzaj Mimarlığı Bölümü, Mimarlık ve Tasarım Fakültesi, Atatürk Üniversitesi, 25240 Erzurum/Türkiye

*Sorumlu Yazar: peyzaj.m@gmail.com

Geliş Tarihi: 20.09.2022 Düzeltme Geliş Tarihi: 06.10.2022 Kabul Tarihi: 07.10.2022

Öz

Aşırı kentleşme ve beraberinde getirdiği altyapı sorunları yağmur suyundan kaynaklı bir takım çevresel problemlere yol açmaktadır. Büyüyen ve gelişen kentlerimizde zamanla meydana gelen yoğun yapılaşma, beton, asfalt vb. gibi geçirimsiz yüzey miktarlarının artmasına ve yeşil alan gibi geçirimli yüzeylerin azalmasına sebep olmaktadır. Bunun sonucunda ise yeryüzüne inen yağmur suları geçirimsiz yüzeyler tarafından emilemeyip yüzeysel akışa neden olmakta ve sonucunda sel, taşkın vb. gibi çevresel problemlere yol açmaktadır. Bu problemlere çözüm oluşturması sebebiyle dünya genelinde alternatif yaklaşımlara doğru bir eğilim olmaktadır. Bu yaklaşımlardan biri de yeşil altyapı/düşük etkili gelişim bileşenleridir. Bu çalışmada yağmur suyunun meydana getirdiği sorunlara yeşil altyapı/düşük etkili gelişim bileşenleri gibi alternatif yaklaşımlarla çözüm üretilmeye çalışılmıştır. Bu bağlamda yapılaşmanın yaşandığı Malatya kent merkezinde, yağmur suyunun meydana getirdiği yüzeysel akışların belirlenmesi ve düşük etkili gelişim bileşenlerinin etkinliğinin değerlendirilmesi amacıyla süreç tabanlı bir yağmur suyu yönetim modeli SWMM (Storm Water Management Model) uygulanarak çeşitli simülasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Dört farklı düşük etkili gelişim bileşeninin; yeşil çatı ⁽¹⁾, yağmur varilleri ⁽²⁾, geçirimli kaplamalar ⁽³⁾, ve yağmur bahçeleri ⁽⁴⁾, planlanan alanın uygun kısımlarına belirli oranlarda entegre edilmesiyle gerçekleştirilen 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. Bütün bileşenler birbiriyle entegreli olarak kullanıldığında ise yağmur suyunun meydana getirdiği yüzeysel akışların %22.20 oranında azaldığı bu sistemlerin kentsel alanlarda geleneksel altyapı sistemlerine alternatif olarak kullanılabileceği tespit edilmiştir.

Anahtar kelimeler: Düşük Etkili Gelişim, Yağmursuyu Yönetimi, Yeşil Altyapı, Yüzeysel Akışlar

Stormwater Management Within the Scope of Green Infrastructure Systems Malatya City Example

Abstract

This research was carried out to determine the stability of vegetable type cluster bean (Cyamopsis tetrag Excessive urbanization and the accompanying infrastructure problems cause a number of environmental problems caused by rain water. In our growing and developing cities, as a result of the intense construction that takes place over time, it causes the amount of impermeable surfaces such as concrete and asphalt to increase and the permeable surfaces such as green areas to decrease. As a result, the rain water descending to the earth cannot be absorbed by the impermeable surfaces and causes surface flow, and as a result, floods and so on. Cause environmental problems such as. There is a trend towards alternative approaches around the 1088world, as it provides solutions to these problems. One of these approaches is green infrastructure/low-impact development components. In this study, it has been tried to produce solutions to the problems caused by rain water with alternative approaches such as green infrastructure / low-impact development components. In this context, various simulation studies were carried out by applying a process-based storm water

management model (SWMM) in order to determine the surface runoff caused by rain water and to evaluate the effectiveness of low-impact development components in the city center of Malatya, where intensive construction is experienced. In the simulation studies carried out by integrating four different low-impact development components green roof₍₁₎, rain barrels₍₂₎, permeable pavements₍₃₎, and rain gardens₍₄₎, into the appropriate parts of the planned area, in total runoff; There was a decrease of 2.15% with the use of green roof systems, 8.10% with the use of rain barrels, and 6.60% with the use of equally permeable coating systems and rain gardens for both components. It has been determined that these systems can be used as an alternative to traditional infrastructure systems in urban areas and the surface flow is reduced by 22.20% when all components are used in integration with each other.

Key words: Green Infrastructure, Low Impact Dewolopment, Stormwater Management, Surface Runof

Giriş

Birleşmiş milletlerin verilerine göre; küresel çapta kentsel nüfus oranı 1950’li yıllarda %30 oranında iken aradan geçen sürede her geçen gün artarak günümüzde %55 seviyesine kadar ulaşmıştır. Uzun süreli beklentiler dikkate alındığında ise bu oran 2050 yılında %68 seviyelerine kadar ulaşacağı tahmin edilmektedir (UN, 2018). Türkiye’deki kentsel nüfus oranları dikkate alındığında ise kentleşme oranları günümüzde bile küresel çaptaki uzun süreli beklentileri aşarak %76 seviyelerine kadar yükselmiştir (The World Bank, 2021).

