

**T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**KAMPÜS ÖLÇEĞİNDE SÜRDÜREBİLİR SU YÖNTEMİ,
SU AYAK İZİ VE NET SIFIR SU YAKLAŞIMLARI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mınahl FATİMA

Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı

TEMMUZ 2025

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KAMPÜS ÖLÇEĞİNDE SÜRDÜREBİLİR SU YÖNTEMİ,
SU AYAK İZİ VE NET SIFIR SU YAKLAŞIMLARI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mınahl FATİMA

Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Ahmet ÇELEBİ

TEMMUZ 2025

Mınahıl FATİMA tarafından hazırlanan “Kampüs Ölçeğinde Sürdürebilir Su Yöntemi, Su Ayak İzi ve Net Sıfır Su Yaklaşımları” adlı tez çalışması 11.07.2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı’nda Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Tez Jürisi

Jüri Üyesi : **Prof. Dr. Ahmet ÇELEBİ (Danışman)**
Sakarya Üniversitesi

Jüri Üyesi : **Prof. Dr Mehmet İŞLEYEN**
Sakarya Üniversitesi

Jüri Üyesi : **Doç.Dr. Gökmen ÇERİBAŞI**
Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi



ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ

Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Lisansüstü Eğitim-Öğretim Yönetmeliğine ve Yükseköğretim Kurumları Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Yönergesine uygun olarak hazırlamış olduğum “KAMPÜS ÖLÇEĞİNDE SÜRDÜREBİLİR SU YÖNTEMİ, SU AYAK İZİ VE NET SIFIR SU YAKLAŞIMLARI” başlıklı tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın tüm aşamalarında yukarıda belirtilen yönetmelik ve yönergeye uygun davrandığımı, tezin içerdiği yenilik ve sonuçları başka bir yerden almadığımı, tezde kullandığım eserleri usulüne göre kaynak olarak gösterdiğimi, bu tezi başka bir bilim kuruluna akademik amaç ve unvan almak amacıyla vermediğimi ve 20.04.2016 tarihli Resmi Gazete’de yayımlanan Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 9/2 ve 22/2 maddeleri gereğince Sakarya Üniversitesi’nin abonesi olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Enstitü tarafından belirlenmiş ölçütlere uygun rapor alındığını, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun ortaya çıkması halinde doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi beyan ederim.

(11/07/2025).

Mınahıl FATİMA



TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim boyunca değerli bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım, her konuda bilgi ve desteğini almaktan çekinmediğim, araştırmanın planlanmasından yazılmasına kadar tüm aşamalarında yardımlarını esirgemeyen, teşvik eden, aynı titizlikle beni yönlendiren değerli danışman hocam Prof. Dr. Ahmet ÇELEBİ'ne en içten teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca, eğitim sürecimde bilgi ve tecrübeleriyle katkı sağlayan tüm hocalarıma, desteğini her zaman hissettiren aileme ve manevi desteğini esirgemeyen arkadaşlarıma da teşekkür ederim.

Mınahıl FATİMA



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ	v
TEŞEKKÜR	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xi
TABLO LİSTESİ	xiii
ŞEKİL LİSTESİ	xv
ÖZET	xvii
SUMMARY	xix
1. GİRİŞ	1
1.1. Araştırmanın Sorusu	3
1.2. Araştırma Amacı ve Hedefi	3
1.3. Kapsam	4
1.4. Metodoloji	4
1.5. Hipotez	5
1.6. Çalışmanın Yeniliği	5
1.7. Su Kaynağına Genel Bakış	6
1.8. Su Ayak İzi ve Türleri	9
1.8.1. Türleri mavi, yeşil ve gri	10
1.8.2. Doğrudan ve dolaylı su ayak izi	12
1.8.3. Sanayilerin su ayak izi	13
1.8.4. Enerji ve gıda sektörü için su ayak izi	15
1.8.5. Kampüsün su ayak izi	17
1.9. Su Sürdürülebilirlik ve Net Sıfır Su Yaklaşımları	20
1.10. Küresel ve Türkiye'nin Su ve Kıtıllık Senaryosu	22
1.11. Net Sıfır Su Yaklaşımı	25
2. METODOLOJİ	31
2.1. Çalışma Alanı	31
2.2. Su Ayak İzi	32
2.2.1. Veri toplama	32
2.2.2. Doğrudan su ayak izi	32
2.2.3. Dolaylı su ayak izi	32
2.3. Yağmur Suyu Hasadı	37
2.3.1. Sistem planlaması	41
2.3.2. Çatı alanı analizi ve hasat potansiyeli	43
2.4. Maliyet Analizi	49
3. SONUÇLAR	53
3.1. Doğrudan Su Tüketimi	53
3.2. Dolaylı Su Ayak İzi	54
3.2.1. Elektrik için su ayak izi	54
3.2.2. Gıda atıklarının su ayak izi	56

3.2.3. Kağıt atıkları için su ayak izi.....	57
3.3. Toplam Su Ayak İzi.....	58
3.4. Yağmur Suyu Hasadı.....	59
3.4.1. Yağış alanı ve su talebi.....	59
3.4.2. Yağmur hasadı potansiyeli ve sistem elemanları	61
3.5. Maliyet Analizi ve Ekonomik Değerlendirme	62
3.5.1. Yatırım maliyeti	62
3.5.2. İşletme maliyeti	63
4. TARTIŞMA VE ÖNERİLER	67
KAYNAKLAR.....	71
EKLER.....	77
ÖZGEÇMİŞ.....	83



KISALTMALAR

ABD	: Amerika Birleşik Devleti
AS	: Anaerobik Sindirim
BM	: Birleşik Millet
CBS	: Coğrafi Bilgi Sistem
KU	: Katmandu Üniversitesi
PVC	: Polivinil Klorür
SA	: Su Ayak İzi
SKH	: Sürdürülebilir Kalkınma Hedefler
UTP	: Pereira Üniversitesi
YSH	: Yağmur Su Hasadı



TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 2.1. Gıda türler için su ayak izi değerleri.	34
Tablo 2.2. Sakarya'nın 72 yıllık meteorolojik verileri. ³	39
Tablo 2.3. Bölgelere göre yeşil alanı.	42
Tablo 2.4. Yeşil suların su ihtiyacı.	43
Tablo 2.5. Haftalık sulama ihtiyacı.	43
Tablo 2.6. Bölgelerin çatı alanı ve yağmur suyu miktarı.	44
Tablo 2.7. Sulama için su ihtiyacı.	46
Tablo 2.8. Bölgelerin çatı alanı ve yağmur suyu miktarı.	47
Tablo 2.9. Toplam alanı.	47
Tablo 3.1. 2022 Su tüketim.	53
Tablo 3.2. 2023 Su tüketim.	54
Tablo 3.3. 2022 Yılın elektril tüketimi.	55
Tablo 3.4. 2023 yılın elektrik tüketimi.	55
Tablo 3.5. Yağmur su hasadı birimi.	59
Tablo 3.6. Su talebi.	60
Tablo 3.7. Yağmur su hasadı potansiyeli.	61
Tablo 3.8. Çatı alanı ve oluk eğimine göre oluk boyutlandırma tablosu.	61
Tablo 3.9. Depolama tank boyut ve maliyetleri.	62
Tablo 3.10. Parçaların maliyetleri.	62
Tablo 3.11. Maliyet ve tasarruf analizi.	64



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1. Su döngüsü süreci.	9
Şekil 1.2. 2040 yılında ülke düzeyinde su stresi.	23
Şekil 2.1. Sakarya üniversitesi'nin uydu görüntüsü.	31
Şekil 2.2. Sakarya'nın 72 yıllık sıcaklık analizi.	40
Şekil 2.3. Sakarya'nın 72 yıllık yağış analizi.	41
Şekil 2.4. Sakarya üniversitesi'nin 8 bölgesi.	41
Şekil 2.5. Sakarya üniversitesi'nin çatı alanı.	45



KAMPÜS ÖLÇEĞİNDE SÜRDÜREBİLİR SU YÖNTEMİ, SU AYAK İZİ VE NET SIFIR SU YAKLAŞIMLARI

ÖZET

Su sürdürülebilirliği, üniversitelerin bugün karşılaştığı en önemli çevresel ve operasyonel zorluklardan biridir. Bu zorluk, özellikle su kaynaklarının kıt olduğu ve su yönetim sistemlerinin yetersiz olduğu bölgelerde daha da acil hâle gelmektedir. Bu tez, Sakarya Üniversitesi'nin su ayak izini ayrıntılı bir şekilde inceler, kampüs düzeyinde sürdürülebilir su yönetimi uygulamalarını araştırır ve yağmur suyu hasat sistemlerini içeren kapsamlı bir net sıfır su stratejisi önermektedir.

Çalışmanın ilk aşamasında, Sakarya Üniversitesi'nin su ayak izi hem doğrudan hem de dolaylı su tüketimi dikkate alınarak değerlendirildi. Bu değerlendirme, öğrenciler ve personel tarafından gerçekleştirilen su kullanımı, peyzaj sulama, laboratuvar faaliyetleri ve diğer operasyonel görevleri kapsamaktadır. Analizler, üniversitenin su ayak izinin ayrıntılı bir hesabını sağlayan, uluslararası olarak tanınan su ayak izi değerlendirme yöntemleri kullanılarak yürütüldü. Sonuçlar, mevcut su kullanım uygulamalarıyla ilişkili su bağımlılığı ve çevre kirliliği seviyelerini ortaya koyarak, özellikle sulama ve bina operasyonları gibi alanlarda su tasarrufu ve verimlilik iyileştirmeleri için önemli bir potansiyel olduğunu vurgulamaktadır.

Tezde ele alınan bir diğer önemli konu ise, kampüs düzeyinde su tüketimini yenilenebilir kaynaklarla uyumlu hale getirmeyi amaçlayan net sıfır su yaklaşımıdır. Yağmur suyu hasadı, geleneksel su temin sistemlerine sürdürülebilir ve uygun maliyetli bir alternatif olarak öne çıkmaktadır. Çalışma, Sakarya Üniversitesi için bir yağmur suyu hasadı altyapısının geliştirilmesini ve bu sistemin uygulanabilirliğinin değerlendirilmesini içermektedir. Bu hedef doğrultusunda; çatı alanları, yağış miktarları ve üniversitenin depolama kapasiteleri gibi faktörler dikkate alınmıştır. Özellikle, yıllık yağmur suyu potansiyeli Sakarya'ya ait 72 yıllık yağış verileri kullanılarak modellenmiş ve bu potansiyel, kampüsün su talebi senaryolarıyla karşılaştırılmıştır.

Bu tartışma, nicel değerlendirmelerin yanı sıra yağmur suyu hasadı sistemlerinin çevresel ve ekonomik avantajlarını da kapsamaktadır. Çevresel açıdan, yağmur suyu hasadının belediye su kaynaklarına olan bağımlılığı azaltabileceği, mavi su ayak izini düşürebileceği ve bölgedeki su kıtlığı etkilerini hafifletebileceği vurgulanmaktadır. Ekonomik açıdan ise, bu sistemlerin su faturalarını düşürebileceği, uzun vadeli tasarruflar sağlayabileceği ve yeşil altyapıya yatırım fırsatları yaratabileceği yönünde kanıtlar sunulmaktadır. Ayrıca, yağmur suyu hasadının gri su geri dönüşümü ve düşük akışlı armatürler gibi diğer sürdürülebilir su yönetimi stratejileriyle entegrasyonu da incelenmektedir.

Önerilen yağmur suyu hasadı sistemi, yalnızca teknik bir çözüm değil; aynı zamanda çevresel ve sosyal farkındalığı teşvik etmenin hayati bir yolu olarak da hizmet etmektedir. Sakarya Üniversitesi, eğitim ve araştırma hedefleriyle uyumlu şekilde sürdürülebilir su yönetimi uygulamalarında liderlik etme potansiyeline sahiptir. Bu

tez, yağmur suyu hasadı sistemlerinin üniversite altyapısına entegre edilmesinin, hem su tasarrufunu artırabileceğini hem de öğrenciler ile akademik ve idari personel arasında sürdürülebilirlik bilincini geliştirebileceğini vurgulamaktadır. Dahası, bu sistemler üniversiteyi sürdürülebilirlik araştırmaları ve eğitimi açısından yaşayan bir laboratuvara dönüştürebilir ve diğer kurumlara örnek oluşturabilir.

Bu tezde sunulan analiz ve öneriler, Sakarya Üniversitesi'nin su yönetiminde daha sürdürülebilir bir yaklaşıma doğru ilerlemesine yönelik pratik çözümler sunmaktadır. Temel öneriler arasında; yağmur suyu toplama sistemlerinin üniversitenin su yönetim stratejisinin merkezi bir bileşeni olarak benimsenmesi, mevcut binaların bu sistemlerle donatılması ve su koruma politikalarının kampüs planlamasına entegre edilmesi yer almaktadır. Ayrıca, net sıfır su hedeflerine ulaşılabilmesi için izleme ve değerlendirme sistemlerinin uygulanmasının önemi de vurgulanmaktadır.

Sonuç olarak, yağmur suyu hasadı sistemlerinin stratejik olarak uygulanması yoluyla Sakarya Üniversitesi'nin net sıfır su hedefine ulaşabileceğini ve bu sürecin hem çevresel hem de ekonomik açıdan fayda sağlayacağını ortaya koymaktadır. Su ayak izinin etkin bir şekilde yönetilmesi ve yenilikçi, doğa temelli çözümlerin hayata geçirilmesi sayesinde Sakarya Üniversitesi; çevresel etkisini önemli ölçüde azaltabilir, su güvenliğini artırabilir ve sürdürülebilir kampüs yönetimi konusunda lider bir konuma gelebilir. Bu çalışma, yükseköğretim kurumlarında sürdürülebilir su yönetimi ve kalkınma konularına önemli bir literatür katkısı sunmakta ve küresel sürdürülebilirlik hedefleri doğrultusunda diğer kampüsler için örnek bir model oluşturmaktadır.

SUSTAINABLE WATER MANAGEMENT AT THE CAMPUS SCALE, WATER FOOTPRINT, AND NET-ZERO WATER APPROACHES

SUMMARY

Water sustainability has emerged as one of the most pressing environmental and operational challenges faced by universities across the globe. With growing populations, increased campus activities, and the impacts of climate change, higher education institutions must re-evaluate their water management practices to ensure long-term resilience and environmental responsibility. This issue becomes even more critical in regions where water resources are scarce and existing water management systems are either outdated or inefficient. In this context, the present thesis focuses on a comprehensive analysis of the water footprint of Sakarya University, with the overarching goal of formulating a practical and sustainable net-zero water strategy through the implementation of rainwater harvesting systems.

The initial phase of this study involved a detailed calculation of the university's water footprint, accounting for both direct and indirect sources of water use. Direct usage includes domestic consumption by students, faculty, and administrative staff; irrigation of the campus's extensive green spaces; and water-intensive activities in laboratories and maintenance operations. Indirect usage factors in the water embedded in goods and services procured by the university, encompassing everything from food services to energy production and construction materials. The assessment employed internationally recognized methodologies for water footprint accounting, ensuring comparability and scientific rigor. The results highlighted the considerable dependence of Sakarya University on freshwater sources and illuminated the environmental implications of current usage patterns. More specifically, it revealed that irrigation practices and inefficient building operations contributed substantially to the university's overall water footprint.

The findings from the footprint assessment underscored the urgent need for targeted interventions to enhance water efficiency across the campus. Key opportunities for water conservation were identified, especially in terms of landscape management, building retrofitting, and behavioral interventions aimed at reducing per capita water consumption. These areas were flagged for their high potential impact and feasibility, setting the stage for a strategic reorientation of the university's water management framework.

A central component of this thesis is the development and evaluation of a net-zero water strategy tailored to the specific needs and capabilities of Sakarya University. A net-zero water approach seeks to balance water consumption with renewable sources, thereby creating a closed-loop system that minimizes reliance on external water supplies and reduces wastewater discharge. Among the various sustainable alternatives explored, rainwater harvesting was identified as the most viable solution, both environmentally and economically. This method involves capturing and storing rainwater for non-potable uses such as irrigation, toilet flushing, and cooling systems, thus reducing the demand on municipal water infrastructure.

To assess the feasibility of implementing rainwater harvesting at Sakarya University, a detailed infrastructure plan was developed. The analysis considered factors such as available rooftop surface areas for catchment, annual and seasonal rainfall patterns, and the required storage capacity to meet different levels of demand. Utilizing 72 years of historical rainfall data specific to Sakarya, the study modeled various scenarios to estimate the potential volume of water that could be harvested annually. This modeling effort was complemented by demand-side assessments to determine how harvested rainwater could be optimally utilized across the campus.

In addition to technical feasibility, the thesis explores the broader environmental and economic benefits associated with rainwater harvesting. Environmentally, reducing dependence on municipal water supplies contributes to a lower blue water footprint and mitigates the strain on regional water resources. It also diminishes stormwater runoff, which can reduce the risk of localized flooding and water pollution. Economically, the implementation of rainwater harvesting systems can result in substantial savings on utility bills, provide a buffer against future water price increases, and create opportunities for investing in other green infrastructure initiatives. These benefits were quantitatively and qualitatively assessed to provide a holistic evaluation of the proposed system.

Moreover, the study highlights the importance of integrating rainwater harvesting with complementary strategies to maximize water efficiency. These include the use of greywater recycling systems, low-flow fixtures, and real-time monitoring technologies. Such integrations can enhance the resilience of the university's water systems and ensure that sustainability efforts are both scalable and adaptable to future needs.

An often-overlooked but crucial aspect of sustainable water management is community engagement and awareness. The proposed rainwater harvesting system is designed not only as a technical intervention but also as an educational tool. As a hub of education and innovation, Sakarya University is in a unique position to foster a culture of environmental stewardship among its stakeholders. By involving students, faculty, and administrative personnel in the planning, implementation, and monitoring of sustainability initiatives, the university can create a vibrant learning environment that extends beyond the classroom. Demonstration projects, informational campaigns, and curriculum integration are just a few ways in which rainwater harvesting can be leveraged to promote broader sustainability goals.

This educational component is critical to instilling lasting behavioral changes and reinforcing the university's mission of shaping responsible global citizens. Beyond infrastructure, it is people who play the most important role in sustaining change. Therefore, fostering an inclusive and informed community that actively participates in water conservation efforts is fundamental to achieving long-term success. Engaging students through hands-on learning experiences, research opportunities, and sustainability-focused extracurricular activities can drive innovation and enthusiasm around water-related challenges.

The implications of this study extend beyond Sakarya University. The findings and strategic recommendations offer a replicable model for other institutions seeking to reduce their water footprint and enhance sustainability. Key recommendations include prioritizing rainwater harvesting as a foundational element of campus water strategies, retrofitting existing buildings to support water collection systems, and embedding water conservation measures into campus-wide policies and master planning processes. The study also underscores the importance of establishing robust

monitoring and evaluation systems to track progress, identify areas for improvement, and ensure accountability.

In conclusion, this thesis presents a compelling case for transitioning Sakarya University toward a net-zero water future through the strategic implementation of rainwater harvesting systems. The research demonstrates that such a transition is not only technically feasible and economically viable but also environmentally necessary. By taking decisive action to manage its water footprint, the university can significantly reduce its environmental impact, bolster water security, and set a benchmark for sustainable campus operations. Furthermore, this study contributes meaningfully to the growing body of literature on campus-scale water sustainability and serves as a guiding framework for institutions worldwide that aspire to align with global sustainability targets. Future studies may also explore integrating digital technologies such as IoT sensors and AI-based monitoring systems for precision water management, further improving the effectiveness and responsiveness of sustainability initiatives on campus.





1. GİRİŞ

Su genellikle sıradan bir madde olarak görülür, ancak aslında olağanüstüdür. Dünya yüzeyinin %71'i, yani üçte ikisi su ile kaplıdır. Bu suyun %97'si deniz suyu olup yalnızca %3'ü tatlı sudur. (Ahuja, 2021). Dünyanın tatlı su kaynaklarının %30'u yer altındadır ve bunların çoğu, derin ve ulaşılması zor su tabakalarında bulunmaktadır. Göller ve nehirler, toplam tatlı suyun %0,25'inden biraz fazlasını oluştururken, göller bu kıt kaynağın büyük bir kısmını barındırmaktadır (Valiente Parra et al., 2022). Su tüketim dağılımına bakıldığında, yaklaşık %70'i tarımsal faaliyetlere ayrılırken, %20'si sanayi sektörü tarafından kullanılmakta ve yalnızca %10'u hanehalkı ihtiyaçları için tüketilmektedir (El-Ghonemy, 2012).

Su tüketimi, bireylerin yaşam tarzları ve nüfus artışıyla yakından bağlantılıdır. Küresel nüfusun 2050 yılına kadar 9,2 milyara ulaşacağı ve bunun da kişi başına düşen tatlı su miktarının yıllık 7.000 metreküpten 5.000 metreküpe düşmesine yol açacağı tahmin edilmektedir. Sonuç olarak, 14 ülkenin ve yaklaşık 1,8 milyar insanın su kıtlığı yaşaması beklenmektedir (Schlosser et al., 2014).