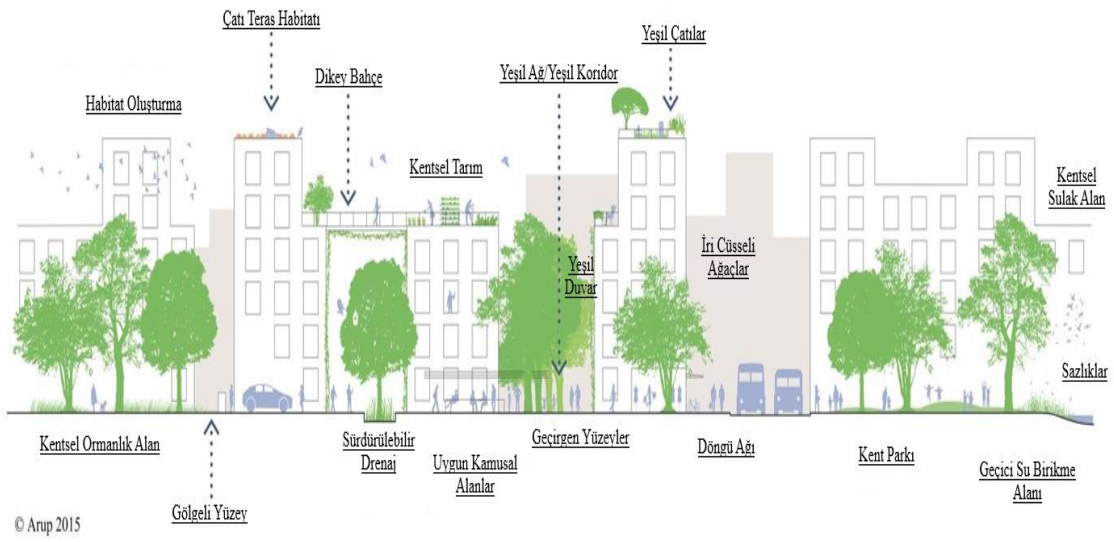
Nüfus artışına bağlı bu kentleşme, kentsel alanlarda beton, asfalt vb. gibi geçirimsiz yüzeylerin artmasına ve buna bağlı olarak yeşil alan gibi geçirimli yüzeylerin azalmasına neden olmaktadır. Yeryüzüne inen yağmur suları geçirimsiz yüzeyler tarafından emilemeyip yüzey akışlarına sebep olmakta ve bunun sonucunda sel ve su taşkını gibi çevresel problemlere yol açmaktadır. Küresel çapta kentleşmenin meydana getirdiği bu çevresel problemler, kentsel ve kırsal alanlarda doğal dengenin bozulmasına ve biyolojik çeşitliliğin zarar görmesine neden olmaktadır. Aynı zamanda bitki örtüsünün azalması sonucunda 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; Raei et al., 2019; Abi Aad et al., 2010).

Kentleşme oranlarının bu denli artması ve buna paralel olarak geleneksel altyapı sistemlerinin yetersiz kalması yağmur suyu yönetimi konusunda alternatif ve sürdürülebilir yaklaşımların geliştirilmesini zorunlu kılmaktadır. Günümüzde kentsel yüzey akışı yönetimi için birçok ülkede yeşil altyapı gibi sürdürülebilir uygulamalar hem yağmur hacimlerini azaltmak hem de su kalitesini iyileştirmek için planlanmaktadır. Yeşil altyapılar

(YA), 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). Şekil 1’de kentsel alanlardaki Düşük Etkili Gelişim (DEG) bileşenleri gösterilmektedir.

Bu konuda yapılan çalışmalar DEG bileşenlerinin yağmursuyu yönetiminde geleneksel altyapı sistemlerine alternatif olabileceğini göstermektedir. Bu alanda yapılan çalışmalar Çizelge 1’de özetlenmiştir.

Bu çalışmanın 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) / 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. Dört farklı DEG’de geçirimsiz alanların belli bir kısmına uygulanması sonucunda yüzeysel akışların ne kadar azaltıldığı yapılan simülasyon çalışmalarıyla tespit edilmiştir. Elde edilen verilerin yerel yönetim tarafından hazırlanan fiziki plan kararlarına aktarılması ve kent planlamasında altlık olarak kullanılması amaçlanmıştır. Bu araştırma ile sürdürülebilir kentsel tasarım için bir farkındalık oluşturması hedeflenmektedir.



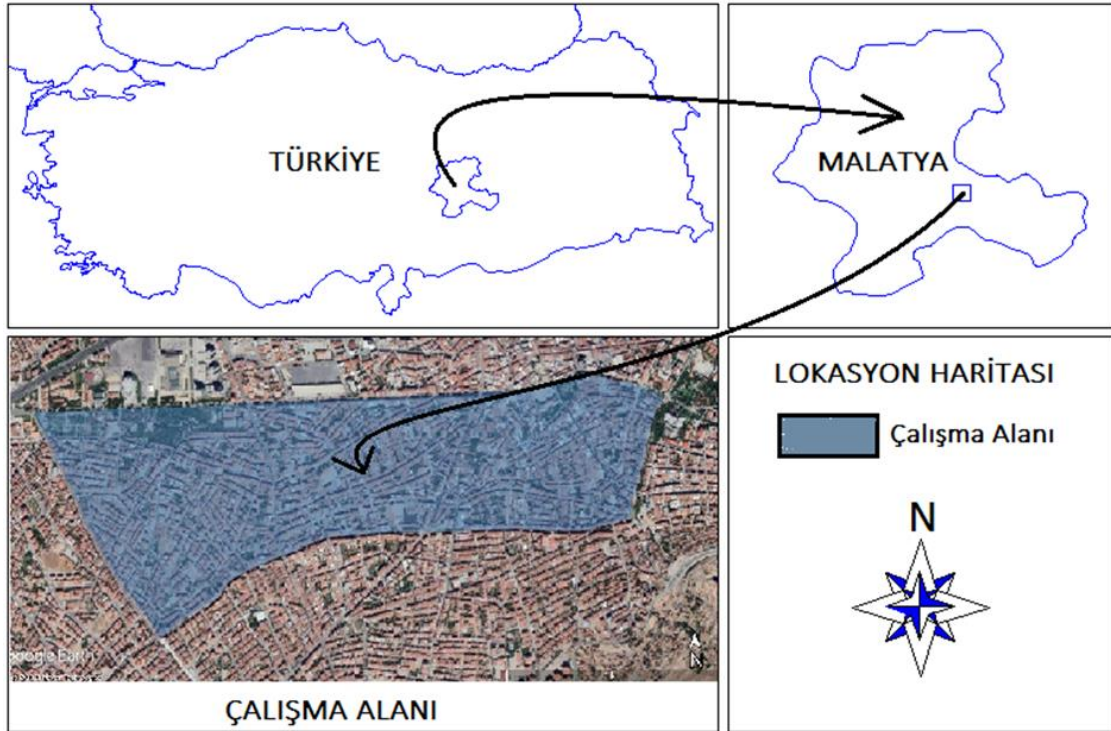
Şekil 1. Kentsel alanlardaki düşük etkili gelişim/yeşil altyapı bileşenleri (Arup, 2015).

Materyal ve Metot

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 (Şekil 2). 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. Alan Malatya'nın en kalabalık nüfusuna sahip merkezi iki ilçesi (Yeşilyurt-Battalgazi) sınırları içerisinde yer alan ve yoğun yapılaşmanın olduğu belirli bir bölgeyi kapsamakta olup 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.



Şekil 2. Çalışma alanı

Çizelge 1. Önceki çalışmalar

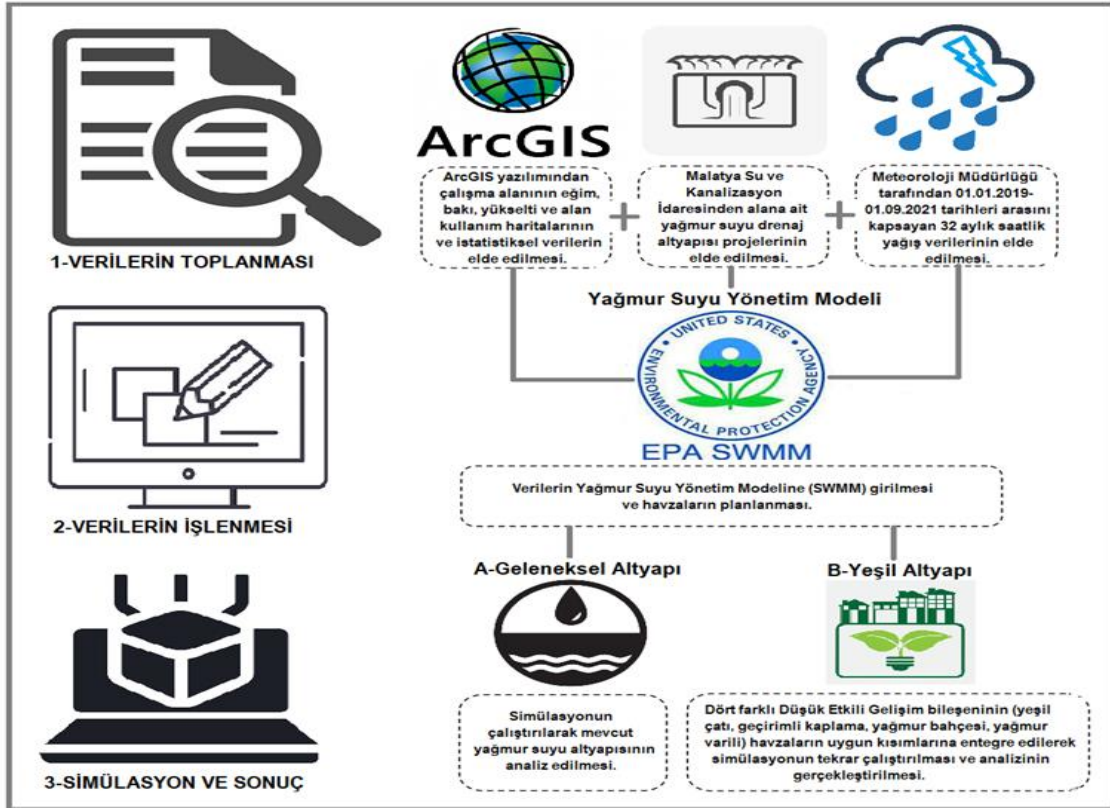
ÇALIŞMA KONUSU	ŞEHİR	METHOD	ARAŞTIRMA BULGULARI	REFERANS
Yağmur suyu yönetiminde alternatif yaklaşımların maliyeti	ABD genel	Analiz	Yeşil altyapı uygulamaları gri altyapı maliyetlerini yılda 120 milyon dolar azalttığı atık su ve pompalama maliyetlerini ise 661 milyon dolar azalttığı tespit edilmiştir.	(Mittman and Kloss, 2015)
Yağmur suyu yönetiminde alternatif yaklaşım	Michigan	Analiz	Yeşil çatılar hariç diğer yeşil altyapı bileşenlerinin gri altyapıya göre daha az maliyetli olduğu tespit edilmiştir.	(Nordman et al., 2018)
DEG bileşenlerinin kentsel sel üzerindeki etkileri	Shenzhen	Simülasyon (SWMM)	DEG tekniklerinin geleneksel sistemlere göre daha sürdürülebilir bir çözüm olduğu ve kentsel sel olaylarını azalttığı belirlenmiştir.	(Qin et al., 2013)
Yeşil altyapı sistemlerinin hidrolojik potansiyeli	Pekin	Simülasyon (SWMM)	YA bileşenlerinden depolama havuzlarının yüzey akışlarını %100 oranında, geçirimli kaplamalar ve yeşil alan kombinasyonunun ise %95 oranında yüzey akışlarını önlediği tespit edilmiştir.	(Liu et al., 2015)
DEG sistemlerinin hidrolojik performansı	Conneticut	Analiz	Düşük Etkili Gelişim uygulamalarının yağmur suyu akışlarını %42 oranında azalttığı tespit edilmiştir.	(Bedan and Clausen, 2019)
Yaşam döngüsü değerlendirilmesi	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 kapasitesi	Quebec	Simülasyon (SWMM)	Geçirimsiz alanların %21'i yağmur bahçesi olarak tasarlandığında %12,7-19,4 oranında yüzey akışlarını azalttığı tespit edilmiştir.	(Autixier et al., 2014)
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 yağmur suyu yüzey akışlarını %42, %56, %59 oranında azalttığı belirlenmiştir.	(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 (SWMM)	Kapsamlı bir yeşil çatının yıllık su tutma kapasitesi %50,20 olarak tespit edilmiştir.	(Stovin et al., 2012)
Yeşil çatıların hidrolojik performansı	Maharashtra	(SWMM)	Yeşil çatıların tepe akışlarını %10,80 oranında azalttığı tespit edilmiştir.	(Paithankar and Taji, 2020)
Yağmur suyu hasadı	İstanbul	Araştırma	Fabrika çatısının %40'undan toplanan sularının yağmur varillerinde depolanmasıyla günlük tuvalet temizliği ihtiyaçlarının karşılandığı tespit edilmiştir.	(Kantaroglu, 2009)
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)
Yağmur suyu hasadı	Sakarya	Araştırma	Kampüste binaların çatılarından toplanan suların günlük olarak sulanmada %10,90 oranında su tasarrufu sağlandığı belirtilmiştir.	(Eren vd., 2016)
Düşük Etkili Kentleşme uygulamalarının yüzeyel akışa etkisi	Avcılar	Simülasyon (SWMM)	Bir kampüsteki karayollarının tamamı geçirimli kaldırım ile kaplandığında %100 oranında yüzeyel akışları azalttığı tespit edilmiştir.	(Gülbaz vd., 2018)
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)
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 hidrolojik performansı	Garda baer	Deney	Soğuk su alanlarında topraktaki su seviyesinin yükselmesiyle yağmur hendeklerinin sızma kapasitesinin azaldığı tespit edilmiştir.	(Zaqout and Andradottir, 2021)
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 yapı alanlarının çatılarının %25'i uygun boyutlarda yağmur varili ve sarnıç gibi sistemler entegre edildiğinde toplam yüzeyel akışlarda %6 bir azalma tespit edilmiştir.	(Ahiablame et al., 2013)
Yağmur suyu hasadı	Bursa	Araştırma (SWMM)	Bir konut alanından toplanacak olan suyun yeşil alanların günlük olarak sulanmasında kullanılmasıyla %14 su tasarrufu sağlandığı tespit edilmiştir.	(Kılıç ve Abus, 2018)
Yağmur varili ve sarnıç sistemlerinin sel ve taşkınları önleme kapasitesi	San Luis	(SWMM)	Kentsel alanlarda yağmur varilleri yağmur suyu hacimlerini ortalama %3-14,3 azaltmasına rağmen sarnıçlara oranla 9 kat daha düşük olduğu tespit edilmiştir.	(ReyValencia and ZambranoNájera, 2019)