Su kıtlığı, genellikle su talebinin mevcut kaynakları aşması durumunda ortaya çıkar ve nüfusun su gereksinimlerini karşılamada ciddi zorluklara yol açar. Bu sorun, küresel bir endişe haline gelmiş; dünyanın çeşitli bölgelerini etkileyerek tarımsal üretkenliğin azalmasına, ekonomik zorluklara ve ekosistemler üzerinde olumsuz etkilere neden olmuştur. Günümüzde 2 milyardan fazla insan, ciddi su stresi yaşanan bölgelerde yaşamaktadır ve bu rakamın önümüzdeki yıllarda artması, su kıtlığına ilişkin kaygıların da giderek büyümesi beklenmektedir. Aynı zamanda, 1 milyardan fazla kişi temiz ve güvenli içme suyuna erişememektedir; bu durum, gelişmiş su altyapısı ve sanitasyona olan acil ihtiyacı açıkça ortaya koymaktadır. Ne yazık ki, su kaynaklı hastalıklar her yıl yaklaşık 3,4 milyon insanın kirli su tüketmesi nedeniyle hayatını kaybetmesine yol açmaktadır. Dahası, milyonlarca kadın ve çocuk, su temin edebilmek için günde ortalama 6 kilometre yol katetmek zorunda kalmakta; bu zorlu görev, onların günlük yaşamlarını ve fırsatlarını ciddi şekilde etkilemektedir (Tzanakakis et al., 2020). Tatlı su kaynaklarının ve ekosistemlerinin korunması,

Birleşmiş Milletler Sürdürülebilir Kalkınma Hedeflerine (SKH) ulaşmak açısından hayati öneme sahiptir. Sanitasyon ve temiz su (SKH 6), sıfır açlık (SKH 2) ve temiz, erişilebilir enerji (SKH 7) gibi hedefler, su kaynaklarının sürdürülebilir bir şekilde yönetilmesinin kritik önemini vurgulamaktadır(Boulay et al., 2021).

Su kıtlığı tek başına bir sorun değildir; birçok kurak ve yarı kurak ülkede, su kaynaklarının etkisiz yönetimi ve yetersiz politikalar durumu daha da kötüleştirmiştir. Ayrıca, bu kaynakları yönetmek amacıyla uygulanan önlemler ve düzenlemeler, yetersiz uygulanmaları nedeniyle sınırlı etki göstermiştir(UNEP, 2002).

Su yönetimi ve su kıtlığı sorunlarını ele almak için su ayak izi analizinin yapılması büyük önem taşımaktadır. Su ayak izi, bireyler, işletmeler veya ürünler tarafından hem doğrudan hem de dolaylı olarak kullanılan toplam tatlı su hacmini ifade eder. Bu analiz, yerel olarak tüketilen suyun yanı sıra sanal suyu da kapsayarak su arzı ve talebini bütüncül bir şekilde değerlendirmektedir (Chapagain & Hoekstra, 2007). Su ayak izlerinin bu şekilde hesaplanması, yüksek miktarda su tüketen alanların belirlenmesine yardımcı olur ve gelişmiş su yönetimi ile koruma çabalarının etkinliğini artırır. Ayrıca, su kaynakları üzerindeki etkileri vurgulayarak hem su kıtlığının hem de çevresel zararların azaltılmasına katkı sağlar. Bireyler ve kuruluşlar, su ayak izlerini anlayıp etkin bir şekilde yöneterek daha sürdürülebilir tercihler yapabilir ve mevcut ile gelecek nesiller için temel su kaynaklarının korunmasına destek olabilir. Su ayak izinin belirlenmesi ve en aza indirilmesi, net sıfır su hedeflerine ulaşılmasına yardımcı olurken, tedarik zinciri boyunca su tüketimini ve suya bağlı kirliliği azaltmada da önemli bir rol oynar(Hoekstra et al., 2017)

Üniversite kampüslerinin su ayak izinin ISO 14046 standartlarına göre hesaplanmasına yönelik çok sayıda çalışma yürütülmüştür. Bu çalışmalar, su kullanımı hakkında değerli içgörüler sunmuş ve su kıtlığı ile ekosistem bozulmasına katkıda bulunan kritik alanları belirlemiştir. Yukarıda belirtilen su kıtlığı krizi göz önünde bulundurulduğunda, bu çalışma, söz konusu krizi hafifletmeye yönelik stratejileri keşfetmeyi amaçlamaktadır. Çalışma ayrıca, bir üniversitenin yalnızca bir öğrenim alanı değil; aynı zamanda su ve enerji gibi temel kaynakların önemli bir tüketicisi olduğunu vurgulamaktadır. Bu araştırma, bir üniversite kampüsünün su ayak izini inceleyerek, bu tür kurumlardaki su kullanımının karmaşıklıklarını ortaya koymayı ve su ayak izinin değerlendirilmesi sürecinde karşılaşılan zorluklar ile ortaya çıkan fırsatlar hakkında derinlemesine içgörüler sunmayı amaçlamaktadır. Yağmur suyu

hasadı gibi net sıfır su stratejilerinin benimsenmesiyle, bir üniversite kampüsü su ayak izini önemli ölçüde azaltabilir, yerel su sistemlerinin sağlığını destekleyebilir ve hem topluluklara hem de diğer kurumlara sürdürülebilir uygulamalar konusunda örnek teşkil edebilir.

1.1. Araştırmanın Sorusu

Araştırmanın temel sorusu şudur: *“Kampüs ölçeğinde net su tüketimi, su ayak izi ve verimliliğin kapsamlı bir analizi, sürdürülebilir su yönetimi için uygulanabilir bir net sıfır su yaklaşımının geliştirilmesine ve uygulanmasına nasıl katkıda bulunabilir?”*

Bu çalışma, su ayak izi sürecinin Sakarya Üniversitesi’ndeki su tüketimi ve suyla ilişkili riskleri nasıl tanımlayabileceğine ve bu riskleri nasıl azaltabileceğine odaklanmaktadır. Ayrıca, net sıfır su yaklaşımının kampüs düzeyinde su sürdürülebilirliğini nasıl yönlendirebileceği de vurgulanmaktadır.

1.2. Araştırma Amacı ve Hedefi

Su kıtlığı, günümüz dünyasında giderek artan bir endişe kaynağıdır ve bunun başlıca iki nedeni bulunmaktadır: artan nüfus ve su kaynaklarının yetersizliği. Bu çerçevede, bu çalışmanın amacı, Sakarya Üniversitesi Esentepe Kampüsü’ndeki su tüketimini araştırmak ve değerlendirmektir. Ayrıca, bu çalışma; akademik, idari ve rekreasyon alanlarını kapsayan üniversite kampüsünün su ayak izini nicel olarak belirlemek amacıyla kapsamlı bir analiz gerçekleştirmeyi hedeflemektedir. Bu kapsamda, yüksek etki alanlarını belirlemek üzere su tüketim kalıplarının ve kaynaklarının anlaşılması amaçlanmaktadır. Bununla birlikte, dış su kaynaklarına olan bağımlılığı azaltmak adına net sıfır su alternatiflerinin tanıtılması da önerilmektedir. Bu alternatifler arasında yağmur suyu hasat sistemlerinin kurulması önemli bir yer tutmaktadır.

Çalışmanın hedefleri şunlardır:

1. Sakarya Üniversitesi Esentepe Kampüsü’ndeki net su tüketimini belirlemek (örneğin, binalar ve öğrenci nüfusu üzerinden).
2. Kampüs genelinde su ayak izi kavramının nasıl uygulanabileceğini araştırmak.
3. Su ayak izini oluşturan temel bileşenler olan su, enerji ve atık tüketimini esas alarak su ayak izinin nicel olarak hesaplanmasını sağlamak.

4. Mevcut su yönetimi uygulamalarının etkinliğini değerlendirmek amacıyla, su ayak izi kavramını analitik bir araç olarak incelemek.
5. Yağmur suyu toplama sistemleri gibi net sıfır su alternatiflerini kampüs genelinde entegre ederek su sürdürülebilirliğini artırmaya yönelik stratejiler önermek.
6. Elde edilen sonuçların, su yönetimi konusunda farkındalık yaratma ve anlayışı artırma amacıyla kullanılması.

1.3. Kapsam

Bu çalışma, Türkiye'nin Sakarya ilinde yer alan bir devlet üniversitesi olan Sakarya Üniversitesi'ne odaklanmaktadır. Çalışmanın kapsamı, 2022-2023 yılı boyunca enerji, atık ve doğrudan su kullanımı gibi farklı süreçlerdeki su tüketiminin hesaplanmasını ve öğrenci, enerji ve atık bileşenlerini içeren su ayak izinin belirlenmesini içermektedir. Bu hesaplamalar, su ayak izi kılavuzunda belirtilen yöntemler doğrultusunda gerçekleştirilecektir. Bu yaklaşım, belirli bir akademik ortamda su kullanım uygulamalarının ve net sıfır su stratejilerinin uygulanabilirliğinin derinlemesine analiz edilmesine olanak tanımaktadır. Araştırma ayrıca, optimizasyon alanlarını belirleyerek yağmur suyu hasadı gibi net sıfır su stratejilerinin uygulanmasına yönelik öneriler sunmayı hedeflemektedir. Bu kapsamda, çalışma kampüs ortamında sürdürülebilir su yönetimi uygulamalarına katkı sağlamak amacıyla çok boyutlu bir analiz sunmaktadır.

1.4. Metodoloji

Bu çalışmanın metodolojisi beş aşamadan oluşmaktadır.

Birinci aşama, yukarıda belirtildiği üzere araştırmanın amacı ve kapsamının tanımlanmasını içermektedir. Bu kapsam, çalışmanın Sakarya Üniversitesi Esentepe Kampüsü'nde yürütüldüğünü ifade eder. İkinci aşama, veri toplama sürecini kapsamaktadır. Bu aşamada, kampüste su ve enerji tüketimi ile öğrenci ve çalışan sayılarına ilişkin verilerin toplanması planlanmaktadır. Verilerin, İnsan Kaynakları ve Mali İşler Daire Başkanlıklarından temin edilmesi hedeflenmektedir. Üçüncü aşama, su tüketiminin hesaplanmasını içermektedir. Bu hesaplamaların, güncel literatüre dayalı yöntemler kullanılarak gerçekleştirilmesi amaçlanmaktadır. Dördüncü aşama, çalışmanın ana adımı olan su ayak izinin hesaplanmasını kapsamaktadır. Genellikle su

ayak izinin belirlenmesinde iki yöntem kullanılmaktadır: Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi (YDD) ve Su Ayak İzi Değerlendirmesi. Bu çalışmada, ikinci yöntem tercih edilmiştir. Beşinci ve son aşama, su ayak izi sonuçlarına dayanarak net sıfır su yaklaşımının önerilmesini içermektedir. Bu kapsamda, kampüs genelinde sürdürülebilir su yönetimini desteklemek amacıyla yağmur suyu hasadı sistemlerinin uygulanması planlanmaktadır.

1.5. Hipotez

Araştırma, sürdürülebilir su yönetimine çeşitli yönlerden katkı sağlamayı amaçlamaktadır:

1. Su ayak izinin hesaplanması, üniversitenin su tüketim kalıpları hakkında değerli bilgiler sunar. Bu veriler, stratejik karar alma süreçlerine rehberlik edebilir; üniversitenin yüksek etki alanlarını belirlemesine ve su tasarrufu önlemlerine öncelik vermesine olanak tanır.
2. Su ayak izi analizleri, kampüsün su kullanım düzeyini endüstri standartları ve kalite uygulamalarıyla karşılaştırma imkânı sunarak kıyaslama (benchmarking) olanağı sağlar. Bu yöntem, kampüsün güçlü yönlerini ve iyileştirme gerektiren alanları ortaya koyar.
3. Yağmur suyu hasadı ve verimli su kullanımı gibi sürdürülebilir su uygulamalarının benimsenmesi, kampüsün çevresel etkisini önemli ölçüde azaltacaktır. Bu uygulamalar, dış kaynaklardan su teminini azaltmanın yanı sıra su arıtımı ve dağıtımıyla ilişkili enerji tüketiminin de düşürülmesini sağlar.
4. Yağmur suyu hasadı yoluyla su kaynaklarının çeşitlendirilmesi, üniversitenin su kıtlığı ve dış su kaynaklarında yaşanabilecek kesintiler karşısında daha dirençli olmasına katkı sağlar. Bu durum, kuraklık veya su kıtlığı koşullarında kampüs faaliyetlerinin sürdürülebilirliğini artırır.

1.6. Çalışmanın Yeniliği

Sakarya Üniversitesi'nin su ayak izinin değerlendirilmesine veya bu ayak izini azaltmaya yönelik sürdürülebilir çözümler önerilmesine ilişkin daha önce herhangi bir araştırma bulunmamaktadır. Bu çalışma, Sakarya Üniversitesi kampüsündeki su tüketiminin değerlendirilmesi ve yağmur suyu hasadı uygulamasının net sıfır su

kullanım stratejisi olarak önerilmesini konu alarak, yerel çevre koruma ile akıllı su yönetimi uygulamalarının yenilikçi bir bileşimini sunmaktadır. Araştırma, Sakarya bölgesine özgü iklimsel ve çevresel koşullara odaklanmasıyla öne çıkmakta ve bölgesel sürdürülebilirlik çabalarına yönelik bir yol haritası sağlamaktadır. Yağmur suyu hasadının net sıfır su hedefine ulaşma sürecine entegrasyonu, yalnızca üniversitenin karşılaştığı özgün su yönetimi sorunlarını ele almakla kalmayıp, aynı zamanda daha geniş ölçeklerde uygulanabilir, ölçeklenebilir ve pratik bir çözüm olarak da değerlendirilmektedir.

1.7. Su Kaynağına Genel Bakış

Suyun yaşam için hayati bir öneme sahip olup olmadığı ya da diğer sıvıların farklı gezegenlerde benzer işlevleri yerine getirip getiremeyeceği sorusu, yeni bir tartışma konusu değildir. On yedinci yüzyılın sonlarında, Hollandalı bilim insanı Christiaan Huygens bu konuyu ele almış ve bu alandaki öncül fikirlerden etkilenmiştir. Huygens, Johannes Kepler, John Wilkins ve Cyrano de Bergerac gibi önemli düşünürlerin Ay'daki yaşamla ilgili teorilerinden ilham almıştır.

1. Huygens, ölümünden sonra 1698 yılında yayımlanan Cosmotheoros adlı eserinde konuya pragmatik bir yaklaşım sergilemiştir. Bu çalışmasında, Kopernik'in Dünya'nın Güneş etrafında dönen bir gezegen olduğu anlayışından yola çıkarak, diğer gezegenlerin de kendilerine özgü fiziksel özelliklere, çevresel koşullara ve hatta Dünya'dakilere benzer yaşam formlarına sahip olabileceğini ileri sürmüştür.
2. Bu görüş, Galileo döneminden itibaren Jüpiter ve Satürn'ün uydularının keşfiyle birlikte, evrende farklı gezegen ortamlarının varlığına olan inancı güçlendirmiştir. Günümüz perspektifinden bakıldığında, Huygens'in çalışması, dünya dışı yaşam olasılığına ilişkin yenilikçi ve ileri görüşlü bir bakış açısını temsil etmektedir.
3. Huygens, diğer gezegenlerdeki bitki ve hayvan yaşamının evrimi ve devamlılığının, sıvı bir maddenin varlığıyla mümkün olabileceğini öne sürmüştür. Jüpiter'de gözlemlenen koyu lekelerin yoğun su buharı olabileceğini belirtmiş; ancak bu gezegenlerdeki "suyun", değişen çevresel koşullar nedeniyle Dünya'dakinden farklı özellikler taşıyabileceğini de ifade etmiştir. Huygens'e göre, her gezegenin sıvı bileşimi, kendi özgün sıcaklık

koşullarından etkilenmektedir. Bu bağlamda, su dışındaki alternatif çözücülerin de, başka gezegenlerde suyun yaşamsal işlevlerini üstlenebileceği ihtimali üzerinde durmuştur.

4. Lawrence Henderson, 1913 tarihli *The Fitness of the Environment* (Çevrenin Uygunluğu) adlı eserinde, sıvı suyun yaşam için vazgeçilmez olduğunu kabul etmiş ve suyun moleküler yapısından kaynaklanan benzersiz özelliklerinin neden yaşamın temeli olmaya bu denli uygun olduğunu sorgulamıştır. Henderson, bu soruya doğrudan bir yanıt vermemiş; teleolojik ya da dini gerekçelere başvurmadan kaçınmıştır. Ancak yaptığı sorgulamalar, başka hiçbir sıvının yaşamın oluşumu ve evrimi için aynı işlevi yerine getiremeyeceği varsayımını ima etmektedir. Bu tartışmalar, hidrojen bağının keşfinden önce yapılmış olup, suyun hem moleküler hem de makroskobik düzeyde kozmik bağlamdaki önemine işaret etmektedir(Simpson, 1914).
5. Günümüzde sentetik biyoloji alanındaki gelişmeler ve alternatif biyokimya araştırmaları, Henderson'ın suyun yaşam için temel olduğu yönündeki görüşünü yeniden değerlendirme olanağı sunmaktadır. Ancak şu anda bu konu, deneysel doğrulamanın eksikliği nedeniyle hâlâ spekülatif bir aşamadadır (Bains et al., 2024).Bu alandaki görüşler iki ana grupta toplanmaktadır: Bir grup, yaşamın oluşumu için suya alternatif çözücüler önermekte; diğer grup ise bilinen tüm yaşam formları açısından suyun vazgeçilmez olduğunu savunmaktadır. Bu görüş ayrımının ötesine geçmek, suyun Dünya'daki yaşamı destekleyen eşsiz işlevlerini daha ayrıntılı biçimde anlamayı gerektirmektedir(Ball, 2012).
6. Sıvı su (H_2O), yaşam için en uygun çözücü olarak kabul edilmektedir. Bu durum, suyun makromoleküler yapıları ve biyokimyasal süreçleri destekleyen benzersiz fiziksel ve kimyasal özelliklerinden kaynaklanmaktadır. Gazlar veya katılarla karşılaştırıldığında, sıvı bir ortam, kimyasal bağların stabilitesini koruyarak belirli bağların çözülmesine imkân tanır; bu da kimyasal dönüşümler ve enerji aktarım süreçlerini mümkün kılar.

Sıvı faz, hücresel organizasyon için kritik öneme sahip olan sınır yüzeylerinin (örneğin, veziküller) oluşumuna katkı sağlar. Su, büyük biyomoleküllerin yapısal bütünlüğünü koruyarak işlevsel kalmalarını destekler. Ayrıca, çözünmüş iyonların

(örneğin tuzlar) taşınabilirliğini sağlayarak hücrelerin yaşamsal işlevlerini sürdürebilmesi için gerekli kimyasal dengeyi oluşturur.

Suyun özgül ağırlığı ve yoğunluğu, hücre zarlarından madde taşınımını kolaylaştırır. Bunun yanı sıra, suyun yüksek ısı kapasitesi ve geniş faz kararlılığı, sıcaklık ve basınç değişiklikleri karşısında biyolojik sistemleri ani çevresel dalgalanmalardan korur. Sonuç olarak, suyun biyolojik işlevlerini tam anlamıyla yerine getirebilmesi için bulunduğu çevresel koşullara uygunluğu büyük önem taşımaktadır (Westall & Brack, 2018).

H₂O olarak adlandırılan su, bitkiler ve hayvanlar da dâhil olmak üzere tüm canlıların hayatta kalması için hayati bir rol oynamaktadır. Suyun bu denli yaşamsal olmasının temelinde, onu benzersiz kılan birtakım fiziksel ve kimyasal özellikler yatmaktadır. Örneğin, su geniş bir sıcaklık aralığında sıvı halde kalabilme yeteneğine sahiptir. Bu özellik, farklı iklim koşullarında bile biyolojik süreçlerin sürdürülebilmesine olanak tanır. Suyun yüksek özgül ısı kapasitesi, ısıнын depolanmasını sağlar; bu da çevresel sıcaklık değişimlerine karşı canlı organizmaların korunmasına yardımcı olur. Su, yüzey gerilimi yüksek olan bir sıvıdır; bu özellik, bazı küçük organizmaların su yüzeyinde hareket edebilmesini sağlar ve aynı zamanda damlacık oluşumu gibi süreçlerde etkilidir. Ayrıca, su çözünür mineralleri ve iyonları taşıma kapasitesiyle hücre içi ve hücre dışı dengenin korunmasına katkıda bulunur. Su molekülleri arasındaki hidrojen bağları, kohezif bir yapı oluşturarak diğer önemli biyomoleküllerle etkileşimi destekler. Bu etkileşimler, yaşamın temel yapı taşlarının—örneğin proteinlerin, nükleik asitlerin ve hücresel zarların—oluşumunu ve stabilitesini sağlamada kritik rol oynar.(Westall & Brack, 2018)

Hidrolojik döngü, suyun atmosfer, kara, okyanuslar ve canlılar arasında sürekli olarak dolaşmasını sağlayan doğal bir süreçtir. Bu döngü, Güneş'in enerjisiyle başlar. Güneş, okyanuslar, göller ve nehirler gibi su kütlelerini ısıtarak buharlaşmayı teşvik eder; böylece su sıvı halden gaz haline geçerek atmosfere yükselir. Aynı zamanda bitkiler de terleme (transpirasyon) yoluyla atmosfere su buharı salar. Bu iki süreç birlikte evapotranspirasyon olarak adlandırılır. Atmosfere ulaşan su buharı, sıcaklık düştükçe yoğunlaşarak bulutları oluşturur. Su buharı belirli bir yoğunluğa ulaştığında, yağmur, kar, dolu gibi yağış (presipitasyon) biçimlerinde tekrar yeryüzüne döner. Yağışın bir kısmı yüzey akışı yoluyla göllere, nehirlere ve okyanuslara ulaşırken; bir kısmı da infiltrasyon yoluyla toprağa sızarak yer altı su rezervleri olan akiferleri besler.

Bu döngü, sadece doğal su kaynaklarının devamlılığını sağlamakla kalmaz, aynı zamanda ekosistemleri destekler, tarımsal üretimi mümkün kılar ve insanların günlük yaşamlarını sürdürmelerine olanak tanır. Hidrolojik döngü, iklim düzenlemelerinden tatlı su kaynaklarının yenilenmesine kadar birçok hayati süreçte merkezi bir rol oynar (Pagano & Sorooshian, 2002).



Şekil 1.1. Su döngüsü süreci.