Yöntem

Çalışmada birbiriyle entegrasyonlu çalışabilen aşamalı bir yöntem belirlenmiştir. Öncelikli olarak ArcGIS modeli tercih edilmiş ve alana ait istatistiksel veriler ve alan kullanım özellikleri bu model tarafından belirlenmiştir. Sonra yöntem olarak USEPA (Amerika Birleşik Devletleri Çevre Koruma Ajansı) tarafından geliştirilen ve dinamik bir yağış-akış simülasyonu olan SWMM adlı yağmur suyu yönetim modeli tercih edilmiştir. Bu model, 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 (Huber et al., 1988). Model sisteme girilen kısa ve uzun süreli gerçek yağış verilerini kullanarak alanın yüzeyel akışlarını simüle etmektedir. Model ayrıca sisteme dâhil edilen 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 (Rossman, 2010). Şekil 3’de çalışmanın yöntem akış şeması gösterilmektedir.

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. Daha sonraki aşamada elde edilen ve işlenen veriler Yağmur Suyu Yönetim Modeline (SWMM) manuel olarak girilmiş ve alan planlanması yapılmıştır. Veri analizleri ile simülasyonlar çalıştırılmış ve yüzey akışları tespit edilmiştir. Çalışma alanının uygun kısımlarına belirli oranlarda 4 farklı DEG bileşeni entegre edilip çeşitli simülasyonlar gerçekleştirilerek DEG bileşenlerinin yağmur suyu yüzey akışlarını azaltma potansiyeli değerlendirilmiştir.



Şekil 3. Yöntem akış şeması

Bulgular ve Tartışma

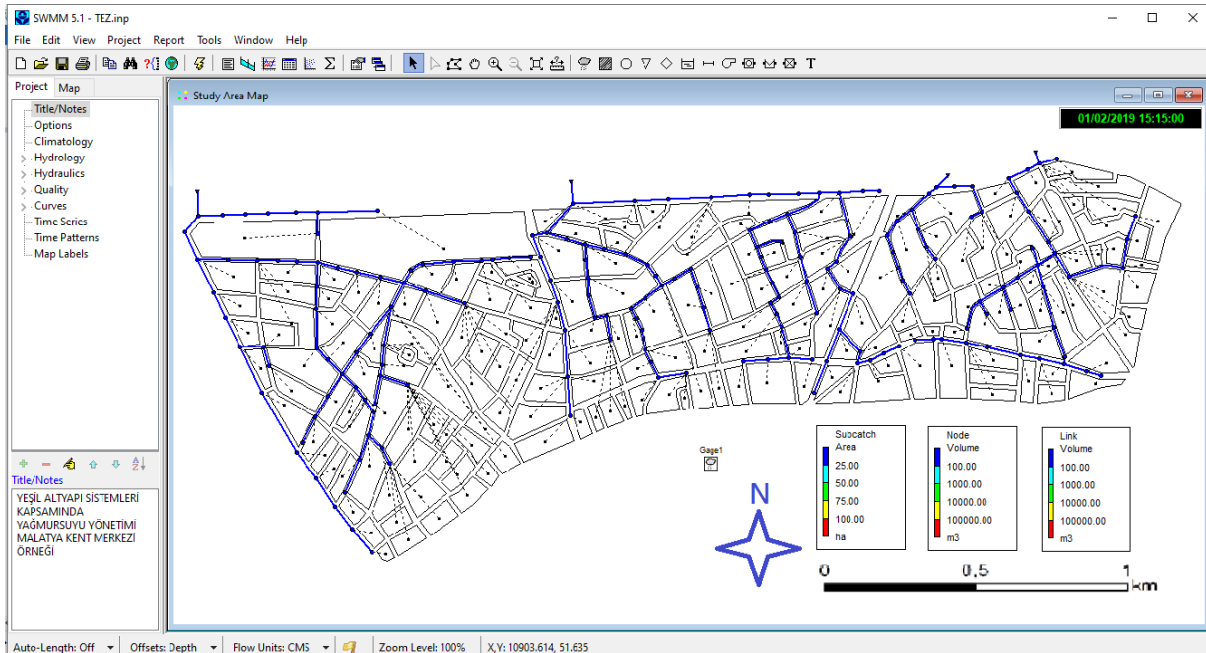
SWMM Modelinde Alanın Planlanması

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 programı kullanılarak belirlenmiş ve elde edilen veriler sisteme manuel olarak girilmiştir. Tüm havzalara ait geçirimli ve geçirimsiz alanların manning'in n değerlerinde sistemsel değerler kullanılmıştır. Daha sonra Malatya Su ve Kanalizasyon İdaresi Başkanlığı tarafından elde edilen mevcut yağmur suyu altyapı verileri (kavşak düğümlerinin(junctionnode) konumları, yükselteleri (invertlevation) ve derinlikleri; boru bağlantılarının (conduit) uzunlukları ve maksimum derinlikleri; çıkış düğümleri (outfall) yükselteleri) 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 DEG bileşeni kullanılmadan simülasyon çalıştırılmış ve mevcut altyapının ilgili yağış verilerine göre yüzey akışları tespit edilmiştir. Daha sonra her bir alt havzaya belirli oranlarda DEG bileşenleri entegre edilerek çeşitli senaryolar geliştirilmiş ve simülasyonlar tekrar edilerek DEG bileşenlerinin yüzey akışları hangi oranlarda azalttığı tespit edilmiştir. Şekil 4'de Yağmursuyu Yönetim Modelinde (SWMM) oluşturulmuş alanın planı verilmiştir. Mavi hatlar yağmursuyu altyapısını, bölünmüş alanlar havzaları, mavi hat üzerinde yer alan siyah noktalar kavşak düğümlerini (menholler) ve mavi hattın bitiminde yer alan noktalar çıkış düğümlerini göstermektedir.



Şekil 4. Yağmur Suyu Yönetim Modelinde (SWMM) oluşturulmuş alanın planı

Çalışma Alanı İçin Geliştirilen Senaryolar

Çalışma alanı öncelikle mevcut yağmursuyu altyapısının potansiyelinin anlaşılması ve elde edilen 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.

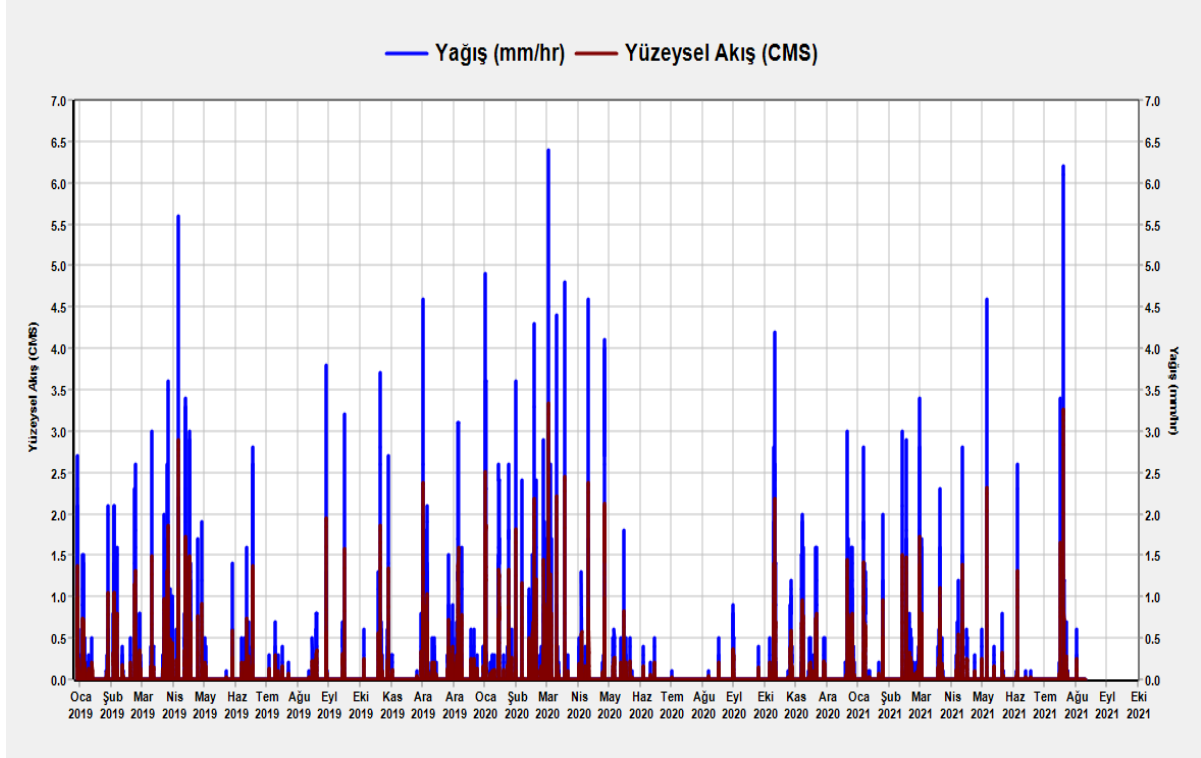
- ❖ Senaryo 1: Herhangi bir Düşük Etkili Gelişim bileşeni olmadan mevcut altyapının analizi,
- ❖ Senaryo 2: Tüm havzalardaki toplam çatı alanlarının %20'sinin yeşil çatı olarak planlanması,
- ❖ Senaryo 3: Tüm havzalardaki toplam çatı alanlarının %20'si oranında bir kısmından yağmurların toplanması üzere yağmur varillerinin entegre edilmesi,
- ❖ Senaryo 4: Tüm havzalardaki çatı alanları dışında kalan geçirimsiz alanların

%20'sinin geçirimli kaplama ile tasarlanması,

- ❖ Senaryo 5: Tüm havzalardaki toplam geçirimsiz alanların %20'sinin yağmur bahçesi olarak tasarlanması,
- ❖ Senaryo 6: Tüm sistemlerin belirtilen oranlarda birlikte tasarlanması.

Senaryo 1: Herhangi Bir Düşük Etkili Gelişim Bileşeni Olmadan Mevcut Altyapının 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. Havzalarda meydana gelen toplam yüzeysel akış değeri ise %88,70 olarak meydana gelmiştir. Şekil 5 mevcut altyapı verileri sonucu meydana gelen yağış/yüzeysel akış grafiğini göstermektedir.

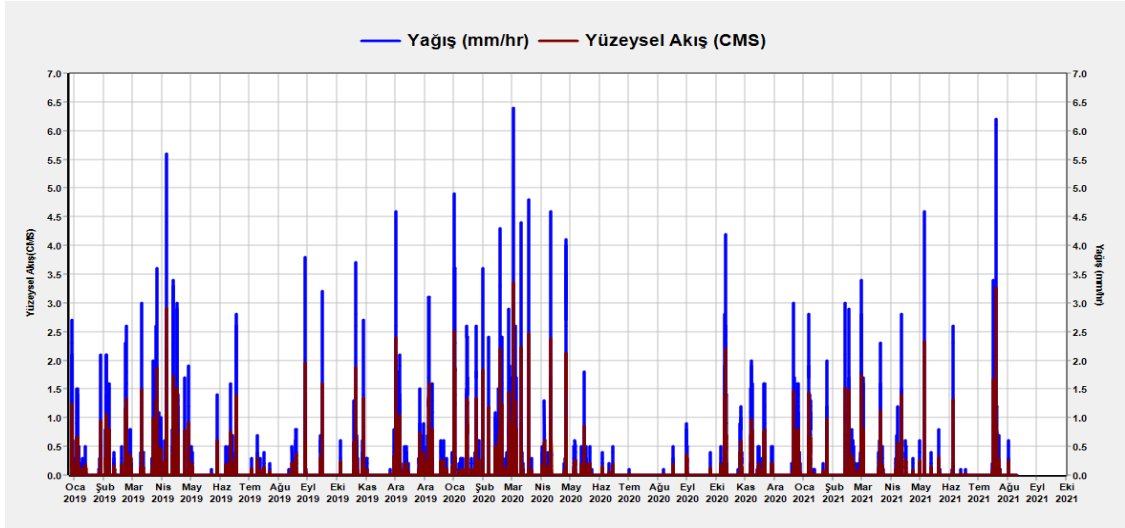


Şekil 5. Mevcut altyapı verileri sonucu meydana gelen yağış/yüzeysel akış grafiği

Havzalarda meydana gelen en fazla yüzeysel akış miktarı yağış yoğunluğunun 6.40 mm olduğu 31.03.2020 tarihinde 3,34 m³/s olarak ölçülmüştür.