1.8. Su Ayak İzi ve Türleri

“Su ayak izi” kavramı, 2000’li yılların başlarından itibaren çevresel sürdürülebilirlik alanında dikkat çeken bir değerlendirme aracı olarak literatürde yer edinmiştir. Bu kavram, bir ürün ya da hizmetin üretimi süresince doğrudan ve dolaylı olarak ne kadar tatlı su kullanıldığını ve bu süreçte ne düzeyde su kirliliği meydana geldiğini nicel olarak ölçmeyi amaçlayan bütüncül bir göstergedir. Su ayak izi fikri, Hollanda’daki Twente Üniversitesi’nde su yönetimi alanında çalışmalar yürüten Prof. Dr. Arjen Hoekstra tarafından geliştirilmiş olup, 2004 yılında yayımladığı ve alanın gelişiminde önemli bir dönüm noktası kabul edilen “The Water Footprint of Food” başlıklı çalışmasında, insan faaliyetlerinin özellikle su kullanımı açısından çevresel etkilerinin değerlendirilmesine yönelik kapsamlı bir yaklaşım sunmuştur (Jackson et al., 2015). Bu yaklaşım, yalnızca bireysel su tüketimini değil; tarım, sanayi ve tedarik zincirleri gibi dolaylı su kullanımını da dikkate alarak suyun küresel düzeydeki dolaşımını ve

sürdürülebilirliğini analiz etmeyi mümkün kılmaktadır. Su ayak izi değerlendirmesi, suyun yalnızca fiziksel olarak tüketilmesini değil, aynı zamanda süreçler sırasında kalite açısından uğradığı bozulmaları yani kirlilik etkilerini de kapsamaktadır (Aldaya et al., 2012). Bu sayede, bir ürünün çevresel etkileri hem su miktarı hem de ekosistem işlevleri üzerindeki potansiyel etkiler bakımından değerlendirilebilmektedir. Su ayak izi, yalnızca miktara dayalı bir gösterge değil; aynı zamanda coğrafi olarak izlenebilir, zamana duyarlı ve mekânsal farklılıkları dikkate alan analitik bir çerçevedir (Hoekstra et al., 2009). Bu yönüyle, bir ürünün üretiminde su kaynaklarının hangi bölgelerde, nasıl ve ne ölçüde kullanıldığını açık biçimde ortaya koyarak, su kullanım baskılarının bölgesel dağılımını analiz etme olanağı sunar. Ayrıca, su ayak izi kavramı, yalnızca sanal su kavramıyla açıklanamayacak olan mekânsal ve zamansal bağlamı da göz önünde bulundurarak; suyun ne zaman, nerede ve hangi nitelikte (yeşil, mavi veya gri) kullanıldığını analiz edebilme yetisiyle daha kapsamlı bir değerlendirme sunmaktadır (Mekonnen & Hoekstra, 2011). Bu bağlamda, her üretim aşamasında gerçekleşen su tüketimi ve kirliliğini detaylı bir şekilde ortaya koyarak, ürünün çevresel etkilerini izleyen bir analiz aracı olarak işlev görmektedir. Günümüzde, su ayak izi çerçevesi, tedarik zincirleri boyunca farklı coğrafi bölgelerde ve çeşitli zaman dilimlerinde gerçekleşen su kullanımının izlenebilmesi amacıyla kapsamlı bir değerlendirme aracı hâline gelmiştir. Yaşam döngüsü değerlendirmesi (YDD) ile girdi-çıktı analizinin entegrasyonu, hem üretim hem de tüketim zincirlerinde su kullanımının daha ayrıntılı biçimde değerlendirilmesini sağlamaktadır. Buna ek olarak, coğrafi bilgi sistemleri (CBS) ile su ayak izi modellerinin entegrasyonu, su kullanım noktalarının belirlenmesinde ve su kıtlığının mekânsal-zamansal etkilerinin analizinde önemli bir rol oynamaktadır. Son olarak, makine öğrenmesi ve yapay zekâ teknikleri, su kullanım tahminlerinin doğruluğunu artırmakta ve su talebinin gerçek zamanlı yönetimine katkı sunmaktadır (Li & Chen, 2014).

1.8.1. Türleri mavi, yeşil ve gri

Mavi su ayak izi, tatlı su kaynaklarının (yüzey suyu ve yeraltı suyu) tüketimini nicel olarak ölçen bir göstergedir. Bu kapsam, suyun buharlaşma yoluyla kaybedilmesi, bitkiler tarafından emilerek metabolik süreçlerde kullanılması veya üretim sürecinde başka bir bölgeye taşınması gibi, yeniden kullanım için aynı yerde veya zaman diliminde hemen erişilemeyen su miktarını içerir. Mavi su ayak izi, özellikle sulama, sanayi üretimi ve enerji üretimi gibi alanlarda doğrudan tatlı su tüketiminin çevresel

etkilerini değerlendirmek amacıyla kullanılır(Chapagain & Hoekstra, 2007; Hoekstra et al., 2009).

Tüketim amaçlı su kullanımı, genellikle buharlaşarak atmosfere karışan ve doğrudan geri kazanılamayan su miktarını ifade eder. Bu kullanım biçimi, çoğunlukla toplam su tüketimi kapsamında değerlendirilir. Ancak burada önemli bir ayrım vardır: "Tüketim" ifadesi, suyun tamamen yok olduğu anlamına gelmez; su, hidrolojik döngü içinde hareket etmeye devam eder. Su fiziksel olarak yer değiştirebilir ve form değiştirebilir; ancak biz onu sadece belirli yerlerde ve zamanlarda kullanılabılır hâlde bulabiliriz. Bu bağlamda, mavi su ayak izi, ne kadar yüzey ve yer altı suyunun kullanıldığını ve bu suyun doğal döngüye kısa vadede geri dönmediğini nicel olarak ortaya koyar. Bu gösterge, insanların mevcut tatlı su kaynaklarını ne ölçüde tükettiğini anlamaya yardımcı olurken; aynı zamanda bu kaynakların ekosistemler, özellikle nehirler, yer altı suları ve bu kaynaklara bağımlı bitki ve hayvanlar için ne denli kritik olduğunu da vurgular(Hoekstra et al., 2009).

Mavi Su Ayak izi

$$\begin{aligned} &= \text{buharlaşan mavi su} + \text{dahil edilen mavi su} \\ &+ \text{kaybolan geri dönüş akışı} \end{aligned}$$

Mavi su ayak izi, şu üç bileşenin toplamı olarak hesaplanır: buharlaşan mavi su, dahil edilen mavi su ve kaybolan geri dönüş akışı. Bu formülde yer alan "kaybolan geri dönüş akışı", suyun çekildikten sonra tamamen sisteme dönmemesini ifade eder. Bu, çekilen suyun başka bir havzaya veya denize yönelmesi ya da uzun vadede geri dönse bile aynı coğrafi bölgede ve zaman diliminde tekrar kullanılamaması durumunu kapsamaktadır.

Yeşil su ayak izi, bitkiler ve tarımsal faaliyetler tarafından ne kadar yağmur suyunun kullanıldığını belirlemeye yardımcı olur. Toprağı emilen ve yüzey akışı oluşturmada doğrudan bitkiler tarafından kullanılan yağmur suyunu ifade eder. Bu su, buharlaşma yoluyla atmosfere karışabilir veya bitkiler tarafından transpirasyon yoluyla salınabilir. Yeşil su ayak izi, özellikle tarımsal üretimde ürünlerin gerçek su ihtiyacını belirlemede kritik bir rol oynar. Bitkilerin gerçekte ne kadar yağmur suyu kullandığını hesaba katarak, mahsuller, ağaçlar ve diğer tarımsal ürünlerin yetişmesi için gereken toplam yeşil su miktarını ortaya koyar. Ancak bu kaynak, her zaman tüm bölgelerde yeterli değildir ve iklim koşullarına bağılı olarak hızla kaybedilebilir(Aldaya et al., 2012).

Yeşil su ayak izi şöyle açıklanabilir

$$Su\ Ayak\ izi\ (yeşil) = yeşil\ su\ buharlaşması + Dahil\ edilen\ yeşil\ su$$

Gri su ayak izi, bir süreç sırasında ortaya çıkan kirliliği seyrelterek çevresel olarak güvenli seviyelere düşürmek için ihtiyaç duyulan tatlı su miktarını nicel olarak ifade eden bir göstergedir. Başka bir deyişle, kirli atık suyun alıcı ortama (örneğin bir nehir ya da göl) deşarj edilmeden önce, kalite standartlarını karşılayacak düzeye getirilebilmesi için ne kadar temiz suyla seyreltilmesi gerektiğini hesaplar. Gri su ayak izi, genellikle belirli bir kirletici madde (örneğin azot, fosfor ya da kimyasal oksijen ihtiyacı – KOİ) için hesaplanır ve kirleticinin konsantrasyonu, mevcut çevresel standartlar ve alıcı ortamın taşıma kapasitesi dikkate alınarak belirlenir. Bu gösterge, su kalitesi üzerindeki baskıyı anlamak ve sürdürülebilir su yönetimi stratejileri geliştirmek açısından kritik öneme sahiptir (Hoekstra, 2011).

Gri su ayak izi, kütle/zaman kirletici yükü (L) ile çevresel su kalitesi standardı (C_{max}), kütle/hacim cinsinden maksimum kabul edilebilir konsantrasyonu temsil eden ve alıcı su kütlesindeki kirletici doğal konsantrasyonu (C_{nat}) arasındaki farkın bölünmesiyle hesaplanır; bu da kütle/hacim cinsinden ölçülür.

$$Gri\ su\ Ayak\ izi = \frac{L}{C_{max} - C_{nat}}$$

Bir su kütlesindeki doğal konsantrasyon, insan müdahalesi olmayan koşulları gösteren, C_{nat} olarak adlandırılır. İnsan yapımı ve doğal sularda bulunmayan maddeler için C_{nat}'ın 0 olduğu varsayılır. Doğal konsantrasyonlar hakkında kesin veriler eksik olduğunda, bir basitleştirme C_{nat}'ı 0 olarak belirler, bu da gerçek C_{nat} sıfırdan farklıysa gri su ayak izinin düşük tahmin edilmesine neden olabilir (Hoekstra, 2011)

1.8.2. Doğrudan ve dolaylı su ayak izi

Doğrudan su ayak izi, tüketicilerin evlerinde veya bahçelerinde gerçekleştirdiği faaliyetler sonucunda suyun tüketilmesi veya kirletilmesini ifade eder. Bu, örneğin banyo yapmak, bulaşık yıkamak, araba temizlemek ya da bahçe sulamak gibi günlük su kullanımını kapsar. Buna karşılık, dolaylı su ayak izi, tüketicilerin satın aldığı mal ve hizmetlerin üretiminde dolaylı olarak kullanılan su miktarına atıfta bulunur. Bu tür su kullanımı, gıda, giysi, kâğıt, enerji ve sanayi ürünlerinin üretim süreçlerinde kullanılan suyu içerir. Dolaylı su ayak izi, genellikle bireyin toplam su ayak izinin çok

daha büyük bir bölümünü oluşturur ve tedarik zinciri boyunca meydana gelen gizli (sanal) su kullanımı hakkında önemli bilgiler sunar.(Hoekstra, 2011).

1.8.3. Sanayilerin su ayak izi

Şu anda Çin'deki demir-çelik endüstrisi üzerine, tatlı su tüketimi veya toplam su tüketimi gibi geleneksel göstergelere dayanmak yerine, sektörün gri ve mavi su ayak izi analizine odaklanan bir çalışma yürütülmektedir. Çalışma aynı zamanda risk ve belirsizlik değerlendirmesini de içermektedir. Endüstrinin su tüketimini temsil eden mavi su ayak izi, 22,4 milyon metreküp ($2,24 \times 10^7 \text{ m}^3$) olarak ölçülmüştür. Buna karşılık, gri su ayak izi 650 milyon metreküp ($6,5 \times 10^8 \text{ m}^3$) olarak kaydedilmiştir. Ayrıca, yapılan enerji analizi, enerji amaçlı su tüketiminin 22,5 milyon metreküpe ($2,25 \times 10^7 \text{ m}^3$) ulaştığını ve doğrudan su tüketimini geçtiğini ortaya koymaktadır. Çin'deki demir-çelik endüstrisi, toplam su ayak izine yaklaşık %0,4 oranında katkıda bulunmaktadır. Gri su ayak izi kapsamında, şirketlerin yasal düzenlemelere uymalarına rağmen, deşarj edilen suda bulunan kimyasalların Deniz Suyu Kalite Standardını karşılamadığı tespit edilmiştir. Bu durum, şirketlerin su arıtma verimliliğini artırmaları gerektiğine işaret etmektedir (Gu et al., 2015).

Çin'deki süt endüstrisinin tedarik zincirini inceleyen bir diğer çalışma, su ayak izini başarıyla ölçmüş ve hem su miktarı hem de kalitesiyle ilişkili çevresel etkilerin kapsamlı bir değerlendirmesini gerçekleştirmiştir. Ayrıca, ISO 14046 standardında özetlenen eşdeğer dönüşüm ilkeleriyle uyumlu ulusal bir standardın geliştirilmesine yönelik proaktif destek sağlanmıştır.

Bulgular, su tüketiminin büyük ölçüde dolaylı su ayak izinden, özellikle de toplam su ayak izinin %92'sinden fazlasını oluşturan yem bitkisi yetiştiriciliğinden kaynaklandığını ortaya koymaktadır. Bu durum, dolaylı su kıtlığı ayak izinin, doğrudan su kıtlığı ayak izinden çok daha büyük olduğunu göstermektedir. Bununla birlikte, farklı üretim süreçleri çeşitli çevresel etki kategorilerine farklı düzeylerde katkı sağlamaktadır. İnek çiftçiliği, çevresel su kıtlığı üzerinde önemli bir etkiye sahipken, süt işleme süreci, su bozunma ayak izine en fazla katkıda bulunan aşama olarak öne çıkmaktadır. Azot kirleticileri, özellikle amonyak azotu ($\text{NH}_3\text{-N}$), toplam fosfor (TP) ve toplam azot (TN)—, kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ) (yaklaşık %6,22–16,17) gibi organik kirleticilere kıyasla, su bozunma ayak izinin %56,25–71,45 gibi daha büyük bir kısmını oluşturmaktadır. Süt endüstrisinin tedarik zinciri boyunca su

ayak izinin azaltılması; her üretim aşamasında su verimliliğinin artırılması, atıksu arıtma kapasitesinin geliştirilmesi, toplam su ayak izinin düşürülmesi ve nehir havzası ölçeğinde su sürdürülebilirliğinin dikkate alınmasıyla mümkün olabilmektedir.(Bai et al., 2018).

Oyun endüstrisine yönelik dikkat çekici bir diğer çalışma, belirli bir hizmet sektörünün su ayak izini değerlendirmek amacıyla hibrit bir yaklaşım kullanmaktadır. Bu araştırma, sektörde sürdürülebilirliği sağlamak için gereken doğrudan ve dolaylı su tüketimini ve bu tüketimin sürdürülebilir sonuçlarını niceliksel olarak belirlemektedir. Elde edilen sonuçlar, Makao'daki oyun endüstrisi için doğrudan su ayak izinin 3,04 milyon metreküp ($3,04 \times 10^6 \text{ m}^3$), dolaylı veya hesaplanan su ayak izinin ise yaklaşık 345 milyon metreküp ($3,45 \times 10^8 \text{ m}^3$) olduğunu göstermiştir. Özellikle doğrudan su kullanımı, sektörün toplam gerçek su talebinin %1'inden daha azını oluşturmaktadır. Ek olarak, enerji tüketiminin Makao'daki toplam elektrik kullanımının %40'ını oluşturduğu belirtilmektedir. Oyun endüstrisi, doğrudan görünmese bile önemli miktarda su tüketmektedir. Daha az su kullanımını teşvik etmek önemlidir; ancak bu zordur çünkü sektör, su kullanan diğer işletmelere bağımlıdır. Ayrıca, oyun endüstrisinin büyüme eğiliminde olması, gelecekte daha fazla su kullanımına yol açabileceğini göstermektedir. Bu bağlamda, sektöre yönelik strateji geliştiren paydaşlar, daha verimli su tasarrufu teknolojileriyle üretilmiş ürünlerin kullanımını teşvik etmeyi düşünebilirler. Ayrıca, toplumsal farkındalığı artırmak amacıyla su tasarrufu sağlayan davranışları ödüllendiren teşvik mekanizmalarının uygulanması da etkili olabilir (Li & Chen, 2014).

İran'da çimento endüstrisi üzerine yapılan bir diğer çalışma, ulaşım, enerji tüketim türü ve insan etkilerini esas alarak sistem sınırı analizi yoluyla çimento üretimine yönelik bir su ayak izi modeli önermekte ve su tüketimi sorununa çözüm arayışları sunmaktadır. Elde edilen sonuçlar, çimento fabrikasının doğrudan su ayak izinin 297.000 m³, sanal su ayak izinin ise 3.317 milyon m³ olduğunu ve bu değerin doğrudan su ayak izinin yaklaşık 11 katı olduğunu göstermektedir. Elektrik (320.000 m³), ağır fuel yağı (980.000 m³) ve doğalgaz (1.452.000 m³), çimento fabrikasının sanal su tüketimine sırasıyla %10, %30 ve %43 oranlarında katkıda bulunmaktadır. Enerji kaynaklarının sanal su tüketimi, doğrudan su tüketimine kıyasla 9,3 kat daha fazla katkı sağlamaktadır. Ayrıca, personelin beslenme ihtiyaçları da sanal su tüketiminin %17'sini oluşturmaktadır. Su tüketimi sorununa çözüm olarak, rüzgar ve güneş enerjisi

gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımının artırılması, toplam su tüketiminin azaltılmasına katkı sağlayabilir(Hosseinian & Nezamoleslami, 2018).

Bangladeş'te yapılan bir araştırma, tekstil endüstrisinin su bulunabilirliği üzerindeki etkilerini incelemiştir. Araştırmacılar; pamuğun taşınması, ipliğe ve kumaşa dönüştürülmesi, kirli su üretimi, sektörde çalışan kişi sayısı ve 2012–2016 yılları arasındaki kirlilik düzeyleri gibi unsurları dikkate alarak, endüstrinin büyümesine katkı sağlarken daha az su kullanmanın yollarını belirlemeye çalışmışlardır. 2012 yılında pamuk tarımı yaklaşık 5,98 milyar metreküp yağmur suyu ve 10,21 milyar metreküp diğer su kaynaklarını tüketmiştir. 2016 yılına gelindiğinde ise yağmur suyu kullanımı 10,87 milyar metreküpe çıkarken, diğer su miktarı 7,65 milyar metreküpe düşmüştür. Pamuk yetiştiriciliği aşamasındaki gri su ayak izi, 2012 yılında 3.695 litre, 2016 yılında ise 3.705 litre olarak ölçülmüştür. Örme ve dokuma ürünlerinin taşınmasıyla ilişkili su ayak izi ise sırasıyla 79.988 metreküp ve 65.461 milyon metreküpe ulaşmıştır. 2016 yılında tekstil sektörüne ait toplam yeşil, mavi ve gri su ayak izleri, sırasıyla 0,87 milyar m³, 7,88 milyar m³ ve 8,81 milyar m³ olarak hesaplanmıştır. Özellikle giyim üretimindeki toplam su ayak izinin %91'i, büyük ölçüde dış su ayak izi olarak pamuk yetiştiriciliğinden kaynaklanmaktadır. Giyim ürünlerine ait toplam su ayak izi 27,56 milyar metreküp olarak belirlenmiştir. Ancak uygun su arıtma ve yeniden kullanım tesislerinin uygulanması durumunda, gri su ayak izi yaklaşık 1,26 milyar metreküpe düşürülebilir.(Hossain, 2020)

1.8.4. Enerji ve gıda sektörü için su ayak izi

Çin'de yakın zamanda yapılan bir çalışma, su ayak izi modellemesinden, su kaynakları üzerindeki stresi hafifletmeye yönelik girişimlere kadar uzanan kapsamlı bir değerlendirme ile enerji sektörünün su ayak izini hesaplamayı amaçlamıştır. Çalışmada, enerji kaynakları iki gruba ayrılmıştır: Birinci grupta ham petrol, doğal gaz ve kömür; ikinci grupta ise rüzgar, nükleer, termik, güneş ve hidroelektrik enerji yer almaktadır. Bulgular, birinci grup için toplam su ayak izlerinin sırasıyla 0,19 m³/GJ (kömür), 0,28 m³/GJ (ham petrol) ve 0,11 m³/GJ (doğal gaz) olduğunu göstermektedir. Buna karşılık, ikinci grup kaynaklar için bu değerler sırasıyla 0,14 m³/GJ (rüzgar), 0,19 m³/GJ (nükleer), 1,19 m³/GJ (termik), 5,3 m³/GJ (güneş) ve 6,75 m³/GJ (hidroelektrik) olarak belirlenmiştir. Doğal gaz, en düşük su ayak izine; hidroelektrik enerji ise en yüksek su ayak izine sahiptir. Bulgulara göre, birinci gruptaki enerji kaynaklarında çıkarma aşaması, yaşam döngüsü boyunca toplam su kullanımının

büyük bir bölümünden sorumludur. Buna karşın, ikinci grupta yukarı akış aşamaları, çıkarma aşamasına göre daha fazla su kullanımına neden olmaktadır. Çalışma, bazı ulusal istatistiklerin yetersizliği nedeniyle endüstri raporlarından elde edilen verilere dayanmaktadır. Su kaynakları üzerindeki baskının azaltılması amacıyla, su tasarrufu sağlayan teknolojilerin benimsenmesi ve gelecekteki uygulamalarda madencilik ekipmanlarının geliştirilmesi önerilmektedir(Ding et al., 2018).