Senaryo 2: Havzalara Yeşil Çatı Bileşeni 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. Şekil 6'da havzalara yeşil çatı bileşeni entegre edilmesi sonucunda meydana gelen yağış/yüzeysel akış grafiği verilmiştir.

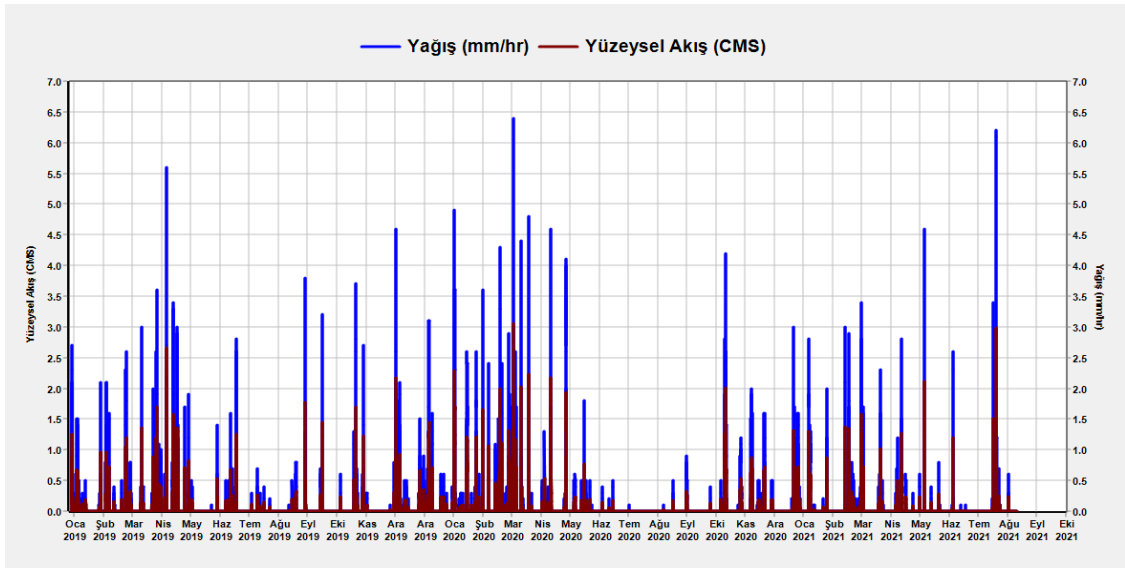


Şekil 6. Yeşil çatı bileşenlerinin entegre edilmesiyle meydana gelen yağış/yüzeysel akış grafiği

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.

Senaryo 3: Havzalara Yağmur Varili Bileşeni 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 500m²lik 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 217 litre su kullanıldığı belirtilmektedir. Bu durumda günlük kişi başı tuvaletlerde kullanılan su miktarı 56.50 litre olmaktadır. Şekil 7'de havzalara yağmur varili bileşeni entegre edilmesi sonucunda meydana gelen yağış/yüzeysel akış grafiği verilmiştir.

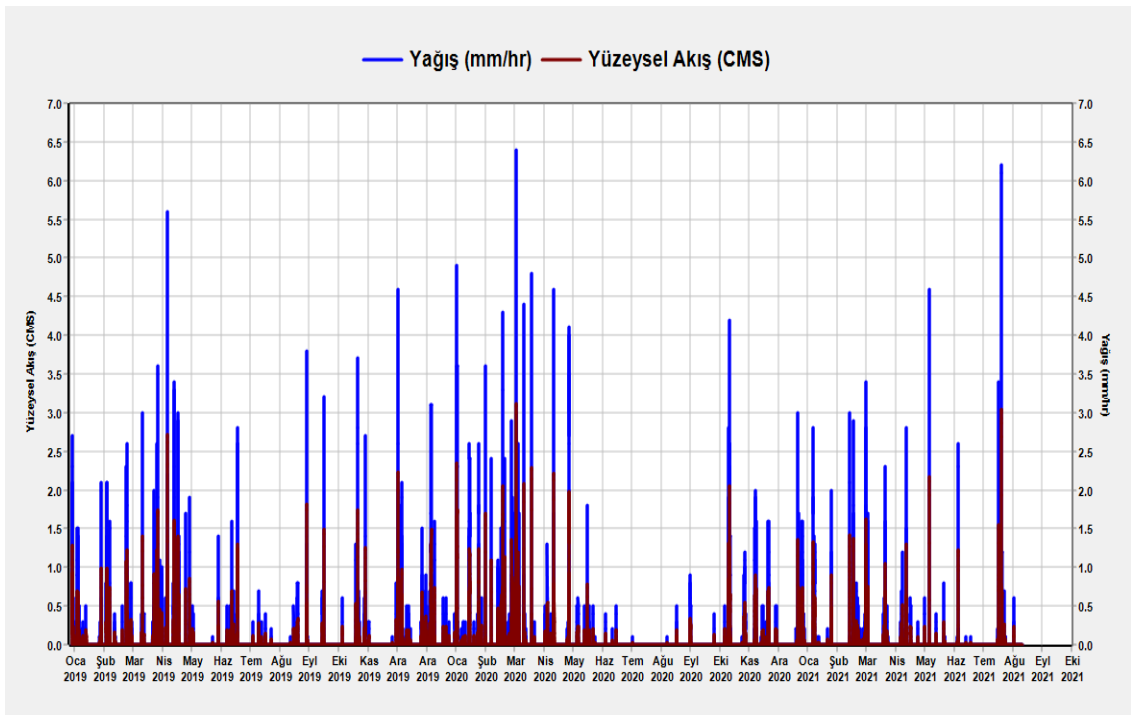


Şekil 7. Yağmur varili bileşenlerinin entegre edilmesiyle meydana gelen yağış/yüzeysel akış grafiği

Simülasyon sonuçları uzun süreli yağış olaylarında kullanılan yağmur varili/sarnıç gibi sistemlerin toplam yüzeysel akışları azalttığını ortaya koymuştur. Simülasyon sonuçları; çalışma periyodu boyunca düşen toplam 907,20mm yağışın 731,079mm sinin yüzeysel akışa neden olduğunu 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.