İtalya’da, su kaynaklarının sürdürülebilir yönetimi ile ilişkili ekonomik-su-enerji bağı çerçevesinde, elektrik üretiminin su ayak izini analiz etmeye yönelik bir çalışma yürütülmüştür. Bu çalışmanın amacı, su ayak izi ve ekonomik su verimliliği yaklaşımlarını kullanarak elektrik üretimini değerlendirmektir. Fosil ve yenilenebilir enerji kaynaklarının elektrik üretimine katkıları incelendikten sonra, fosil yakıtların, toplam su ayak izi tüketiminin yaklaşık %85’ini tutarlı biçimde oluşturduğu tespit edilmiştir. Çalışma, izlenen her yıl için İtalya’nın elektrik üretiminin su ayak izi tüketimine olan katkılarını karşılaştırmalı olarak analiz etmeye devam etmektedir. Ayrıca, 2007–2016 yılları arasında İtalya’da elektrik üretiminde kullanılan enerji kaynaklarına ilişkin su ayak izi değerlendirilirken, yenilenebilir ve fosil yakıt kaynakları arasında ayırım yapılmıştır. Bu çalışma, enerji sektöründe politika ve yönetim kararlarını destekleyebilecek içgörüler sunarak benzersiz bir katkı sağlamaktadır. Bu bağlamda, karar alma süreçleri ve stratejik planlama için pratik bir rehber niteliği taşımaktadır(Miglietta et al., 2018).

Son zamanlarda yapılan bir çalışmada, Tayland'da enerji üretimi ve tedarikiyle ilişkili su ayak izi incelenmiştir. Bu araştırma, üretim ve tedarikte kullanılan enerjinin hesaplanmasını ve aşağıdan yukarıya bir yaklaşım kullanılarak standart su ayak izi analizi yoluyla su ve enerji yönetiminin uygulanmasını vurgulamaktadır. Bulgular, enerji üretimi için su ayak izinin 5.130 milyon m³ olduğunu ve bunun 1986 yılına kıyasla %65'lik bir artışı temsil ettiğini ortaya koymaktadır. Öte yandan, enerji tedariki için su ayak izi 1986'ya göre 7,6 kat artarak 6.927 milyon m³'e ulaşmıştır. Bu artışın temel itici gücünün, Tayland'ın dış kaynaklara bağımlılığını azaltmada ve güvenilir enerji tedarikini sağlamada önemli bir rol oynayan biyoenerji olduğu belirtilmektedir. Çalışma, yerel su kaynakları üzerindeki etkinin, su açısından verimli enerji üretim sistemlerinin benimsenmesi, su tasarrufu sağlayan enerji ithalatı uygulamalarının iyileştirilmesi, daha iyi su kaynağı geliştirme stratejilerinin

uygulanması ve verimli bir su dağıtım ağı kurulması yoluyla azaltılabileceğini önermektedir(Okadera et al., 2014).

Çin'de yürütülen kapsamlı bir çalışma, kentsel ve kırsal perspektifler, kişi başına su ayak izi, su ayak izi bileşimi ve gıda tüketim kalıpları dahil olmak üzere çeşitli faktörleri göz önünde bulundurarak, gıda tüketimiyle bağlantılı su ayak izini incelemiştir. Araştırma, 2001–2016 yılları arasında Çin'deki sakinlerin toplam 9.681,86 milyar metreküp gıda tükettiğini ve bunun sonucunda yıllık ortalama 605,12 milyar metreküp su ayak izine yol açtığını ortaya koymuştur. Su ayak izi bileşiminin analizine göre, yeşil su ayak izi %69,36 ile en büyük paya sahiptir; bunu gri su ayak izi (%18,71) ve mavi su ayak izi (%11,93) takip etmektedir. Gıda tüketim yapısı incelendiğinde, özellikle tahıllar ile et ürünleri (özellikle domuz, sığır ve koyun eti) toplam su ayak izine önemli düzeyde katkı sağlamış; tahıllar %37,5, et ürünleri ise %22,56 oranında pay almıştır. Çalışma, hem kentsel hem de kırsal alanlarda su yönetimi ve dağıtımına yönelik pratik stratejiler sunmakta; su ayak izini en aza indirmek amacıyla tarımsal teknolojilerin geliştirilmesi gerektiğinin altını çizmektedir. Ayrıca, tahıllara ve ete olan bağımlılığın azaltılması yoluyla gıda tüketim modellerinin optimize edilmesi, daha sürdürülebilir su yönetimi uygulamalarının teşvik edilmesi açısından önemli bir fırsat olarak değerlendirilmektedir(Zhang et al., 2019).

1.8.5. Kampüsün su ayak izi

Üniversitelerde su ayak izi değerlendirmelerinin benimsenmesi, bu kurumların su kullanım düzeylerinin farkına varmasıyla birlikte artış göstermiştir. Yapılan araştırmalar, üniversitelerin su ayak izlerini ölçmelerine olanak tanıyan yöntemler sunarak, yüksek tüketim alanlarının belirlenmesini ve bu alanlara yönelik azaltma stratejilerinin geliştirilmesini sağlamıştır. Örneğin, UNC-Chapel Hill Üniversitesi, geri kazanılmış su sistemlerine yatırım yaparak ve yeşil çatılar ile geçirgen yüzeyler gibi yağmur suyu yönetim tekniklerini uygulayarak su ayak izini azaltmıştır. Bu uygulamalar, özellikle sulama ve bina soğutma gibi içilebilir olmayan kullanımlarda, üniversitenin içme suyuna olan bağımlılığını önemli ölçüde azaltmıştır¹.

UTP Kampüsü'nde su ayak izini değerlendirmek üzere ISO 14046 standartlarına uygun bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Analiz, su kullanımının çevresel etkilerine ve atık su arıtımının dolaylı etkilerine odaklanmıştır. Su kıtlığı göz önüne alındığında, su ayak izi AWARE yöntemi kullanılarak hesaplanmış ve toplam 102.670,3 m³ olarak bulunmuştur. Bu miktarın 13.748 m³'ü (%13,4) doğrudan, 88.922 m³'ü (%86,6) ise

dolaylı etkilere atfedilmiştir. Bireysel su tüketimi 17,8 m³ olarak değerlendirilmiş ve bunun %86,2'si dolaylı faaliyetlerle ilişkilendirilmiştir. Dolaylı faaliyetler, insan sağlığı ve ekosistemler üzerindeki etkilerin %98'inden fazlasından sorumlu tutulmuştur; bu etkilerin büyük kısmı altyapı inşaatı (%95) kaynaklıyken, daha küçük bir oranı elektrik tüketimi (%2) ile ilişkilendirilmiştir. Çalışma, kampüs içindeki su arıtma tesisinin ekolojik yükü %14 oranında azalttığını, ayrıca üçüncül arıtma sisteminin uygulanmasıyla bu yükün %40 oranında daha da hafifletilebileceğini ortaya koymuştur. Bu araştırma, kampüs içi süreçlerin optimize edilmesi ve sürdürülebilir tedarik uygulamalarının teşvik edilmesi için stratejiler geliştirilmesine temel oluşturmakta; dolayısıyla, kurumlarda su yönetiminin iyileştirilmesine katkı sunmaktadır(Osorio-Tejada et al., 2022).

Nepal'deki Katmandu Üniversitesi'nde (KU) yürütülen bir araştırma, kurumun gıda, enerji ve su ayak izlerini değerlendirmeyi amaçlamıştır. Çalışma, bu kaynakların Nepal'in Dhulikhel kentinde yer alan üniversite kampüsündeki etkileşimini analiz etmek üzere kavramsal bir analitik çerçeve oluşturmuştur. Üniversitenin toplam nüfusu 3.091 öğrenci ve 564 personelden oluşmaktadır. Sonuçlar, KU'nun yıllık toplam su ayak izinin 628.375,55 m³ olduğunu ve kişi başına düşen su ayak izinin günlük 513,19 litre olduğunu ortaya koymuştur. Toplam elektrik tüketimi 869.802,70 kilovatsaat olarak hesaplanmış ve bu, yıllık 155.764,80 m³ su ayak izi ile tüm enerji kaynakları arasında en yüksek seviyeyi temsil etmektedir.

Su kullanımına ilişkin analizde, toplam su ayak izinin %65'inin gıdaya (yılda 407.074,12 m³), %10'unun ise doğrudan su tüketimine (yılda 63.432,22 m³) ait olduğu belirlenmiştir. Değerlendirme, gıda atığı, atıksu arıtma tesisinin yetersiz bakımı ve farkındalık eksikliği gibi sürdürülemez su kullanımıyla ilişkili başlıca sorunları vurgulamıştır. Çalışma, bu sorunların giderilmesi amacıyla, gıda atıklarının yenilenebilir enerji üretiminde, özellikle biyogaz (metan) üretiminde değerlendirilmesini önermektedir. Bu yaklaşım, KU'da gıda işlemlerinde kullanılan sıvılaştırılmış petrol gazı (LPG) bağımlılığını azaltma potansiyeline sahiptir ve ton başına yaklaşık 4.165,41 m³ biyogaz üretimi sağlayabilir. Ayrıca, üniversitedeki enerji tüketimiyle bağlantılı su ayak izinin azaltılması amacıyla, alternatif enerji kaynaklarının benimsenmesi önerilmektedir(Vaidya et al., 2021)

Türkiye, İstanbul'daki Avcılar Cerrahpaşa Kampüsü'nde, öğrencilerin yaş ve gelir düzeylerine göre su ayak izlerini belirlemeye yönelik bir araştırma çalışması

gerçekleştirilmiştir. Bu araştırmada kullanılan yöntem, anket ve soru formlarına dayanmaktadır. Bulgular, öğrenciler için kişi başına düşen yıllık su ayak izinin 1.848,78 metreküp olduğunu ortaya koymuştur. Bu değer; 1.329 m³ yeşil, 199 m³ mavi ve 320,78 m³ gri su ayak izleri olmak üzere bileşenlere ayrılmıştır. Su ayak izi ile gelir düzeyleri karşılaştırıldığında, gelirdeki artışın daha yüksek toplam su ayak iziyle ilişkili olduğu belirlenmiştir. En belirgin artışların yeşil ve gri su ayak izlerinde gözlemlendiği, buna karşılık mavi su ayak izinde anlamlı bir artış görülmediği raporlanmıştır. Hem doğrudan hem de dolaylı su tüketiminin, artan gelir seviyeleriyle birlikte yükseldiği tespit edilmiştir. Özellikle, gıda tüketimine bağlı dolaylı su tüketimi, doğrudan su tüketimine göre daha yüksek bir artış göstermiştir. Çalışma, su ayak izi ile yaş değişkeni arasında, artış ya da azalış yönünde tutarlı bir korelasyon saptamamıştır (Özbaş et al., 2021).

Tayland'daki bir kamu üniversitesinde yürütülen bir araştırma, enerji tüketimiyle ilişkili su ayak izini incelemiştir. Çalışma, ulaşım yakıtı ve elektrik üretimi gibi enerji kullanım faktörlerini analiz etmiştir. Bulgular, Ocak–Nisan 2018 döneminde toplam 1.015.022 kWh elektrik tüketildiğini ve bu miktarın üretimi için 263.905,7 litre suya ihtiyaç duyulduğunu göstermektedir. Ayrıca, toplam yakıt tüketimi 80.840 litre olarak belirlenmiş; bunun 24.307 litresi benzine, 2.640 litresi ise dizele atfedilmiştir. Benzin üretimi için 16.039.612 litre, dizel üretimi için ise 1.515.240 litre su kullanıldığı tespit edilmiştir. Özellikle benzin üretimi, genel su tüketimine anlamlı düzeyde katkıda bulunmuştur. Elde edilen bulgular, dolaylı su kullanımının azaltılmasının önemini vurgulamakta olup, çalışmada araçlarda dizel kullanımının en aza indirilmesinin, benzin üretiminin su üzerindeki etkisini azaltmak için etkili bir strateji olabileceği önerilmektedir (Kandananond, 2019).

Konya Teknik Üniversitesi tarafından yürütülen son araştırma, kampüsün su ayak izini ölçmeyi amaçlamıştır. Çalışmada özellikle bireylerin su tüketim alışkanlıkları incelenmiştir. Hem akademik hem de idari personelden oluşan 476 katılımcıya, Su Ayak İzi Ağı anketi uygulanmıştır. Bulgular, kampüsün yıllık toplam su ayak izinin 1.694 metreküp olduğunu ortaya koymuştur. Bu araştırma, birden fazla disiplinden elde edilen içgörülerini birleştirerek mevcut anlayışı derinleştirmekte ve bireysel su ayak izini etkileyen faktörlerin kapsamlı bir analizini sunmaktadır. Ayrıca, kişisel düzeyde sürdürülebilir su uygulamalarını teşvik etmek amacıyla stratejiler önermekte ve

üniversite ortamında bilinçli karar alma ile etkin kaynak yönetimi süreçlerine katkı sağlamaktadır (ÖÇ, 2024).

1.9. Su Sürdürülebilirlik ve Net Sıfır Su Yaklaşımları

Net sıfır su kavramı farklı şekillerde tanımlanabilmekle birlikte, temelde enerji sektöründe yaygın olarak kullanılan net sıfır enerji yaklaşımının su sektörüne uyarlanmasıyla geliştirilmiştir. Bu kavram, tatlı su rezervlerinin kullanımını en aza indirerek, kullanılan suyun kaynağına geri döndürülmesini ve böylece belirli bir bölgedeki yer altı ve yüzey suyu kaynaklarının hem miktar hem de kalite açısından tükenmesinin önlenmesini amaçlayan sistemleri ifade eder. Net sıfır su sistemleri, bir yıllık süre zarfında su kaynaklarının dengesini koruyacak şekilde tasarlanır. Bu yaklaşım, yapay zekâ teknolojilerine başvurmadan da uygulanabilir olup, dengeli ve sürdürülebilir bir su ekosisteminin korunmasına odaklanır. Temel amaç, suyun doğadan alındığı biçimde yeniden doğaya döndürülmesini sağlayarak uzun vadede su ayak izini dengeleyen bir sistem kurmaktır (Army, 2011).

Net sıfır suya ilişkin bir diğer yaklaşım ise, düzenlenmiş içme suyu kullanımları hariç olmak üzere, bir projenin tüm su talebinin; yakalanan yağmur suları, doğal kapalı döngü su sistemleri veya geri dönüştürülmüş proje suyu aracılığıyla karşılanması gerektiğini savunur.

Bu yaklaşım, suyun kullanımının yalnızca miktarsal olarak değil, aynı zamanda aşağı akış ekosistemleri üzerindeki etkileri göz önünde bulundurularak sürdürülebilir şekilde yönetilmesini hedefler. Ayrıca, su arıtma süreçlerinin etkin bir şekilde ve kimyasal madde kullanılmaksızın gerçekleştirilmesi esastır. Bu, çevresel etkiyi en aza indirerek, hem insan sağlığı hem de doğal ekosistemler için güvenli bir su döngüsü oluşturmayı amaçlamaktadır.(Challenge, 2012).İçme suyu yıllık tüketimi, yıllık yağış miktarını aşmaz (Olmos & Loge, 2013).

Net sıfır su kavramı, binalarda sürdürülebilir su yönetimini teşvik etmek açısından gereklidir. Sürdürülebilir yapı anlayışının temel bileşenlerinden biri, suyun toplanması, kullanılması ve yeniden kullanımıdır.Sürdürülebilir su yönetimi, binaların tasarımı ve inşasında su verimliliği uygulamalarıyla entegre edildiğinde; su kıtlığı, çevresel bozulma ve artan su talebinden kaynaklanan çok yönlü zorlukların üstesinden gelinmesine katkı sağlar.Etkin su yönetimi, yalnızca bireysel bina performansını artırmakla kalmaz; aynı zamanda sucul ekosistemlerin ekolojik dengesinin korunması,

topluluklara sürekli tatlı su temini sağlanması ve iklim değişikliğinin su kaynakları üzerindeki etkilerinin azaltılması açısından da kritik öneme sahiptir (Water, 2021).

Sürdürülebilir su yönetimi uygulamaları, yağmur suyu hasadı, su geri dönüşümü ve havza alanlarının korunması gibi yöntemler hem mevcut hem de gelecek nesiller için suyun mevcudiyetinin ve kalitesinin korunmasında önemli bir rol oynamaktadır (Gleick, 2003). Bu tür uygulamaların hayata geçirilmesi, toplumların suyla ilgili zorluklara karşı dayanıklılığını artırabilir ve temiz su ve sanitasyona odaklanan Sürdürülebilir Kalkınma Hedefi 6'nın (SKH 6) gerçekleştirilmesine katkı sağlayabilir.

Günümüzde birçok bina, su kullanımını en aza indirmek amacıyla düşük akışlı tuvaletler, duş başlıkları ve musluklar gibi su verimliliği sağlayan armatürleri içeren çeşitli net sıfır su stratejileri uygulamaktadır. Bununla birlikte, bireylerin su kullanım alışkanlıklarını değiştirmesi, örneğin, damlayan muslukları tamir etmek veya dış fırçalarken musluğu kapatmak bireysel düzeyde su tüketiminin daha da azaltılmasına yardımcı olabilir.

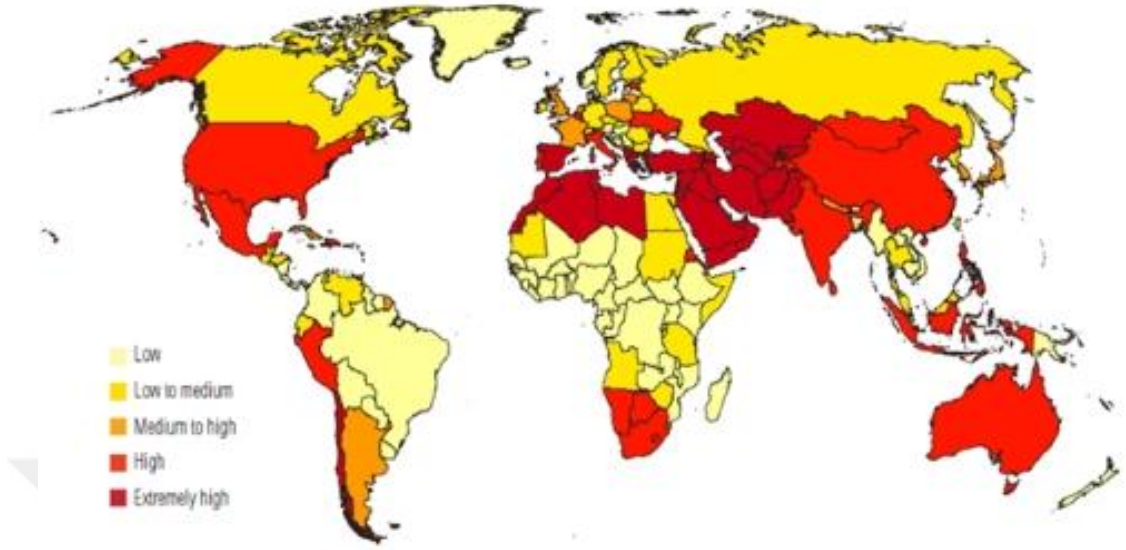
Teknolojik yöntemler, lavabolardan, duşlardan ve çamaşır makinelerinden gelen suyu, peyzaj sulama ve içilemez kullanımlar için uygun hale getirmek amacıyla yeniden kullanmayı içeren gri suyun yeniden kullanımını kapsamaktadır. Geri dönüştürülmüş gri su kullanılarak dış mekân su tüketimi %50'ye kadar azaltılabilir (Al-Hamaiedeh & Bino, 2010). Yeniden kullanım, başlangıçta bir yatırım ve sürekli bakım gerektirse de, sudaki potansiyel tasarruflar, net sıfır binalar için finansal olarak uygulanabilir ve çevresel açıdan sorumlu bir seçenek haline getirir. Ek olarak, yerinde arıtma, net sıfır suya ulaşmada önemli bir rol oynamaktadır. Farklı atık su tipleri, içilebilir olmayan uygulamalar için yüksek kaliteli su sağlayan membran biyoreaktörler ve ters ozmoz gibi çeşitli arıtma yöntemlerini gerektirir. Bu çalışmada ilgi çeken bir diğer teknoloji ise, içilebilir olmayan kullanımlar için yağmur suyu toplayarak haneler için değerli bir kaynağa dönüştürmeyi içeren yağmur suyu hasadıdır (YSH). Bu uygulama, içme, yemek pişirme, sanitasyon, sulama ve tuvalet sifonu çekme gibi temel faaliyetleri destekler. Doğal ve/veya yapay göletler ve rezervuarlar gibi basit tekniklerden yararlanılarak toplanan her milimetre yağmur suyu, metrekare başına bir litreye karşılık gelmektedir. YSH ayrıca tarımsal üretkenlikte de önemli bir rol oynamaktadır. YSH'nin üç temel biçimi vardır: yüzeyde ve toprak içinde yağmur suyu toplamaya ve depolamaya odaklanan yerinde YSH; tarımda çeşitli yüzeylerden yağmur suyu toplamak ve depolamak için kullanılan dış su hasadı; ve çatılardan, sokaklardan ve

bahçeden gelen suların toplanmasını içeren evsel yağmur suyu hasadı. Temel olarak YSH, hem bireysel hanelere hem de tarımsal kullanımlara fayda sağlayan sürdürülebilir ve merkezi olmayan bir su kaynağı olarak hizmet etmektedir. Yağmur suyu hasadının ilk aşaması, maksimum miktarda yağmuru yakalamak için yeterince büyük bir toplama tankının kurulmasını gerektirir. Bunu takiben, toplanan yağmur suyunu tutmak için bir depolama tankına ihtiyaç duyulur ve bu tank da binanın gereksinimlerini karşılayacak kadar büyük olmalıdır. YSH sistemleri, binanın yapısal özelliklerine ve depolama tankının yüksekliğine bağlı olarak yerçekimi beslemeli veya pompa tahrikli kurulumlarla tasarlanabilir. Ayrıca, bu sistemler, hasat edilen yağmur suyunun kalitesini izleyerek sulama veya tuvalet sifonu gibi belirli uygulamalar için uygunluğunu sağlamaktadır (Helmreich & Horn, 2009).

1.10. Küresel ve Türkiye'nin Su ve Kıtlılık Senaryosu

Birleşmiş Milletler'in tahminlerine göre, yaklaşık 2,8 milyar insan, yani küresel nüfusun yaklaşık %40'ı, su kıtlığı koşullarında yaşamaktadır. Bu nüfusun yaklaşık 1,2 milyarı (%40'ın %40'ı), yetersiz su kaynakları nedeniyle suya erişimde ciddi sıkıntılar yaşamaktadır; bu durum, literatürde fiziksel su kıtlığı olarak tanımlanmaktadır. Fiziksel su kıtlığından etkilenen başlıca bölgeler arasında Kuzey Afrika, Orta Doğu, Çin'in geniş alanları, Kuzey Hindistan, Amerika Birleşik Devletleri'nin orta ve güney eyaletleri ile Kuzey Meksika yer almaktadır. Küresel düzeyde karşılaşılan bir diğer su kıtlığı türü ise, mevcut su kaynaklarının teknik, kurumsal veya finansal yetersizlikler nedeniyle erişilebilir kılınamamasından kaynaklanan ekonomik su kıtlığıdır. Bu tür kıtlık, başta Güneydoğu Asya, Hindistan'ın bazı bölgeleri, Sahra Altı Afrika ve Amerika kıtasının And Dağları bölgesi olmak üzere, çoğunlukla gelişmekte olan ülkelerde görülmektedir. Dünya genelinde tatlı su kaynaklarının eşitsiz dağılımı, bazı bölgelerin diğerlerine kıyasla çok daha az suya sahip olmasını açıklamaktadır. Özellikle Kuzey Afrika ve Orta Doğu'daki ülkeler, kronik su kıtlığı yaşayan başlıca bölgeler arasında yer almaktadır. Günümüzde her on ülkeden yedisi artan su kıtlığı ile karşı karşıyadır ve bu ülkelerin 2035 yılına kadar su taleplerini karşılamakta zorlanacakları öngörülmektedir. Kişi başına yıllık kullanılabilir su miktarı bakımından en alt sırada yer alan ülke, sadece 4,6 m³ ile Kuveyt'tir (Al-Otaibi & Abdel-Jawad, 2007). Kuveyt'i sırasıyla şu ülkeler izlemektedir: Birleşik Arap Emirlikleri (13,6 m³), Katar (21,6 m³), Bahamalar (46,9 m³), Bahreyn (67,8 m³), Libya (74,3 m³), Maldivler (76,6 m³), Yemen (88,8 m³) ve Singapur (98,4 m³). Mevcut tatlı su kaynaklarının 2050

yılına kadar yarı yarıya azalması beklenmekte olup, bu ülkelerin çoğunun 2040 yılına kadar ciddi su kıtlığı ile karşı karşıya kalacağı öngörülmektedir (Luo et al., 2015).



Şekil 1.2. 2040 yılında ülke düzeyinde su stresi.

(Luo et al., 2015) ten uyarlanmıştır

Kritik oran (CR), 0,4 ile 0,8 arasında değişen değerlerle su kıtlığı derecesini değerlendirir ve yüksek su stresinden daha büyük su stresine geçişi gösterir. Daha önce yalnızca çöl bölgelerinin (yani $CR > 0,4$) en fazla su stresini yaşadığı düşünülürken, günümüzde Çin'deki Sarı Nehir ve Hindistan'daki Krishna Nehri gibi geniş nehir havzalarına sahip çeşitli bölgeler; Orta Asya'nın büyük bölümleri, Latin Amerika'daki kıyı alanları, Avrupa'nın bazı bölgeleri ve Batı Amerika Birleşik Devletleri'ndeki önemli alanlar da ciddi düzeyde su stresi sergilemektedir. Bu stresin şiddeti Orta Afrika'da %5 ile Orta Doğu'da %88 arasında değişiklik göstermektedir. Küresel ölçekte, Grönland ve Antarktika hariç tutulduğunda, karasal yüzeyin yaklaşık %25'i şiddetli su stresi altındadır. Bu durum, su kaynakları üzerindeki baskının yoğun olduğu nehir havzalarında yaşayan yaklaşık 2,1 milyar kişiye karşılık gelmektedir ve bu nüfusun neredeyse yarısı Güney Asya ve Çin'de yaşamaktadır (Alcamo et al., 2000). Aşağıdaki tablo, 2030 yılına ait tahminleri, su stresi, su kıtlığı ve mutlak su kıtlığına maruz kalan bireylerin sayısını ve bu rakamların toplam nüfus içindeki oranlarını, dünya ve seçilen ülkeler için göstermektedir.

Table 1.1. 2019 Su stresive su kıtlığı verileri.

Ülke	Nüfus (Bin Kişi)	Su Stresi (Bin Kişi)	Su Kıtlığı (Bin Kişi)	Mutlak Su Kıtlığı (Bin Kişi)	Su Kıtlığı Alanlarında Yaşayanların Yüzdesi (%)
Dünya	8600000	2705236	nan	nan	31%
Türkiye	89557	14127	7361.0	19681.0	30%
İngiltere	70484	9367	18247.0	16693.0	50%
Almanya	82874	11463	11413.0	2381.0	17%
Fransa	70885	13300	3810.0	2112.0	8%
İtalya	58496	10495	1519	9770	19%
ABD	366348	34745	34286	61772	26%
Kanada	41956	1205	466	7152	18%
Meksika	136202	14098	10201	60600	52%
Peru	33478	73	3518	15809	58%
Şili	19660	1358	978	9320	52%
Brezilya	223861	24005	13776	57905	32%
Venezuela	37776	2922	2060	19329	57%
Suriye	27790	6293	5190	9498	53%
Irak	51303	2573	3939	6617	47%
İran	87873	10708	13273	25197	62%
İsrail	12412	108	1719	9807	93%
Arabistan	42587	3706	7714	19158	63%
Yemen	40707	1606	5412	31560	91%
Umman	4135	108	176	3098	84%
BAE	12696	453	306	10653	86%
Bahreyn	1930	0	0	1930	100%
Katar	3288	0	24	3229	49%
Kuveyt	4572	0	101	3823	86%
Kıbrıs	473	0	291	0	62%
Cezayir	43305	3666	13191	19920	78%
Mısır	109308	167	65	53103	49%
Sudan	50374	3225	3136	16837	40%
Hindistan	1556390	168914	232241	298095	34%
Çin	1385030	142578	185219	322178	37%
Güney Kore	50724	9752	4296	19200	38%
Türkmenistan	6801	471	726	2306	45%
Özbekistan	29528	1312	3076	3479	22%
Rusya	139934	7813	11720	35399	19%
Japonya	120506	12833	6865	22664	20%
Endonezya	281905	36183	54191	47877	36%

2023 itibarıyla nüfusu yaklaşık 84 milyon olan gelişmekte olan bir ülke olan Türkiye, yıllık %1,3'lük bir büyüme oranı göstermektedir. Dünya Kaynakları Enstitüsü (DKE), Türkiye'nin şu anda 3,02 seviyesinde temel bir su stresi yaşadığını bildirmektedir. Tahminler, bu stres seviyesinin 2030 yılına kadar neredeyse iki katına, 2040 yılına kadar ise yaklaşık 2,8 katına çıkacağını öngörmektedir.(Ağaçayak & Keyman, 2018).Su stresi açısından, Türkiye 2010 yılında 41. Sırada yer alırken, 2040 yılında en yüksek su stresine sahip 27. ülke olması bekleniyor (Turan & BAYRAKDAR, 2020). Türkiye'nin su kaynakları; yağış, komşu ülkelerden gelen yıllık su girişi ve yenilenebilir su kaynaklarından oluşmaktadır. Türkiye'deki ortalama yıllık yağış miktarı yaklaşık 643 mm olup, bu değer yılda toplam 501 milyar m³ yağışa karşılık gelmektedir. Ancak, mevcut su kaynakları yaklaşık 112 milyar m³ ile sınırlıdır; bu da kişi başına yıllık yaklaşık 1.387 m³ kullanılabilir su anlamına gelmektedir. Türkiye, komşu ülkelerinden yılda yaklaşık 7 milyar m³ su almaktadır. Sonuç olarak, Türkiye'nin toplam brüt yenilenebilir su potansiyeli yaklaşık 234 milyar m³, yıllık yenilenebilir yüzey suyu ise 193 milyar m³ olarak hesaplanmaktadır. (Burak, 2008). Bu su kaynaklarının yönetimi, önemli zorluklar ortaya çıkarmaktadır. 2019–2023 Kalkınma Planı, buharlaşmadan kaynaklanan su kaybını azaltmak amacıyla yeraltı havzaları ve barajların inşasının sürdürüleceğini duyurmuştur(Turan & BAYRAKDAR, 2020).

1.11. Net Sıfır Su Yaklaşımı

Konsept başlangıçta ABD ordusu tarafından, tesislerinin ve bağlı topluluklarının enerji, su ve atık ayak izlerini en aza indirmek amacıyla benimsenmiştir. Zamanla yaygınlık kazanmış ve ordu tarafından resmî olarak Net Sıfır Su olarak tanımlanmıştır. Bu uygulama, genel su tüketimini azaltmaya, teknoloji yoluyla verimliliği artırmaya, suyun geri dönüştürülmesi ve yeniden kullanılması ile içilebilir sudan alternatif kaynaklara geçişe odaklanmaktadır. Ayrıca, çekilen su miktarı ile geri dönen su miktarının dengelenmesini sağlamak amacıyla, havzalar arası su transferlerinin en aza indirilmesi hedeflenmektedir(Jenicek et al., 2011). Yıllar içinde, FEMP net sıfır yönergelerinde başka bir kavram daha tanıtmış ve net sıfır suyu, genel su tüketimini ve atık su deşarjını azaltmayı, alternatif su kaynaklarının kullanımını teşvik etmeyi ve suyun orijinal kaynağına geri döndürülmesini amaçlayan bir uygulama olarak tanımlamıştır. Bu yaklaşımın temel amacı, bir yıl içinde kullanılan toplam su miktarının, kullanılan alternatif su hacmi ve orijinal kaynağa geri döndürülen miktar

ile dengelenmesini sağlamaktır (Fowler et al., 2017). FEMP yaklaşımına uygun olarak, ABD Yeşil Bina Konseyi, su akışını en aza indirmek ve su kalitesini artırmak amacıyla tasarlanmış LEED Sıfır Su Sertifikası sağlamaktadır. Bu sertifika, bir alanın doğal hidrolojisini ve yeraltı suyu üzerindeki su kullanım etkilerini taklit etmeyi vurgulayarak, daha sürdürülebilir bir su yönetimi yaklaşımını teşvik etmeyi amaçlamaktadır (Yonkofski et al., 2021).

Prag Su Net Sıfır Stratejisi 2025 kapsamında, su ayak izi ile net sıfır su arasındaki ilişki, su nötrlüğüne ulaşmaya yönelik genel yaklaşımın merkezinde yer almaktadır. Su ayak izi değerlendirmesi, Prag'ın su ve atık su sistemlerindeki toplam su tüketiminin ayrıntılı bir temel ölçümünü sağlayarak, su kullanımının kapsamını ve kaynaklarını anlamaya yardımcı olur. Bu sayede strateji, müdahale gerektiren öncelikli alanları belirleyebilmektedir. Net sıfır su, su ayak izini dengeleme hedefiyle, su kullanımını azaltan ve su kaynaklarını yenileyen stratejilerin uygulanmasıyla sağlanmaktadır. Bu kapsamda; yağmur suyu hasadı, atık su geri dönüşümü ve gelişmiş su yönetim teknolojileri gibi yöntemler öne çıkmaktadır. Su ayak izi, esasen net sıfır suya ulaşma sürecini yönlendirmekte; şehrin genel su tüketimini azaltmada en büyük etkiye sahip eylemlerin önceliklendirilmesine katkı sunmaktadır. Bir şehir, su ayak izini düzenli olarak izleyerek, toplam su tüketimini sürdürülebilir uygulamalarla çevreye eşdeğer miktarda su geri kazandıracak şekilde dengeleyerek, su nötrlüğüne ulaşmayı hedefleyebilir. Bu bütüncül yaklaşım, su yönetiminin hem veriye dayalı olarak yürütülmesini hem de belirli hedeflere odaklanmasını garanti altına alır ve su ayak izi ile net sıfır su girişimleri arasındaki doğrudan bağlantıyı kurar (Srb et al., 2023).

Yapılan bir çalışma, su kıtlığı yaşayan şehirlerde net sıfır suya ulaşmak amacıyla yağmur suyunun yenilenebilir bir kaynak olarak kullanılma potansiyelini araştırmıştır. Araştırma, yarı kurak Güneybatı Amerika Birleşik Devletleri'nde yer alan ve su stresi yaşayan bir şehir olan Tucson, Arizona özelinde, net sıfır kentsel suya ulaşmak için gerekli yağmur suyu hasadı (YSH) ağını değerlendirmek üzere bir model geliştirmiştir. Çalışma, uzun vadeli talebi karşılamaya yönelik sürdürülebilir bir yerel su tedarik yaklaşımı benimsemiştir. Bu kapsamda, on yıllık ardışık günlük yağış verilerine dayalı olarak, net sıfır kentsel suya ulaşmak için gereken asgari depolama hacimleri, optimize edilmiş günlük su dengesi modeli aracılığıyla belirlenmiştir. Uzaktan algılama, yerel günlük yağış verileri ve belediye su sayacı kayıtları kullanılarak dört farklı yatırım

senaryosu altında potansiyel pasif ve aktif YSH sistemleri analiz edilmiştir. Bulgular, YSH sistemlerinin kentsel su stresi üzerinde önemli ölçüde azaltıcı etki yaratabileceğini göstermiştir. En uygulanabilir net sıfır senaryosunda, yağmur suyunun ithal suyun yerini aldığı ve su talebinde %30 oranında azalma sağlandığı belirlenmiştir. Araştırma, her 100 m² çatı alanı için ortalama 28,2 m³ depolama alanının gerektiğini ve bunun yaklaşık 10.000 USD'lik bir yatırım anlamına geldiğini ortaya koymuştur. Sonuçlar, daha büyük haneler için yüksek yatırım gereksinimini vurgularken, merkezi olmayan şebekelerin kentsel ortamlara etkin entegrasyonu için inşa edilmiş çevre, ekonomik yapı ve sosyal sistemlerde çeşitli uyarlamaların yapılması gerektiğini de işaret etmektedir. Çalışma, yeterli depolama kapasiteleri sağlandığı takdirde, uzun süreli kuraklık koşullarında bile YSH yoluyla net sıfır kentsel suya ulaşmanın mümkün olduğunu ortaya koymaktadır (Crosson et al., 2021).

Türkiye'nin Antalya ilinde yürütülen bir araştırma, yağmur suyunun önemi ile potansiyel uygulamalarını vurgulamayı amaçlamıştır. Çalışmanın temel hedefi, sistemin ölçeğinden bağımsız olarak yağmur suyu hasadının pratik yönlerini ortaya koymaktır. Hasat edilen yağmur suyunun; tarımsal sulama, peyzaj sulama ve evsel kullanım gibi çeşitli amaçlara hizmet edebileceği belirtilmiştir. Çalışma, bölgede yaşanan su kıtlığını hafifletme potansiyelini değerlendirmek üzere iklim verileri, yağış desenleri ve su talebi senaryolarını kullanmıştır. Vurgu özellikle, sera alanlarında oluk sistemleri aracılığıyla suyun depolanmasına dayalı yağmur suyu hasadı potansiyeline yapılmıştır. Türkiye'deki seraların yaklaşık yarısına ev sahipliği yapan Antalya'da, bu tesislerin yıllık tahmini yağmur suyu hasadı potansiyeli 224.992.795,8 m³ olarak hesaplanmıştır. Aylık değerlendirmelere göre, en düşük toplanabilir su hacmi Ağustos ayında (938.447,53 m³), en yüksek hacim ise Aralık ayında (54.771.210 m³) kaydedilmiştir. Elde edilen bulgular, yağmur suyu hasadının faydalı ve uygulanabilir bir sistem olduğunu göstermektedir. Tarımsal üretimin sürdürülebilirliğini artırmak adına, üreticilerin sulama amaçlı yağmur suyu hasadı sistemleri konusunda bilgilendirilmesi, eğitilmesi ve yaygın biçimde benimsenmesinin teşvik edilmesi önerilmektedir (Ertop et al., 2023).

Hindistan'daki Amity Üniversitesi Mumbai Kampüsü'nde yürütülen bir çalışma, kampüs için yağmur suyu toplama sisteminin tasarımına odaklanmaktadır. Su talebi ve arzı dikkate alınarak, potansiyel toplama alanları arasında ana bina, yağmur suyu hasadı için birincil yer olarak seçilmiştir. Çalışma, yağış verilerine dayalı olarak

çatılardan elde edilebilecek potansiyel yağmur suyu veriminin hesaplanmasını ve toplanan suyun yakalanması ve kullanılması amacıyla bir depolama sisteminin tasarlanmasını içermektedir. İlgili yönergelere uygun şekilde, sistemin çeşitli bileşenleri tasarlanmış ve sonuçlar, kampüs ölçeğinde yıllık 6.109,42 metreküp su tasarrufu potansiyeline sahip olduğunu ortaya koymuştur. Bu miktar, özellikle muson mevsiminde yaşanan su kıtlığı sorunlarının hafifletilmesinde etkili olabilir. Bulgular, sistemin uygulanmasının inşaat projeleri ve bahçecilik gibi alanlarda su teminini artırdığını; ayrıca, yeraltı su kaynaklarının yapay yollarla yeniden doldurulmasını kolaylaştırarak hem yüzey hem de yeraltı suyu bulunabilirliğini iyileştirme potansiyeline sahip olduğunu göstermektedir (Mishra et al., 2020).

Yapılan bir çalışma, farklı iklim koşullarında ve bina tasarımlarında yağmur suyu hasadının su tasarrufuna olan katkısını araştırmıştır. Araştırma kapsamında, iki farklı senaryoda çeşitli bina formlarından toplanan yağmur suyu miktarları karşılaştırılmıştır. İlk senaryoda, Bursa (ılıman-nemli iklim) ve Diyarbakır (sıcak-kuru iklim) şehirlerinde yer alan iki kamu konut projesi, yağmur suyu toplama kapasitesi ve su tasarrufu potansiyeli açısından değerlendirilmiştir. İkinci senaryoda ise, tipik bir ılıman iklim projesinin sıcak-kuru iklim koşullarına uygulanabilirliği ele alınmıştır. İlk senaryonun sonuçlarına göre, Diyarbakır’da kişi başına toplanan yağmur suyu miktarı, Bursa’ya kıyasla %89 daha fazla bulunmuştur. Gelişim 1, yıllık su ihtiyacının %4,5’ini sadece çatılardan gelen yağmur suyuyla karşılarken; Gelişim 2, ihtiyacının %8,5’ini çatılar ve avlulardan temin etmiştir. Ayrıca, Gelişim 1’de tuvalet sifonu ve banyolar için yıllık su tüketiminin sırasıyla %18’i ve %7’si toplanan yağmur suyuyla karşılanmıştır. Gelişim 2’de bu oran %13 olarak kaydedilmiştir. İkinci senaryoda, Gelişim 1’de çatı suyu toplama alanlarından toplanan toplam yağmur suyu miktarı 1.274 litre, Gelişim 2’de ise %145 artışla 3.124 litre olarak hesaplanmıştır. Gelişim 1, bu senaryoda tuvalet sifonu ve banyolar için yıllık su ihtiyacının sırasıyla %13’ünü ve %5’ini yağmur suyuyla karşılamıştır. Bu oranlar, Gelişim 2 için her iki kategoride %34’e kadar yükselmiştir. Çalışma, hasat edilebilir yağmur suyu miktarının, yağış miktarı ve verim katsayısı gibi faktörlere bağlı olarak değiştiğini ortaya koymakta ve yağmur suyu hasadının su tasarrufu potansiyeline sahip etkili bir yöntem olduğunu vurgulamaktadır (Şahin & Manioğlu, 2019).

Bu makale, her iki ilçedeki bireysel hanelerin toplam açık alan sulama gereksinimlerini karşılamak için gereken yağmur suyu depolama kapasitesini değerlendirmek amacıyla,

önceki araştırmalara dayalı bir model sunmaktadır. Model; bölgesel yağış, su temini (günlük yağış miktarı ve yağmur suyu hasadı sisteminin toplama alanı üzerinden belirlenir) ile sulama ihtiyacı arasındaki fark olarak tanımlanan talep doğrultusunda çok sayıda sentetik senaryo üretmektedir. Ayrıca, depolama kapasitesi ve güvenilirlik açısından da analiz sonuçları sunulmaktadır.

Bu senaryolar, mevsimsel değişiklikleri dikkate alarak, tarihsel yerel günlük yağış verilerine dayanmakta ve kütle dengesi, ardışık tepe yöntemi ve parametrik olmayan önyükleme teknikleri kullanılarak geliştirilmiştir.