Senaryo 4: Havzalara Geçirimli Kaplama Bileşeni 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. Havzalarda meydana gelen yüzeysel akışın yüzdelik olarak değeri ise, %82,85 olarak tespit edilmiştir. Şekil 8 havzalara geçirimli kaplama bileşeni entegre edilmesi sonucunda meydana gelen yağış/yüzeysel akış grafiğini göstermektedir.

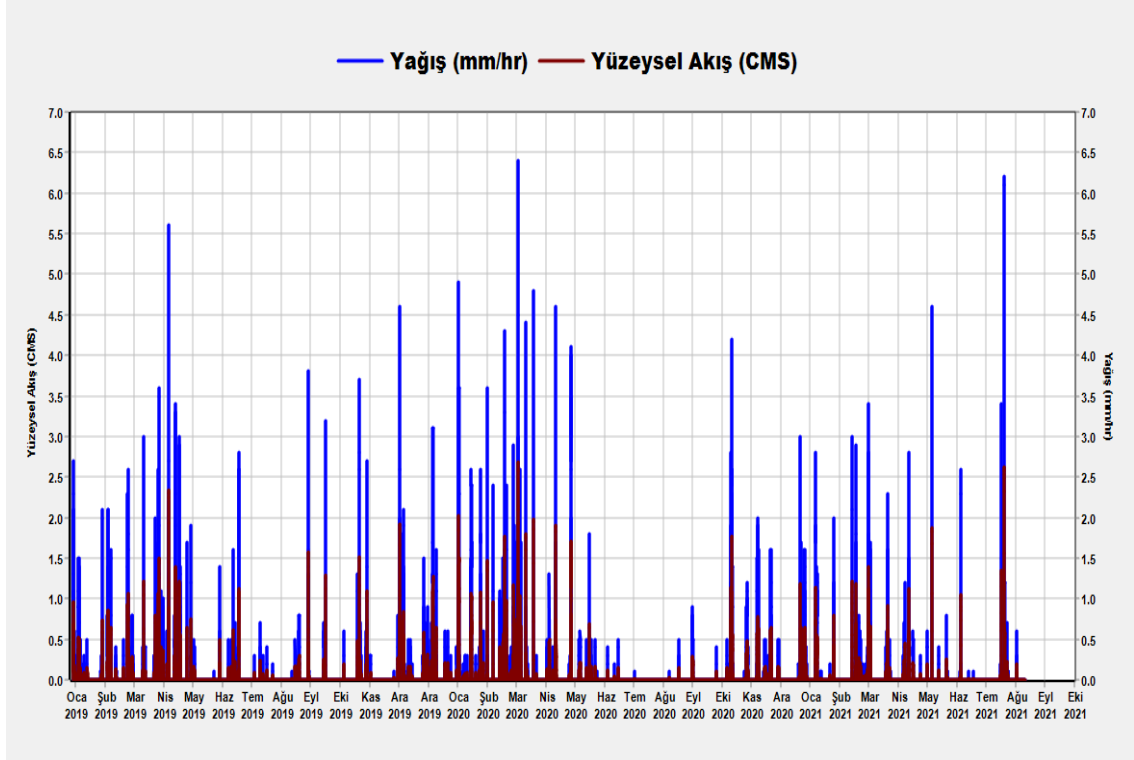


Şekil 8. Geçirimli kaplama bileşenlerinin entegre edilmesi sonucunda meydana gelen yağış/yüzeysel akış grafiği

Havzalarda meydana gelen en fazla yüzeysel akış miktarı, yağış yoğunluğunun 6,40mm olduğu zaman diliminde 3,12m³ olarak tespit edilmiştir. Zamana bağlı olarak meydana gelen yüzeysel akış-yağış grafiğine göre; havzalara geçirimli kaplama bileşenlerinin yerleştirilmesiyle toplam yüzeysel akış oranı %88,70'den %82,85'e gerileyerek %6,60 oranında bir düşüş meydana gelmiştir.

Senaryo 5: Havzalara Yağmur Bahçesi Bileşeni 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

dengeyi 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 edilmiş, 751,60mm si ise yani %82,85'i yüzeysel akışa neden olmuştur (Şekil 9). Alana yerleştirilen DEG ünitelerinin ilk depolama miktarı 3,35mm ve son depolama miktarı 6,74mm olarak ölçülmüştür. 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 maksimum tepe akışı 01.04.2020 tarihinde 3,12 m³/s olarak gerçekleşmiştir.



Şekil 10. Tüm bileşenlerinin entegre edilmesiyle meydana gelen yağış/yüzeysel akış grafiği

Günlük tepe akış istatistiklerine göre; toplam çalışma periyodu boyunca 269 olay meydana gelmiştir.

Sonuç ve Öneriler

Yapılan çalışma YA / 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 sebebiyet verdiği 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 olarak planlandığında yüzeysel akışların aynı oranda %6,60 oranında azaldığı tespit edilmiştir. Çizelge 2'de bileşenlerin eklenme oranları ve akış yüzdeleri özet olarak verilmiştir. 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 Bedan ve Clausen, (2019) DEG 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.

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. Bedan ve Clausen, (2019) DEG kullanılmasıyla yağmur suyu yüzey akışlarının %42 oranında azaldığını, Gülbaz vd, (2018) ise bir kampüs alanında belirli konumlarında uygulanan 4 farklı DEG bileşeninin (yeşil çatı, sızdırma hendeği,

geçirgen kaldırım, yağmur bahçesi) toplam yüzeysel akışları %12 oranında 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 olmasıdır. Bu tip çalışmalarda alanın mikroiklimi, coğrafi ve fiziki özellikleri mutlaka dikkate alınmalıdır. Çünkü bunlar direkt olarak sonucu etkileyecektir.