Endonezya'da yapılan bir başka araştırma, Güney Tangerang bölgesinde yer alan bir alışveriş merkezi için yağmur suyu hasadını su tasarrufu yöntemi olarak incelemiştir. Bu çalışmanın amacı, EPA-SWMM (Yağmur Suyu Yönetim Modellemesi) kullanılarak alışveriş merkezinin yağmur suyu hasadı potansiyelini değerlendirmek ve uygun bir yağmur suyu deposu tasarlamaktır. Analiz için iki boyutlu bir model uygulanmış, yüzey akışı değerlendirmelerinde rasyonel yöntem ve EPA-SWMM yazılımı kullanılmıştır. Metodoloji; yağış verilerinin toplanmasını, binanın çatısından hasat edilebilecek su hacminin hesaplanmasını ve bu suyun alışveriş merkezinin su ihtiyacına katkısının değerlendirilmesini içermektedir. Bulgular, alışveriş merkezinin çatısından toplanabilecek günlük ortalama yağmur suyu hacminin 80 m^3 , bahçe sulama için gereken günlük su ihtiyacının ise 20 m^3 olduğunu ortaya koymuştur. Sonuç olarak, toplanan yağmur suyunun bahçe sulama ihtiyacını karşılayabileceği ve aynı zamanda Düşük Etkili Gelişim (DEG) stratejileriyle yönetilebilecek fazla miktarda suyun oluşabileceği belirlenmiştir (Tiara Suci et al., 2023).



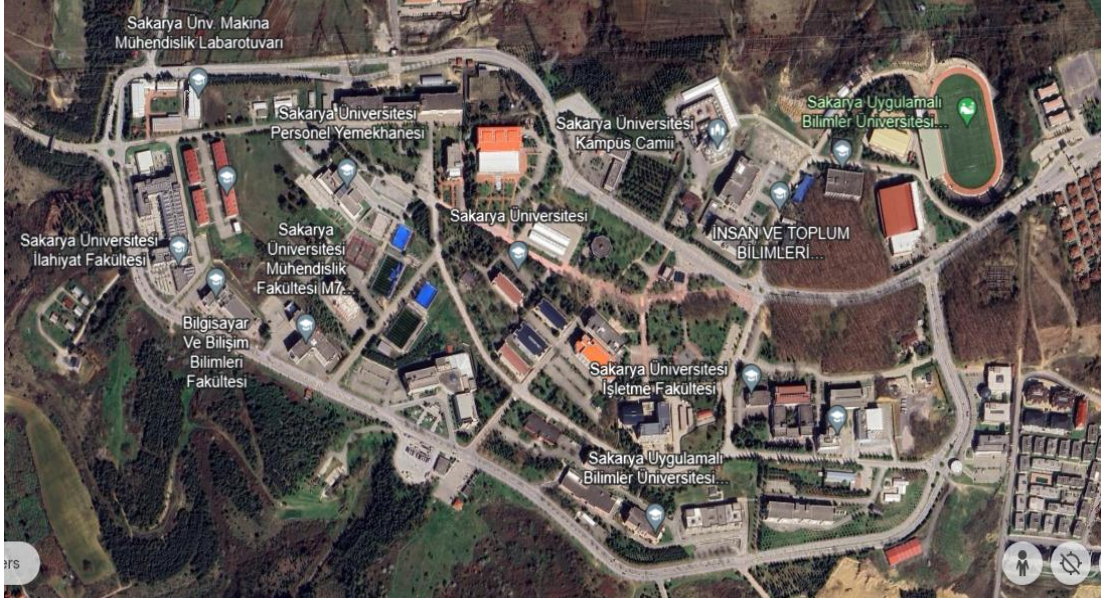
2. METODOLOJİ

2.1. Çalışma Alanı

Bu çalışma, Türkiye'nin Sakarya ilinde yer alan bir kamu kurumu olan Sakarya Üniversitesi'nde yürütülmüştür. Üniversite, lisans, ön lisans ve lisansüstü programların yanı sıra çeşitli temel eğitim hizmetleri sunmaktadır. Dört ayrı kampüse sahip olan Sakarya Üniversitesi'nde bu araştırma, ana yerleşke olan Esentepe Kampüsü üzerinde yoğunlaşmaktadır. Öğrenci sayısı yaklaşık 40.000 ila 44.000, akademik personel sayısı ise 1.500 ila 2.000 arasında değişmektedir. Üniversite, haftanın yedi günü faaliyet göstermekte olup, enerji ve su tüketim düzeyi oldukça yüksektir.

Esentepe Kampüsü, toplam 72 binadan oluşmaktadır. Bu binaları çevreleyen alanlarda yeşil alanlar ve yaya patikaları bulunmaktadır. Kampüs genelinde 1.712.775 m²'lik bir yüzey alanı mevcuttur ve bunun 520.807,57 m²'lik kısmı ormanlık alan olarak tanımlanmıştır.

Aşağıda, çalışma alanını gösteren bir uydu haritası yer almaktadır.



Şekil 2.1. Sakarya üniversitesi'nin uydu görüntüsü.

2.2. Su Ayak İzi

2.2.1. Veri toplama

Sakarya Üniversitesi, pazar günleri dahil olmak üzere haftanın her günü faaliyet göstermektedir. Kütüphane ve kafeterya gibi bazı tesislerin 7/24 açık olması, kampüs genelinde önemli düzeyde su ve elektrik tüketimine neden olmaktadır. Bu durum, aynı zamanda nispeten yüksek miktarda atık oluşumuna da yol açmaktadır. Üniversite, enerji ihtiyacının bir kısmını yenilenebilir kaynaklardan, geri kalan kısmını ise Kolen Enerji adlı firma aracılığıyla karşılamaktadır. 2022–2023 dönemine ait enerji ve su tüketim verileri, Mali İşler Daire Başkanlığı’ndan temin edilmiştir. Atık yönetimiyle ilgili veriler ise bu konudan sorumlu olan Çevre Mühendisliği Bölüm Koordinatörlüğü tarafından sağlanmıştır. Su ayak izi hesaplaması, farklı metodolojik yaklaşımları içermektedir.

2.2.2. Doğrudan su ayak izi

Doğrudan su ayak izi, çeşitli faaliyetler sırasında doğrudan tüketilen su miktarını ifade eder. Bu, yalnızca kullanılan toplam su hacminin belirlenmesini gerektirdiğinden, değerlendirilmesi en basit su tüketim biçimidir. Su ayak izi analizinde, tüketilen veya kirletilen su miktarı doğrudan “su ayak izi” olarak kabul edilir. Üniversite ölçeğinde doğrudan su tüketimi genellikle içme suyu, temizlik, kafeteryalar, yemekhaneler, laboratuvarlar, araştırma tesisleri ve öğrenci yurtları gibi alanlarda gerçekleşmektedir. Doğrudan su ayak izini hesaplamak için, yalnızca tüketilen su miktarının net ve tutarlı bir birimle (örneğin metre-küp cinsinden) ifade edilmesi yeterlidir; ek hesaplamalara gerek yoktur. Bu nedenle, toplam tüketim hacmi, doğrudan su ayak izini temsil eder.

Bu durum, matematiksel olarak aşağıdaki şekilde ifade edilebilir:

$$\text{Toplam Doğrudan su Ayak izi} = \sum(\text{Faaliyet Bazında Su Tüketimi})$$

2.2.3. Dolaylı su ayak izi

Dolaylı su ayak izi, bir faaliyetin tüm aşamalarında ham maddelerin üretiminden nihai ürünün taşınmasına kadar dolaylı olarak kullanılan tatlı su miktarını kapsamaktadır. Bu çalışmada, su ayak izi hesaplamalarında Su Ayak İzi Değerlendirme Kılavuzu esas alınmıştır. Söz konusu kılavuz, su ayak izini ölçmek ve analiz etmek isteyen uygulayıcılara yönelik pratik bir kaynak niteliği taşımaktadır.

Değerlendirme süreci, Sakarya Üniversitesi Esentepe Kampüsü’nde elektrik tüketimi ve atık üretimine ilişkin verilerin toplanmasıyla başlatılmıştır. Enerjiye bağlı su ayak izi, üniversitenin elektrik tüketimi temel alınarak hesaplanmıştır. Bu kapsamda, 2022–2023 yıllarına ait elektrik faturaları Maliye Bakanlığı’ndan temin edilmiştir.

Elde edilen verilere göre, üniversitenin elektrik ihtiyacının büyük bir bölümü, Uluslararası Yenilenebilir Enerji Sertifikası (I-REC) ile belgelenmiş yenilenebilir enerji kaynakları aracılığıyla karşılanmaktadır. Sakarya Üniversitesi’nin 2022 yılı toplam elektrik tüketimi 10.133.873,74 kWh, 2023 yılı ise 8.478.660,20 kWh olarak kaydedilmiştir.

Üniversitenin enerji kaynaklarına göre dağılımı şu şekildedir:

- Hidroelektrik: 4.050.000 kWh
- Güneş Enerjisi (I-REC ve kampüs paneli): 3.150.000 kWh + 90.000 kWh
- Rüzgar Enerjisi (I-REC): 2.078.000 kWh

(Kaynak: Sakarya Üniversitesi Yeşil ve Sürdürülebilirlik Raporu)

Bu dağılım, üniversitenin enerji ihtiyacının büyük ölçüde yenilenebilir kaynaklardan karşılandığını göstermektedir. Genel olarak, yenilenebilir enerji kaynakları düşük su ayak izine sahiptir. Her ne kadar hidroelektrik enerji, rezervuarlarda meydana gelen buharlaşma nedeniyle belirli bir su tüketimi oluştursa da; güneş ve rüzgar enerjilerinin operasyonel su kullanımı yok denecek düzeydedir.

Sakarya Üniversitesi, elektrik enerjisinin bir kısmını “Kolen” adlı özel bir enerji şirketinden temin etmektedir. Kampüs içerisinde herhangi bir yerel enerji üretim tesisi bulunmamaktadır. İlgili şirketin ağırlıklı olarak hidroelektrik santrallerden enerji üretmesi nedeniyle, bu çalışmada hidroelektrik kaynaklar temel alınarak değerlendirme yapılmıştır.

Mekonnen ve Hoekstra (2012) tarafından yürütülen bir araştırmaya göre, hidroelektrik santrallerden kaynaklanan su ayak izi, bölgesel özellikler, rezervuar büyüklüğü ve iklim koşulları gibi etkenlere bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Türkiye’deki hidroelektrik enerji üretimi için su ayak izi, Türk rezervuarlarında buharlaşma oranlarını dikkate alan küresel çalışmalara göre 22 m³/GJ (gigajoule başına metreküp) olarak belirlenmiştir(M. Mekonnen & A. Y. Hoekstra, 2012).

Hidroelektrik enerji kaynaklarının su ayak izi hesaplanırken, güneş ve rüzgâr enerjisinin su kullanımı ihmal edilebilir düzeyde olduğundan, bu kaynaklar için su ayak izi sıfır olarak kabul edilmiştir. Hidroelektrik enerjiye bağlı su ayak izi, aşağıdaki formül kullanılarak hesaplanmıştır:

$$\text{Elektrik Tüketim} = \text{Toplam Enerji (GJ)} \times (\text{GJ}) \text{ Başına Su Ayak izi (m}^3\text{/GJ)}$$

Gıda üretim süreçleri, özellikle tarımsal sulama ve hayvansal üretim gibi su yoğun faaliyetleri içerdiğinden, üniversitenin yemek hizmetleri aracılığıyla sağlanan toplam gıda tüketimi bu kapsamda dikkate alınmıştır. Literatürde farklı gıda türleri için su ayak izi değerleri şu şekilde belirtilmiştir

Tablo 2.1. Gıda türler için su ayak izi değerleri.

Gıda Maddesi	Birim Su Ayak İzi (m ³ /kg)
Buğday	1,22
Pirinç	2,11
Arpa	0,95
Patates	0,15
Domates	0,24
Soğan	0,14
Elma	0,58
Portakal	0,14
Muz	0,95
Badem	7,95
Ceviz	5,23
Mercimek	2,49
Nohut	2,61
Tavuk	2,42
Sığır Eti	8,00
Kuzu Eti	6,83
Süt	0,84
Yumurta	1,71
Peynir	6,46
Tereyağı	5,67
Zeytinyağı	2,29
Şeker	1,74
Kahve	12,70
Ortalama	3,21

Ortalama su ayak izi değeri, 3,21 m³/kg olarak hesaplanmıştır (Mekonnen & Hoekstra, 2011; M. M. Mekonnen & A. Y. Hoekstra, 2012)

Bu çalışmada kullanılan birincil veri, üniversitenin toplam yıllık gıda tüketimine ilişkindir. İlgili veriler, üniversitenin yemek hizmetleri departmanından temin

edilmiştir ve öğrenciler, personel ile akademik kadro tarafından belirli bir dönemde (örneğin iki yıl) tüketilen toplam gıda miktarını (kilogram cinsinden) kapsamaktadır. Söz konusu veri, farklı gıda gruplarını (örneğin tahıllar, sebzeler, meyveler, et ürünleri) ayırtırmayan bir toplam değer olarak sunulmakta ve üniversitenin yemek hizmetlerinde uygulanan “karma diyet” örüntüsünü temsil etmektedir.

Farklı gıda maddeleri için su ayak izi değerleri, SAK metodolojisini (Su Ayak İzi Kılavuzu) kullanan güvenilir kaynaklardan elde edilmiştir. Gıda tüketim verileri, gıda türlerine göre ayrıştırılmadığı için, Türkiye'deki tipik bir karma diyet için belirlenen ortalama su ayak izi değeri kullanılmıştır. İlgili çalışmalara göre, Türkiye'deki karma diyetin ortalama su ayak izi yaklaşık 3,21 m³/kg olarak belirlenmiştir. Bu değer, tahıllar, meyveler, sebzeler, et ve süt ürünleri gibi temel gıda gruplarını kapsayan ülke genelindeki tipik beslenme alışkanlıklarını dikkate alan ağırlıklı bir ortalamayı temsil etmektedir.

Gıdaya bağlı su ayak izi, aşağıdaki formül kullanılarak hesaplanmıştır:

$$\begin{aligned} & \text{Gıda Su Ayak izi} \\ &= \text{Tüketilen Her Tür Gıdanın Miktarı} \\ &\times \text{Her bir gıda türünün birim tüketim su} \end{aligned}$$

Yeşil Kampüs Raporu'nda belirtildiği üzere, Sakarya Büyükşehir Belediyesi personeli, organik atıkları toplayarak, anaerobik sindirim (AS) yöntemiyle işlenmek üzere belediyeye ait atık işleme tesisine teslim etmektedir. Anaerobik sindirim, oksijensiz bir ortamda organik maddelerin biyolojik olarak parçalanmasını sağlayan bir süreçtir. Bu süreç sonucunda, biyogaz (metan ve karbondioksit) ile besin açısından zengin bir yan ürün olan sindirim çamuru elde edilmektedir. Anaerobik sindirim süreci, su ayak izini doğrudan önemli ölçüde artırmasa da, atık hacmini azaltması ve su ile besin maddelerinin geri dönüşümüne katkı sağlaması sayesinde genel sürdürülebilirliğe olumlu etkiler sunmaktadır (Weiland, 2010).

Anaerobik sindirim sonrası su ayak izi (AS-SA), enerji geri kazanımı ve besin maddelerinin geri dönüşümünden kaynaklanan potansiyel su ayak izi azalması dikkate alınarak hesaplanabilmektedir. Bu hesaplama, anaerobik sindirim sürecinin verimliliği ve sağladığı faydalara bağlı olarak, toplam su ayak izindeki azalma yüzdesinin tahmini üzerinden gerçekleştirilir. Bu yöntem, geri dönüşüm süreçlerinin sürdürülebilirliğe

katkılarını değerlendirmek ve su ayak izinin azaltılmasındaki etkilerini analiz etmek amacıyla kullanılmaktadır.

Literatürde, anaerobik sindirimin, enerji geri kazanımı ve besin maddelerinin geri dönüşümü sayesinde, gıda atıklarının su ayak izinde yaklaşık %20–40 oranında bir azalma sağlayabileceği belirtilmektedir. Bu bağlamda, gıda atıklarına bağlı su ayak izi azaltımı, aşağıdaki formül kullanılarak hesaplanmıştır:

$$\text{Geri dönüşüm sonrası Su Ayak izi} = \text{su ayak izi}(1 - \text{Azalma oranı})$$

Bu çalışmada, üniversitenin gıda tüketiminin Türkiye’deki tipik bir karma diyetle benzediği varsayımıyla, gıda atıkları için ortalama 3,21 m³/kg su ayak izi değeri kullanılmıştır. Bu yaklaşım, hesaplama sürecini kolaylaştırmakla birlikte, atık bileşiminin bu ortalamadan sapması durumunda belirli bir hata payı içerebilir.

Anaerobik sindirimin (AS) su ayak izi azaltımına yönelik tahminleri, AS’nin enerji ve besin geri kazanımındaki etkinliğine ilişkin yaygın varsayımlara dayanmaktadır. Ancak bu tahminler, kullanılan AS teknolojisinin türüne ve işlem koşullarına bağlı olarak değişkenlik gösterebilir. Gıda türlerine ve AS performansına ilişkin spesifik veri eksikliği, hesaplamaların doğruluğunu sınırlamakta ve sonuçların yaklaşık değerler olarak değerlendirilmesine yol açmaktadır. Daha ayrıntılı gıda atığı bileşimi ve AS performansına yönelik verilerin kullanılmasıyla, gelecekte daha kesin sonuçlara ulaşılması mümkün olacaktır.

Üniversitenin dolaylı su ayak izine katkıda bulunan bir diğer önemli kaynak ise ofis ve ambalaj materyalleri başta olmak üzere ortaya çıkan kâğıt atıklarıdır. Literatürde, Riga Teknik Üniversitesi’ne ilişkin çalışmalarda geri dönüştürülebilir kâğıt türleri için su ayak izi değerleri şu şekilde belirtilmiştir:

- Karton atıklarının geri dönüşümü için: 22 m³/ton
- Geri dönüştürülebilir kâğıtların (örneğin A4 kâğıdı, gazete vb.) geri dönüşümü için: 24 m³/ton

Sakarya Üniversitesi, ofis kâğıdı, gazete, dergi ve karton ambalajlar dahil olmak üzere farklı türde kâğıt atıkları üretmektedir. Ancak, atık türlerine ilişkin ayrıntılı veri bulunmadığından, hesaplamalar Riga Teknik Üniversitesi verilerinden elde edilen ortalama su ayak izi değerlerine dayandırılmıştır. Üniversitede karışık kâğıt atıkları geri dönüşüme gönderilmekte, bu sürecin su ayak izi ise, toplam atık hacmi ve her bir

kâğıt türünü geri dönüştürmek için gereken su miktarı dikkate alınarak belirlenmiştir. Bu yöntem, veri eksikliği nedeniyle ortalama değerlere dayanmakta olup yaklaşık sonuçlar sunmaktadır. Sakarya Üniversitesi, 2022 yılı içerisinde geri dönüşüm için toplam 17.857,5 kg (19,6 ton) karışık kâğıt atığı toplamıştır. Bu miktar, farklı kâğıt türlerini içermekte ancak türler arasında ayırım yapılmamaktadır.

Karışık kâğıt atıklarının geri dönüşümüne bağlı ortalama su ayak izi, aşağıdaki şekilde hesaplanmıştır:

$$Su\ ayak\ izi\ (liter/ton) = \frac{22 + 24}{2}$$

$$Ağırlıklı\ Su\ Ayak\ İzi = 23\ m^3/ton$$

Bu hesaplama göre, karışık kâğıt atıklarının geri dönüşümü için ortalama su ayak izi ton başına 23 m³ olarak belirlenmiştir.

Türkiye, Letonya'ya benzer şekilde, Avrupa standartlarını karşılayan güçlü bir kâğıt geri dönüşüm altyapısına sahiptir. Ayrıca, üniversiteler tarafından üretilen kâğıt atıklarının bileşiminin büyük ölçüde benzer olduğu düşünülmektedir. Üniversiteler genellikle ofis kâğıdı, öğrenci çıktı belgeleri ve paketleme malzemeleri gibi atık türlerini yüksek miktarda üretmektedir. Bu benzerlik, Riga Teknik Üniversitesi'nden elde edilen su ayak izi verilerinin, Türkiye'deki üniversiteler için de anlamlı ve geçerli bir referans olabileceğini göstermektedir.

2.3. Yağmur Suyu Hasadı

Su ayak izinin değerlendirilmesinin ardından, kampüs için etkili bir su alternatifi yaratma hedefi, bu amaçla tasarlanmış bir yağmur suyu toplama sistemi önerisine yol açmıştır. Bu sistemin, mevcut su kaynakları üzerindeki baskıyı hafifleteceği öngörülmektedir. Çalışma, Sakarya Üniversitesi Esentepe Kampüsü'ndeki binaların çatılarından toplanabilecek yağmur suyu potansiyelini araştırmayı ve bu suyun yeşil alanları sulamak için kullanılmasının fizibilitesini değerlendirmeyi amaçlamaktadır.

Bu alt bölümde yağmur suyu hasadı için gerekli iklimsel verilerin toplanması ve analiz edilmesi açıklanır.

Sakarya, deniz seviyesinden 29,87 metre (98,0 fit) yükseklikte yer alır ve kuru mevsimin olmamasıyla karakterize edilen nemli bir subtropikal iklim yaşar. Şehrin en yüksek yıllık sıcaklığı 20,1 °C'ye ulaşırken, 1951'den 2023'e kadar olan dönemde

ortalama sıcaklık 14,7 °C'dir ve bu, Türkiye'deki ulusal ortalamanın %0,75 üzerindedir. Sakarya, yılda ortalama 846 milimetre yağış alır ve yılda 130,8 yağmur günü ile karakterizedir.

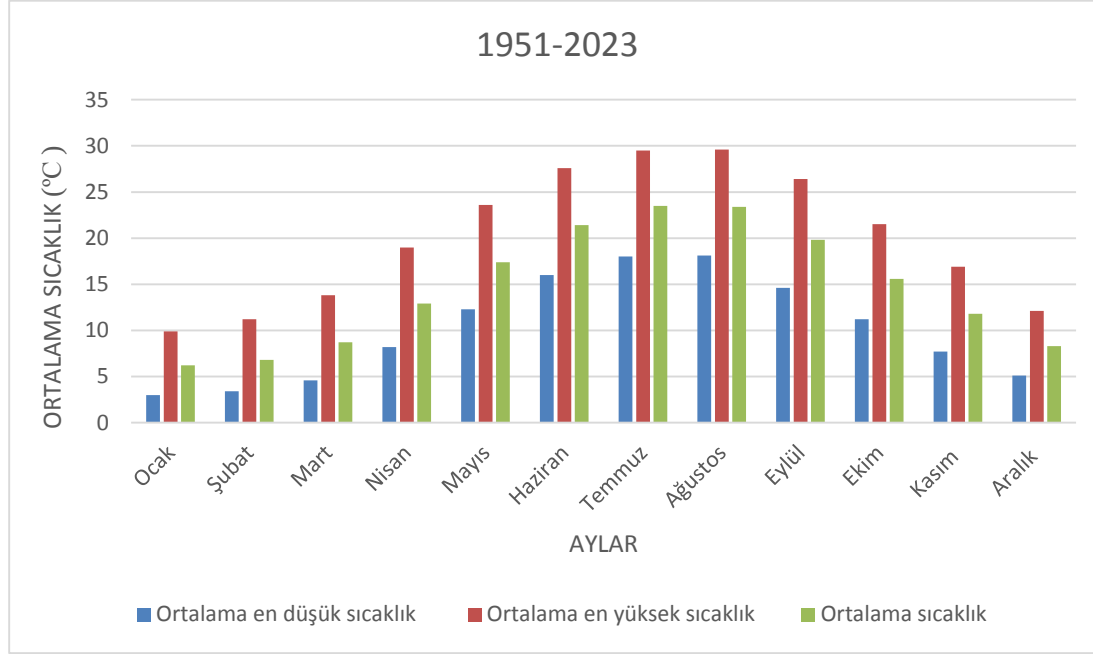
Bu meteorolojik veriler, yağmur suyu hasadı sisteminin tasarımında, çatı alanlarından toplanabilecek toplam yağmur suyu miktarını hesaplamak ve bu suyun yeşil alan sulama ihtiyaçları için kullanılabilirliğini değerlendirmek üzere temel girdi olarak kullanılmıştır.



Tablo 2.2. Sakarya'nın 72 yıllık meteorolojik verileri. ³

Sakarya	Ocak	Şubat	Mart	Nis	Mayıs	Haz	Tem	Ağust	Eyl	Ekim	Kas	Ara	Yıllık
Ölçüm periyodu (1951-2023)													
Ortalama sıcaklık (°C)	6.2	6.8	8.7	12.9	17.4	21.4	23.5	23.4	19.8	15.6	11.8	8.3	14.7
Ortalama en yüksek sıcaklık (°C)	9.9	11.2	13.8	19.0	23.6	27.6	29.5	29.6	26.4	21.5	16.9	12.1	20.1
Ortalama en düşük sıcaklık (°C)	3.0	3.4	4.6	8.2	12.3	16.0	18.0	18.1	14.6	11.2	7.7	5.1	10.2
Ortalama güneşleme süresi (saat)	2.5	3.2	4.0	5.3	6.6	8.0	8.9	8.5	6.9	4.7	3.5	2.5	5.4
Ortalama yağışlı gün sayısı	15.40	14.06	13.91	11.50	10.17	8.77	5.83	5.79	7.47	10.83	11.71	15.41	130.8
Aylık toplam yağış miktarı ortalama (mm)	93.3	76.3	75.7	59.4	53.3	74.9	50.1	49.4	51.5	78.9	76.5	106.7	846.0
Ölçüm periyodu (1951-2023)													
En yüksek sıcaklık (°C)	26.5	28.7	31.9	35.8	38	40.4	44	41.8	40.7	38.6	30.2	28.5	44
En düşük sıcaklık (°C)	-14.5	-13.5	-7.3	-2.4	2.0	6.1	8.7	7.8	5.4	-0.2	-6.6	-8.1	-14.5

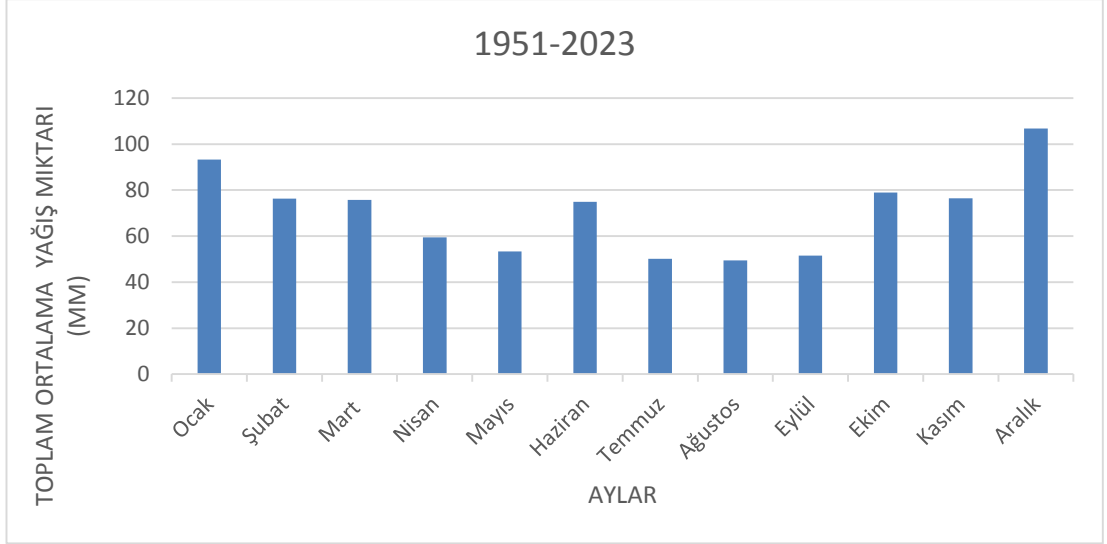
Bu bölümde, 1951-2023 dönemine ait aylık ve yıllık maksimum, minimum ve ortalama sıcaklık verilerinin analizi sunulmaktadır. Bu analiz, uzun dönemli sıcaklık eğilimlerini ve mevsimsel değişimleri değerlendirmek amacıyla hazırlanmıştır.



Şekil 2.2. Sakarya'nın 72 yıllık sıcaklık analizi.

Yağmur suyu toplama sisteminin verimliliği, yerel su talebi, maliyet etkinliği ve yağış miktarları gibi çeşitli faktörlerden etkilenir. Bu sistemlerin uygulanabilirliğini değerlendirmek için yağış verilerini analiz etmek esastır. Bu veriler, çatı alanı ve yağış derinliği dikkate alınarak hasat edilebilecek su hacminin tahmin edilmesini sağlar. Bu tür bilgiler, daha sonra toplanan su hacmini su talebiyle karşılaştırmak için kullanılabilir.

Bu bölüm, 1951'den 2023'e kadar olan yılları kapsayan aylık ve yıllık yağış verilerinin bir analizini sunar. Yağış, aylar boyunca eşit olarak dağılmamıştır ve günlük yağış seviyeleri yıldan yıla dalgalanmaktadır. Mevsimsel bir değerlendirme, yağışın kış aylarında daha yoğun olma eğiliminde olduğunu, yaz aylarının ise genellikle kuru geçtiğini ortaya koymaktadır.



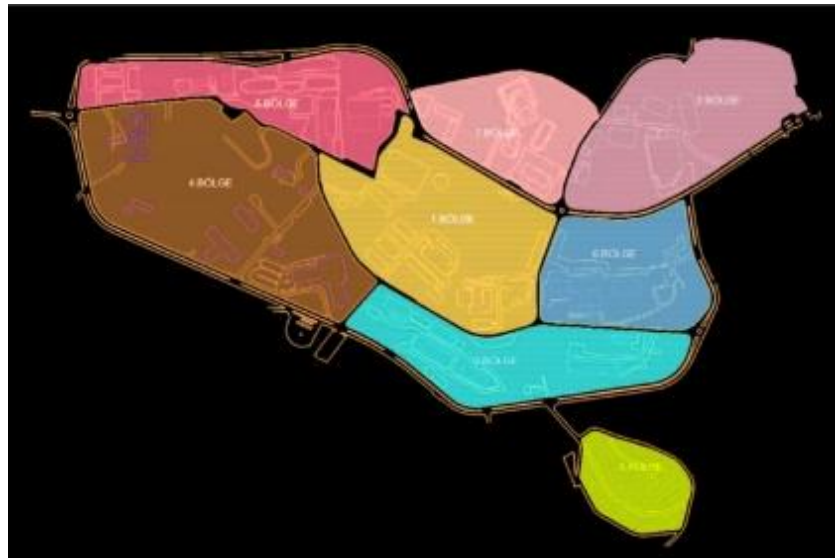
Şekil 2.3. Sakarya'nın 72 yıllık yağış analizi.

2.3.1. Sistem planlaması

Yağmur suyu hasat sisteminin temel tasarım kriterleri bu bölümde sunulur.

Çalışmanın ilk aşamasında, üniversite yerleşkesi içerisindeki yeşil alanların belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu kapsamda, alan ölçümleri için kullanıcı dostu araçlara sahip olan Google Earth Pro yazılımı tercih edilmiştir. Kampüs sınırları, Google Earth Pro'da yer alan uydu görüntüleri kullanılarak tanımlanmış ve kampüs alanı toplamda sekiz farklı bölgeye ayrılmıştır.

Belirlenen sınırların doğruluğunu teyit etmek amacıyla üniversitenin resmi haritası ile uydu görüntüleri çapraz bir şekilde karşılaştırılmıştır. Bu yöntem, kampüs sınırlarının kesin olarak tanımlanmasını ve yeşil alan ölçümlerinin güvenilirliğini sağlamıştır.



Şekil 2.4. Sakarya üniversitesi'nin 8 bölgesi.

Üniversite kampüsündeki yeşil alanlar (çimler, bahçeler ve ormanlık alanlar dâhil), uydu görüntüleri aracılığıyla görsel olarak tanımlanmıştır. Her bir alanın sınırları, Google Earth Pro yazılımındaki poligon aracı kullanılarak titizlikle çizilmiş ve yazılımın sağladığı gerçek zamanlı alan hesaplamaları metrekare cinsinden belge altına alınmıştır. Poligon aracı, kullanıcıların belirli alanlar etrafında şekiller oluşturarak bu bölgelerin yüzey alanlarını otomatik olarak hesaplamasına olanak sağlamaktadır. Belirlenen her yeşil alan, doğru bir şekilde etiketlenmiş ve ölçümlerin güvenilirliğini sağlamak amacıyla aynı bölgeler farklı yakınlaştırma seviyelerinde tekrar ölçülerek sonuçlar karşılaştırılmıştır. Tespit edilen tutarsızlıklar yeniden değerlendirilmiş, en tutarlı veriler seçilerek nihai değerlere ulaşılmıştır. Tüm bireysel yeşil alan ölçümleri bir araya getirilerek üniversite yerleşkesinin toplam yeşil alan büyüklüğü hesaplanmıştır. Aşağıda, kampüs sınırları içerisinde yer alan sekiz farklı bölgeye ait yeşil alan ölçümleri sunulmaktadır:

Tablo 2.3. Bölgelere göre yeşil alanı.

Bölge	Yeşil Alan (m ²)
1	19.739
2	11.895
3	12.000
4	48.115
5	25.562
6	33.228
7	17.520
8	12.318
Toplaam	180.377

Bu ölçümler, yalnızca mevcut arazi kullanımını belirlemek amacıyla değil; aynı zamanda kampüs genelinde sürdürülebilir su yönetimi uygulamalarını planlamak için temel veri olarak kullanılmaktadır. Özellikle, yağmur suyu toplama sistemi kurulmasına yönelik yapılacak tasarım çalışmalarında, bu yeşil alanların su ihtiyacının doğru bir şekilde belirlenmesi büyük önem taşımaktadır. Yağmur suyu toplama ünitesi kurmanın temel amacı, mevcut su kaynağına olan talebi azaltmak ve toplanan yağmur suyunu kullanarak kampüsün yeşil alanlarına su sağlamaktır. Bu hedefe ulaşmak için, kampüsteki yeşil alanların su gereksinimlerini doğru bir şekilde değerlendirmek esastır.

Su ihtiyacı hesaplamasında, her bölgenin toplam yeşil alan büyüklüğü ile sulama gereksinimlerine ilişkin veriler dikkate alınacaktır. Bu hesaplamalar, yağmur suyu hasadı sisteminin tasarımı ve uygulanabilirliği için temel veri niteliği taşımaktadır.

Yeşil alanların su ihtiyacı hesaplanırken, her bir sulama için kullanılan su miktarı 5 lt/m² (0,005 m³/m²) olarak kabul edilmiştir. Bu miktar, normal koşullarda yeşil alanların bakımını sağlamak için gereken su miktarını temsil etmektedir.

Tablo 2.4. Yeşil suların su ihtiyacı.

Bölge	Yeşil alan (m ²)	Yeşil alan su ihtiyacı (m ³)
1	19.739	98
2	64.177	320
3	12.000	60
4	48.115	240
5	25.562	127
6	33.228	166
7	17.520	87
8	12.318	61
Toplam	180.377	1.159

Eğer yeşil alanlar haftada bir kez sulanırsa, yıllık su ihtiyacı aşağıdaki formül kullanılarak hesaplanabilir:

$$\text{Haftalık su ihtiyacı} = \text{günlük su ihtiyacı(m}^3\text{)} * 52 \text{ hafta}$$

Tablo 2.5. Haftalık sulama ihtiyacı.

Bölge	Haftalık Sulama Durumunda Su İhtiyacı (m ³)
1	5.096
2	16.640
3	3.120
4	12.280
5	6.604
6	8.632
7	4.524
8	3.172
Toplam	59.068

Bu hesaplamalar, yağmur suyu hasadı sistemi tasarımı için gerekli su ihtiyacı verilerini sağlamaktadır.

2.3.2. Çatı alanı analizi ve hasat potansiyeli

Bu çalışmada, Sakarya Üniversitesi Esentepe Kampüsü'nde yer alan binaların çatı yüzeylerinden toplanabilecek yağmur suyu potansiyelinin belirlenmesi ve bu suyun

kampüs içerisindeki yeşil alanların sulama ihtiyaçlarında kullanılabilirliği değerlendirilmiştir. Üniversitedeki çatı alanları, blok yapı malzemelerinden oluşmaktadır.

Binaların çatı yüzeylerinden toplanabilecek yağmur suyu miktarı, aşağıdaki formül kullanılarak hesaplanmıştır:

$$\begin{aligned} & \text{çatıdan toplanan yağmur suyu miktarı}(m^3) \\ & = \text{yağış derinliği} * \text{çatı alanı} * \text{çatı katsayısı} * \text{filtre katsayısı} \end{aligned}$$

Sakarya için 72 yıllık ortalama yıllık yağış derinliği 846 mm olarak belirlenmiştir. Alman DIN 1989 standartlarına göre, çatı katsayısı 0,8 olarak alınmıştır(Toyran & Var, 2022).Bu katsayı, çatıya düşen yağmurun tamamının geri kazanılamayacağını göstermektedir. Aynı standartlara göre, filtre katsayısı 0,9 olarak belirlenmiştir ve bu katsayı, yağmur suyunun ilk filtrasyon işleminde görülebilir katı parçacıkların ne kadar etkin bir şekilde temizlendiğini ifade etmektedir.

Hesaplama şu şekilde sadeleştirilebilir:

$$\begin{aligned} & \text{çatıdan toplanan yağmur suyu miktarı} \\ & = \text{çatı alanı} (m^2) * 0,9 * 0,8 * \text{yıllık yağış derinliği}(mm) \end{aligned}$$

Bu hesaplama yöntemi, çatı yüzeylerinden toplanabilecek toplam yağmur suyu miktarını tahmin etmek ve yeşil alanların sulama ihtiyaçlarına yönelik uygun su hasadı sisteminin tasarımına ilişkin gerekli verileri sağlamak amacıyla kullanılmıştır.

Aşağıda, kampüs içerisindeki çatı yüzeylerine ait özellikler ile bu yüzeylerden hasat edilebilecek yağmur suyu potansiyeli verilmiştir.

Tablo 2.6. Bölgelerin çatı alanı ve yağmur suyu miktarı.

Bölge	Bina sayısı	Çatı alanı (m ²)	Toplanan Yağmur Suyu (m ³)
1	14	10.250	
2	8	11.895	7.245
3	8	10.525	6.410
4	13	11.528	7.021
5	15	11.250	6.852
6	11	7.479	4.555
7	8	3.477	2.117
8	9	6.440	3.922
Toplam	86	72.844	44.365

Bu potansiyel değerlendirmenin ardından, yağmur suyu hasadının uygulanabilirliğini daha doğru analiz edebilmek adına, kampüs içerisindeki yapıların mimari özellikleri de dikkate alınmıştır. Sakarya niversitesi, sınıflar, laboratuvarlar, ofisler, kafeteryalar ve yemekhaneler de dâhil olmak üzere önemli sayıda binaya sahiptir. Bu yapıların çoğu tek katlı olsa da, bazıları iki veya üç katlı büyük konut bölümleri içermektedir. Çoğu bina, yağmur suyunu toplamak ve hasat etmek için ideal olan düz atılarla kaplıdır. Buna karşılık, eski veya geleneksel tasarımı binalar genellikle hafif ila orta eğimli çatılara sahiptir. Eğimli atılar da yağmur suyu toplanmasını kolaylaştırabilse de, iyi planlanmış bir yağmur suyu hasat sistemini gerektirdiğini vurgulamak önemlidir. Bu alışma, toplanan yağmur suyunun kampüsteki yeşil alanları sulamak için kullanılacağını varsaymaktadır.

Sakarya niversitesi'ndeki binaların çatıları genellikle düz veya hafif eğimli olduğundan, yağmur suyu hasadı için oldukça uygun yapıdadır.



şekil 2.5. Sakarya niversitesi'nin çatı alanı.

Kampüs içerisinde toplam 86 bina bulunmakta ve bu binalar 8 bölgeye ayrılmıştır. Her bölge için, yeşil alanlara en yakın konumdaki bir binanın çatı alanı dikkate alınmıştır. Çatı alanlarının ölçümü, Google Earth yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Çatılardaki hafif eğimlerden veya hesaplama hatalarından kaynaklanabilecek alan farklılıkları, eğimlerin önemsiz düzeyde olması nedeniyle ihmal edilmiştir.

Gerekli çatı alanını hesaplamak için kullanılan formül:

$$\text{Alan}(m^2) = \text{Gerekli yağmursuyu miktarı}(m^3) * \text{yıllık yağış derinliği (mm)} \\ * \text{çatı katsayısı} * \text{Filter katsayısı}$$

Bu formül, belirli bir su ihtiyacını karşılayabilmek için gerekli olan çatı alanını belirlemek amacıyla kullanılmaktadır. Hesaplamalar sırasında, yıllık yağış miktarı, çatı katsayısı ve filtre katsayısı gibi önemli parametreler dikkate alınmıştır. Bu hesaplamalar, kampüsün yeşil alanlarının sulama ihtiyaçlarını karşılamak üzere tasarlanacak yağmur suyu hasadı sistemi için temel veri sağlamaktadır.

Bu çerçevede, Sakarya Üniversitesi'ne ait mevcut yeşil alan büyüklükleri esas alınarak yapılan aşağıdaki hesaplamalar, gerekli çatı alanını, yağmur suyu toplama potansiyelini ve haftalık sulama ihtiyaçlarına göre önerilen su deposu hacmini ortaya koymaktadır.

Tablo 2.7. Sulama için su ihtiyacı.

Bölge	Yıllık sulama ihtiyacı (m ³)	Haftalık sulama ihtiyacı (m ³)	Gerekli çatı alanı (m ²)
1	98	5.096	7.530
2	320	16.640	24.586
3	60	3.120	4.610
4	240	12.280	18.144
5	127	6.604	9.758
6	166	8.632	12.754
7	87	4.524	6.684
8	61	3.172	4.686

Bu veriler doğrultusunda, her bölgedeki mevcut çatı alanlarının gerçekten bu su ihtiyacını karşılayıp karşılayamayacağı analiz edilmiştir. Aşağıdaki tabloda, bölgelerin mevcut çatı yüzeyleri üzerinden hesaplanan yağmur suyu hasadı potansiyelleri sunulmuştur. Böylece teorik ihtiyaç ile fiili potansiyel arasında karşılaştırma yapılması mümkün kılınmıştır.

Tablo 2.8. Bölgelerin çatı alanı ve yağmur suyu miktarı.

Bölge	Çatı alanı (m ²)	Yağmur Suyu Hasadı Potansiyeli (m ³)
1	7.529	5.096
2	24.586	16.640
3	4.610	3.120
4	18.144	12.280
5	9.758	6.604
6	12.754	8.632
7	6.684	4.524
8	4.686	3.172

Elde edilen bu hesaplamalar doğrultusunda, sistemin fiziksel uygulama koşulları da değerlendirilmiştir. Yağmur suyu hasadı tanklarının yerleştirilmesi için binaların çatıları tercih edilmiştir. Bu yöntem, maliyetlerin düşürülmesine olanak tanırken, tankların yüksek yerlere yerleştirilmesi pompa basıncını azaltarak enerji tasarrufu sağlamaktadır. Ancak tüm çatı alanları, tank yerleştirmeye uygun değildir. Çatının şekli, yapısal özellikleri ve yeşil alanlara olan mesafesi gibi faktörler dikkate alınmıştır. Bu kapsamda belirlenen uygun alanlar aşağıdaki tabloda sunulmuştur:

Tablo 2.9. Toplam alanı.