Çizelge 2. Geliştirilen senaryolara göre bileşenlerin eklenme oranları ve yüzeysel akış yüzdeleri

Senaryo	Eklenen Bileşen	Bileşenlerin Eklenme Yüzü	Toplam Göre Yüzdesi	Alana Eklenme	Toplam Yüzeysel Akış Yüzdesi	Mevcut Altyapıya Göre Düşüş Oranı
1	Mevcut Altyapı (Bileşen Yok)	-----	-----	-----	%88,70	-----
2	Yeşil Çatı	Çatı Alanlarının %20	%9,72	%9,72	%86,80	%2,15
3	Yağmur Varili	Çatı Alanlarının %20	%9,72	%9,72	%80,60	%8,10
4	Geçirimli Kaplama	Çatı alanları hariç diğer geçirimsiz alanların %20	%6,73	%6,73	%82,85	%6,60
5	Yağmur Bahçesi	Çatı alanları hariç diğer geçirimsiz alanların %20	%6,73	%6,73	%82,85	%6,60
6	Tüm Sistemlerin Birlikte Kullanılması	Toplam Çatı Alanlarının %40'ı ve toplam geçirimsiz alanların %40'ı	%32,90	%32,90	%69	%22,20

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, geçirimsiz 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. 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, (2009), büyük hacimli yağmur suyu toplama sistemlerinin yıllık yüzey akışlarını %20-100 oranında azalttığını, ReyValencia and Zambrona, (2019), 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.

Yeşil altyapı / DEG bileşenleri şehirleşmenin meydana getirdiği betonlaşmanın kısmen önüne geçerek kentlerde yeşil alan

miktarlarının artmasına ve yağmur suyunu emmeyen geçirimsiz yüzeylerin azalmasına yardımcı olacaktır. 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 sağlanmış olacaktır.

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. Bu çalışmada toplam çatı alanlarının %20 sinden akan yağmur sularınının 4m³ hacme sahip toplam 1872 adet yağmur variline depolanmasıyla 3 kişilik 10 bin ailenin 101 günlük tuvalet temizlik ihtiyaçlarını karşılayabileceği belirlenmiştir. Ayrıca diğer sistemlerin ilk depolama miktarları karşılaştırıldığında geçirimsiz 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 ise en etkili sistemin yağmur bahçeleri olduğu belirlenmiştir. En avantajlı senaryonun ise tüm sistemlerin birbiri ile entegre olarak kullanılması ile

sağlanacağı belirlenmiştir. Yağmur suyu yönetimi konusunda yapılan birçok çalışma yeşil altyapı sistemlerinin gri altyapıya kıyasla uzun vadede daha uygun maliyetli bir çözüm olabileceğini göstermektedir. Benzer araştırmaların daha farklı senaryo bileşenleri ile yapılmasının, sonuçların yerel yönetimler tarafından plan kararlarına aktarılması ve uygulamaya konulması açısından avantaj sağlayacağı öngörülmektedir.

*Bu çalışma, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Peyzaj Mimarlığı Bölümü Öğrencisi **Turgut DİNÇER**'in Yüksek Lisans Tezinden üretilmiştir.

Çıkar Çatışması Beyanı: Makale yazarları aralarında herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan ederler.

Araştırmacıların Katkı Oranı Beyan Özeti: Araştırmada "Katkı Oranına" göre yazar sıralamasına uyulmuştur.

Kaynaklar

- Abi Aad, M. P., Suidan, M. T., & Shuster, W. D. (2010). Modeling techniques of best management practices: Rain barrels rain gardens using EPA SWMM-5. *Journal of hydrologic engineering*, 15(6), 434-443.
- 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.
- Arup. (2015). Cities Alive. Retrieved from <https://www.arup.com/perspectives/cities-alive>. (03.04.2021)
- Autixier, L., Mailhot, A., Bolduc, S., Madoux-Humery, A.S., Galarneau, 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.
- Bedan, E. S., & Clausen, J. C. (2019). 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.
- 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
- DeBusk, K., & Wynn, T. (2011). Storm-water bioretention for runoff quality and quantity mitigation. *Journal of Environmental Engineering*, 137(9), 800-808.
- Ekşi, M. & Uzun, A. (2016). Yeşil çatı sistemlerinin su ve enerji dengesi açısından değerlendirilmesi . *Journal of the Faculty of Forestry Istanbul Uni.* 66 (1) , 119-138 .
- 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.*
- 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.
- Elliott, A. H., & Trowsdale, S. A. (2007). A review of models for low impact urban stormwater drainage. *Environmental Modelling & Software*, 22(3), 394-405.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- Huber, W. C., Dickinson, R. E., Barnwell Jr, T. O., & Branch, A. (1988). Storm water management model; version 4. *Environmental Protection Agency, United States.*
- 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

- 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.
- Kantaroğlu, Ö. (2009). Yağmur Suyu Hasadı Plan Ve Hesaplama Prensipleri. IX. *Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi*, 6-9.
- Kılıç, M. Y., & Abuş, M. N. (2018). Bahçeli Bir Konut Örneğinde Yağmur Suyu Hasadı. *Uluslararası Tarım ve Yaban Hayatı Bilimleri Dergisi*, 4(2), 209-215.
- 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.
- Mittman, T., & Kloss, C. (2015). The Economic Benefits of Green Infrastructure: A Case Study of Lancaster, PA.
- Nordman, E. E., Isely, E., Isely, P., & Denning, R. (2018). Benefit-cost analysis of stormwater green infrastructure practices for Grand Rapids, USA. *Journal of Cleaner Production*, 200, 501-510.
- NU, (2018). World urbanization prospects: the 2018 revision. *CD-ROM Edition*.
- 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.
- 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.
- 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.
- Rossman, L. A. (2010). *Storm water management model user's manual, version 5.0*: National Risk Management Research Laboratory, Office of Research
- 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.
- Stovin, V., Vesuviano, G., & Kasmin, H. (2012). The hydrological performance of a green roof test bed UK climatic conditions. *Journal of Hydrology*, 414-415, 148-161.
- ReyValencia, D., & Zambrano Nájera, J. Application Of Rain Barrels For Flood Control In An Urban Mountain Basins.
- Roseen, R. M., Ballesteros, T. P., Houle, J. J., & 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.
- TheWorldBank. (2021). Urban population (% of total population). *United Nations Population Division. World Urbanization Prospects: 2018 Revision*.
- Winston, R. J., Dorsey, J. D., & Hunt, W. F. (2016). Quantifying volume reduction and peak flow mitigation for three bioretention cells soils in northeast Ohio. *Science of The Total Environment*, 553, 83-95.
- 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