Bölge	Binalar	Kullanılabilir Yağış Alanı (m ²)	Toplam Yağış Alanı (m ²)
1	Mühendislik Fakültesi Dekanlığı	697	6599
	İletişim Fakültesi	739	
	Mühendislik Fakültesi M3	1051	
	M4 Mühendislik Binası	695	
	Uluslararası Ofis	1123	
	Kütüphane	1290	
	Rektörlük İlk Bina	1004	
2	Mediko	546	3241
	Fen-Edebiyat Fakültesi	1315	
	Kapalı Spor Salonu	1380	
3	Sanat Tasarım ve Mimarlık Fakültesi	1753	7590
	T4 Elektrik-Elektronik Mekatronik	2048	
	Dekanlık	925	
	T1 bina	910	
	T3 bina	1954	

Tablo 2.9. (Devamı) Toplam alanı.

Bölge	Binalar	Kullanılabilir Yağış Alanı (m ²)	Toplam Yağış Alanı (m ²)
4	M5 Endüstri Mühendisliği	910	14,625
	M6 Elektrik-Elektronik Müh.	924	
	Kongre Merkezi	2448	
	M7 Makine Mühendisliği	1944	
	M8 mühendislik bina	937	
	Personel Yemekhanesi	1805	
	Bilgisayar ve Bilişim Sistemleri	384	
	Yazılım	1059	
	İlahiyat Fakültesi	4446	
	İlahiyat Fakültesi Kafeterya	668	
5	Fen Fakültesi A Blok	1201	3613
	Fen Fakültesi B Blok	566	
	Fen Fakültesi C Blok	1201	
	Bilinmeyen Bina	185	
	İslam Ekonomi ve Finans Araştırma Merkezi	460	
6	Hukuk Fakültesi	1114	4703
	Siyasal Bilimler Fakültesi	900	
	İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi	1144	
	İşletme Fakültesi	545	
	İşletme Enstitüsü	1000	
7	Kampüs Çarşı	400	3510
	Ziraat Bankası	534	
	SAÜ Yabancı Dil C Blok	1083	
	Fen-Edebiyat Fakültesi Tarih-Sosyoloji	1493	
8	Esentepe Yurdu	564	564

Belirlenen bu çatı alanlarına yağmur suyu toplama sisteminin entegre edilebilmesi için, yalnızca alan yeterliliği değil, aynı zamanda uygun hacimde depolama çözümleri geliştirilmesi de gerekmektedir. Bu nedenle, tank boyutlandırması sistemin verimliliği açısından kritik bir adımdır. Yağmur suyu toplama sisteminde, depolama tankı oldukça pahalı olabilir. Bu nedenle, tankın çatıdan toplanabilecek yağmur suyu miktarına uygun boyutta olduğundan emin olmak önemlidir. Bu şekilde, gerçekten ihtiyaç duyulmayan büyük bir tanka sahip olmadan maliyetten tasarruf edilebilir ve yağmur

suyu daha verimli kullanılabilir. Tankın doğru boyutta olması, yağmur suyunun etkin şekilde kullanılmasını ve israf edilmemesini sağlar.

Tank kapasitesinin belirlenmesinin ardından, bu suyun toplanıp yönlendirilmesini sağlayacak sistem bileşenleri de dikkatle planlanmalıdır. Bu bileşenlerin başında, çatıdan suyun etkin şekilde toplanmasını sağlayan oluklar gelmektedir. Bu çalışmada, depolama tankının boyutunu belirlemek için Hızlı Tükenme Yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntem, toplanan yağmur suyunun depolandıktan hemen sonra kullanıldığını varsayar. Sonuç olarak, nominal boyutlardaki tankların yeterli olacağı ve büyük depolama tesisleri inşa etme ihtiyacını ortadan kaldıracağı sonucuna varılmıştır. Çatı alanına dayanarak, 50 m³, 75 m³ ve 100 m³ kapasiteli tankların yeterli olacağı belirlenmiştir.

Oluklar, çatıdan toplanan yağmur suyunu depolama tankına yönlendiren sistemin ilk elemanıdır. Tasarımları ve kurulumları, hasat edilen yağmur suyunun hem miktarını hem de kalitesini ve sistemin bakım ihtiyaçlarını önemli ölçüde etkiler. Oluklar; dikdörtgen, saçak tarzı veya dairesel şekillerde tasarlanabilir. İçme suyu temini için tasarlanan yağmur suyu toplama sistemlerinde, kurşun içeren olukların kullanılmasından kaçınılması önerilir; çünkü yağmur suyunun asidik yapısı kurşunu sızdırabilir ve böylece su kaynağını kirletebilir. Bu tür riskleri azaltmak için, oluk ve damlatıcıların üretiminde genellikle PVC, vinil, boru, dikişsiz alüminyum ve galvanizli çelik gibi malzemeler kullanılır.

Olukları takarken, suyun iniş borularına doğru akmasını kolaylaştırmak için uygun bir eğim oluşturmak önemlidir. Ayrıca, olukların dış yüzeyi, suyu bina duvarlarından uzağa yönlendirmek için iç yüzeyden daha alçakta konumlandırılmalıdır. Bu tasarım, verimli drenajı destekler ve binanın duvarlarına zarar gelmesini önlemeye yardımcı olur.

2.4. Maliyet Analizi

Yağmur suyu hasadı (YSH) sisteminin en büyük avantajı, su tasarrufu sağlamasıdır ve bu tasarruf, ekonomi üzerinde önemli olumlu etkiler yaratır. Bu etkileri değerlendirebilmek için, maliyet ile su tasarrufu arasındaki ilişkiyi ortaya koyan kapsamlı bir maliyet analizi gerçekleştirilmiştir.

Bir projeye harcamamız gereken para ikiye ayrılabilir: projeyi başlatmak için harcadığımız para (yatırım maliyeti) ve onu ayakta tutmak için harcadığımız para (işletme maliyeti).

Yatırım maliyeti, pompalar, yağmur suyu toplama tankları, filtreler ve boru hatları gibi bileşenlerle ilişkili masrafları kapsar. Ayrıca, pompaların her 10 yılda bir değiştirileceği varsayılmış ve bu maliyet yatırım bütçesine dâhil edilmiştir. Yatırım maliyeti, tek seferlik bir harcamayı yansıtır.

İşletme maliyetleri, pompalama işlemleri için gerekli elektrik maliyetini, temizlik ve bakım maliyetlerini içermektedir. Toplam maliyet şu şekilde ifade edilebilir:

$$\text{Toplam maliyet} = \text{yatırım maliyet} + \text{işletme maliyet}$$

Proje, iki tip boru sistemini kapsamaktadır: dağıtım boruları ve hasat boruları. Boruların toplam maliyeti; malzeme, kurulum ve işçilik masraflarını içerir ve doğrudan boruların uzunluğuyla ilişkilidir. Pompanın kullanım ömrünün 10 yıl olduğu tahmin edilmektedir ve bu süreden sonra değiştirilmesi gerekeceği varsayılmaktadır. Filtrenin maliyeti ise, filtrelerin genellikle toplayıcıların sonuna yerleştirilmesi nedeniyle, toplayıcı sayısına göre değişiklik göstermektedir.

İşletme maliyetleri ise; temizlik, bakım ve suyun pompalanması için gereken elektrik maliyetlerini kapsamaktadır. Bu maliyetler, sistemin kullanım ömrü boyunca her yıl düzenli olarak ortaya çıkacaktır. Bu tür tekrarlayan maliyetlerin uzun vadeli etkisini değerlendirmek amacıyla, bugünkü değer hesaplaması yapılmıştır.

$$P = F(1 + i)^n$$

Bu formülde P: Gelecekteki değerin bugünkü değeri, **F:** Gelecek değer, **i:** İskonto oranı , **n:** Gelecek değerin gerçekleşeceği yılı ifade eder.

YSH sistemlerinin temizlenmesi oldukça kolaydır. Yıllık temizlik için 2 işçinin bir günlük çalışmasının yeterli olacağı varsayılmıştır. Bu temizlik maliyeti, sistemin ömrü boyunca her yıl tekrar eden yıllık bir maliyettir. Elektrik maliyeti, belirli bir yılda RHT'den toplanan toplam su miktarının (m³), o yıl için birim elektrik maliyeti (TL/m³) ile çarpılması yoluyla hesaplanır.

Yağmur suyu hasadı sistemlerinin ekonomik avantajları, ürettikleri su tasarruflarıyla yakından bağlantılıdır. Bu tasarruflar hem yatırım hem de işletme giderlerini telafi

ederek ekonomik olarak uygulanabilir bir projeyle sonuçlanır. Korunan su hacmi, hem çevresel hem de finansal açıdan sürdürülebilir bir fayda sunmaktadır.





3. SONUÇLAR

Bu bölüm, Sakarya Üniversitesi'nde yürütülen su ayak izi analizinin bulgularını sunmaktadır. Bu çalışmanın birincil amacı, kampüsteki toplam su kullanımını değerlendirmek ve suyun çeşitli alanlarda nasıl tüketildiğine dair daha derin bir anlayış elde etmektir. Ancak mevcut veri kaynaklarının sınırlılıkları nedeniyle, yeşil, mavi ve gri su kategorilerini ayrı ayrı incelemek yerine toplam su tüketimine odaklanılmıştır.

3.1. Doğrudan Su Tüketimi

Sakarya Üniversitesi'ndeki doğrudan su tüketimine ilişkin veriler, üniversitenin tesis yönetim birimi tarafından düzenli olarak yapılan sayaç okumalarından ve kayıtlarından elde edilmiştir. Bu veriler, akademik binalar, yerleşim binaları, peyzaj alanları ve diğer operasyonel faaliyetler gibi kampüsün çeşitli alanlarında gerçekleştirilen doğrudan su tüketimini kapsamaktadır. Toplanan verilere ilişkin detaylar şu şekildedir:

Tablo 3.1. 2022 Su tüketim.

Aylar	Tüketim (m ³)
Ocak	5.010,11
Şubat	5.457,33
Mart	5.778,56
Nisan	6.502,21
Mayıs	6.889,41
Haziran	7.402,58
Temuz	7.699,75
Ağustos	7.441,61
Eylül	4.512,49
Ekim	4.699,54
Kasım	4.471,88
Aralık	4.323,98
Toplam	70.189,45

Tablo 3.2. 2023 Su tüketim.

Aylar	Tüketim (m ³)
Ocak	5.650,51
Şubat	4.269,18
Mart	6.209,28
Nisan	5.201,05
Mayıs	3.615,60
Haziran	5.140,83
Temmuz	4.502,93
Ağustos	4.692,69
Eylül	3.264,02
Ekim	6.663,11
Kasım	8.397,87
Aralık	8.926,96
Toplam	66.534,04

Doğrudan su ayak izi, toplam su tüketimine eşittir. Bu ayak izi yalnızca doğrudan tüketimi ifade ettiğinden, mevcut veri yalnızca toplam su tüketimini içeriyorsa yeşil, mavi veya gri su gibi ayrıntılı bir ayırım yapılmasına gerek yoktur. Buna göre, Sakarya Üniversitesi'nin 2022 yılına ait toplam su ayak izi 70.189,45 m³, 2023 yılına ait toplam su ayak izi ise 66.534,04 m³ olarak hesaplanmıştır.

3.2. Dolaylı Su Ayak İzi

Sakarya Üniversitesi'nin dolaylı su ayak izi; üniversitede tüketilen elektriğin üretimi sırasında kullanılan su, gıda üretimi ve geri dönüşüm sürecinde kullanılan su ile kağıt atıklarının geri dönüşümü sırasında kullanılan su analiz edilerek belirlenmiştir. Dolaylı su kullanımı, üniversitenin genel su ayak izine önemli ölçüde katkıda bulunmakta ve kapsamlı bir değerlendirme gerektirmektedir.

3.2.1. Elektrik için su ayak izi

Sakarya Üniversitesi'nin 2022 ve 2023 yıllarına ait toplam elektrik tüketimi şu şekildedir:

Tablo 3.3. 2022 Yılın elektril tüketimi.

Aylar	Tüketim (kwh)
Ocak	1.030.560,31
Şubat	892.942,29
Mart	1.183.679,82
Nisan	760.615,38
Mayıs	692.059,52
Haziran	726.729,73
Temmuz	653.767,48
Ağustos	877.980,28
Eylül	622.318,68
Ekim	787.531,71
Kasım	875.179,23
Aralık	1.030.509,32
Toplam	10.133.873,74

Tablo 3.4. 2023 yılın elektrik tüketimi.

Aylar	Consumption (kwh)
Ocak	884.454,16
Şubat	775.319,18
Mart	722.815,93
Nisan	624.406,43
Mayıs	604.007,67
Haziran	471.523,34
Temmuz	755.328,85
Ağustos	809.695,39
Eylül	523.012,81
Ekim	634.267,47
Kasım	780.805,54
Aralık	893.023,43
Toplam	8.478.660,20

Yöntem bölümünde belirtildiği üzere, Sakarya Üniversitesi'nde tüketilen elektrik enerjisinin önemli bir kısmı yenilenebilir enerji kaynaklarından (rüzgâr ve güneş enerjisi) sağlanmaktadır. Ayrıca, bir miktar enerji de hidroelektrik santrallerinden elde

edilmektedir. Rüzgâr ve güneş enerjisi gibi yenilenebilir enerji kaynakları için su ayak izi sıfır olarak kabul edilmiştir. Ancak hidroelektrik enerji üretimi için su ayak izi hesaplanmıştır. Türkiye’de hidroelektrik enerji üretimi için su ayak izi, yaklaşık olarak 22 m³/GJ (gigajoule başına metreküp) olarak belirlenmiştir. Bu hesaplama, Su Ayak İzi Ağı (WFN) metodolojisi temel alınarak yapılmıştır.

2022 Yılı İçin Elektrik Tüketimi İçin hesaplandığı Su Ayak İzi :

$$Su\ ayak\ izi = Toplam\ enerji\ tüketim(GJ)$$

$$* Birim\ enerji\ başına\ su\ ayak\ izi(m^3/GJ)$$

$$Toplam\ Enerji\ (GJ) = 101.133.873.74Kwh * 0.0036$$

$$Toplam\ Enerji(GJ) = 36.481,9GJ$$

$$Su\ Ayak\ izi = 36.481,9GJ * 22\ m^3/GJ$$

$$Su\ Ayak\ izi = 802.601,8\ m^3$$

2023 Yılı İçin Elektrik Tüketimi İçin hesaplandığı Su Ayak İzi:

$$Toplam\ Enerji\ (GJ) = 8.478.660,20Kwh * 0.0036$$

$$Toplam\ Enerji(GJ) = 30.523,17GJ$$

$$Su\ Ayak\ izi = 30.523,17GJ * 22\ m^3/GJ$$

$$Su\ Ayak\ izi = 671.509,74m^3$$

Heriki yılın toplam su ayak izi = 2022 yılın Su ayak izi + 2023 yılın Su ayak izi

$$Toplam\ su\ ayak\ izi = 1.474.111,54m^3$$

3.2.2. Gıda atıklarının su ayak izi

Toplanan verilere göre, Sakarya Üniversitesi’nde 2022 yılına ait gıda atıkları yaklaşık 279,3 ton, 2023 yılına ait gıda atıkları ise yaklaşık 210ton olarak hesaplanmıştır. Su ayak izi, aşağıdaki formül kullanılarak hesaplanmıştır:

$$Su\ Ayak\ izi_{(Gıda)} = Tüketilen\ her\ gıda\ türünün\ miktarı * Birim\ su\ ayak\ izi$$

Ancak, gıda atıkları türlerine göre ayrılmadığından, 2022 yılı için toplam gıda atıkları miktarı 253.386,5 kg olarak hesaplanmıştır. Buna bağlı olarak, su ayak izi şu şekilde bulunmuştur:

$$Su \text{ ayak izi} = 253.386,5kg * 3.21 m^3/kg$$

$$Su \text{ Ayak izi} = 813.369m^3$$

2023 yılı için ise, toplam gıda atıkları miktarı 190.509 kg olarak hesaplanmıştır:

$$Su \text{ Ayak izi}_{Gıda} = 190.509kg * 3.21 m^3/kg$$

$$Su \text{ Ayak izi}_{Gıda} = 611.533,89m^3$$

Raporlarda belirtildiği üzere, gıda atıkları daha sonra anaerobik sindirim sürecine tabi tutulmaktadır. Bu süreç, enerji geri kazanımı ve besin maddesi geri dönüşümü sayesinde su ayak izinde yaklaşık %20–40 oranında bir azalma sağlamaktadır.

Su ayak izi, aşağıdaki formül ile yeniden hesaplanmıştır:

$$Geri \text{ dönüşüm sonrası } Su \text{ Ayak izi} = su \text{ ayak izi}(1 - Azalma \text{ oranı})$$

$$Geri \text{ dönüşüm sonrası } SA_{2022} = 813.369(1 - 0,30)$$

$$Geri \text{ dönüşüm sonrası } SA_{2022} = 569.358,3m^3$$

%30 oranındaki bir azalma, 2022 yılı için su ayak izini 813.369 m³'ten 569.358,3 m³'e düşürmüştür.

$$Geri \text{ dönüşüm sonrası } SA_{2023} = 611.533,89(1 - 0,30)$$

$$Geri \text{ dönüşüm sonrası } SA_{2023} = 428.073,723m^3$$

%30 oranındaki bir azalma, 2023 yılı için su ayak izini 611.533,89 m³'ten 428.073,723 m³'e düşürmüştür.

3.2.3. Kağıt atıkları için su ayak izi

Sakarya Üniversitesi'nde, 2022 ve 2023 yıllarında sırasıyla 19,68 ton ve 16,1 ton kâğıt atığı üretilmiştir. Ağırlıklı ortalama göre, ton başına su tüketimi 23 m³/ton olarak hesaplanmıştır.

2022 Yılı İçin Su Ayak İzi Hesaplaması

$$Su \text{ Ayak izi}_{kağıt} = 19,6ton * 23 m^3/ton$$

$$Su \text{ Ayak izi}_{kağıt} = 450,8 m^3$$

2023 Yılı İçin Su Ayak İzi Hesaplaması

$$Su\ Ayak\ izi_{kağıt} = 16,1ton * 23\ m^3/ton$$

$$Su\ Ayak\ izi_{kağıt} = 370,3\ m^3$$

3.3. Toplam Su Ayak İzi

2022 ve 2023 yılı için hesapladığı Toplam Su Ayak İzi budur:

$$Toplam\ su\ Ayak\ izi = Doğrudan\ SA + Dolaylı_{Elektrik+Gıda+kağıt}SA$$

$$\begin{aligned} &Toplam\ su\ Ayak\ izi_{2022} \\ &= 70.189,45m^3 + 802.601,8m^3 + 569.358,3m^3 + 450,8m^3 \end{aligned}$$

$$Toplam\ su\ Ayak\ izi_{2022} = 1.442.600,35m^3$$

$$\begin{aligned} &Toplam\ su\ Ayak\ izi_{2023} \\ &= 66.534,04m^3 + 671.509,74m^3 + 428.073,723m^3 + 370,3m^3 \end{aligned}$$

$$Toplam\ su\ Ayak\ izi_{2023} = 1.166.487,803m^3$$

Sakarya Üniversitesi'nin su ayak izi analizi, yıllık toplam su ayak izinin 1.442.600,35 m³ olduğunu göstermiştir. Bu toplamın %4,86'sı doğrudan su kullanımı (içme, temizlik, sulama), %55,6'sı dolaylı su kullanımı (enerji tüketimi) ve %39,4'ü gıda atıklarından kaynaklanmaktadır. Gıda atıklarına bağlı su ayak izi, anaerobik sindirim öncesinde %56 iken, bu işlem sonrasında %39,4'e düşmüştür. Kâğıt atıklarının 2022 yılı su ayak izine katkısı ise yalnızca %0,03'tür.

2023 yılına ait yıllık toplam su ayak izi ise 1.166.487,803 m³ olarak hesaplanmıştır. Bu toplamın %5,7'si doğrudan su kullanımı (içme, temizlik, sulama), %57,5'i dolaylı su kullanımı (enerji tüketimi) ve %36,6'sı gıda atıklarından kaynaklanmaktadır. Gıda atıklarına bağlı su ayak izi, anaerobik sindirim öncesinde %56 iken, bu işlem sonrasında %36,6'ya düşmüştür. Kâğıt atıklarının 2023 yılı su ayak izine katkısı da yalnızca %0,03 olarak belirlenmiştir. Üniversitenin dolaylı su kullanımının önemli bir kısmı, gıda hizmetleri ve enerji tüketiminden kaynaklanmaktadır.

Tartışma bölümünde, doğrudan su kullanımının su tasarrufu sağlamak için hızlı ve etkili müdahale fırsatları sunduğu açıkça görülmektedir. Bunun yanı sıra, gıda temini ve enerji tüketimi süreçlerinin optimize edilmesi, dolaylı su ayak izinin azaltılmasında önemli bir rol oynayabilir. Kâğıt kullanımını azaltmak için dijital alternatiflerin teşvik edilmesi ve yerel, düşük su ayak izine sahip gıdaların tercih edilmesi gibi

sürdürülebilir uygulamalar, üniversitenin toplam su kullanımını daha da azaltabilir. Bu analiz, kampüs genelinde su tasarrufu stratejilerinin geliştirilmesi ve sürdürülebilirlik uygulamalarının iyileştirilmesi için güçlü bir zemin oluşturmaktadır.

3.4. Yağmur Suyu Hasadı

3.4.1. Yağış alanı ve su talebi

Sakarya Üniversitesi'nde toplam 84 bina bulunmaktadır. Bu binalar arasında laboratuvarlar ve diğer küçük yapılar yer almakla birlikte, yalnızca yeşil alanlara yakın konumda bulunan belirli binalar yağış alanı olarak değerlendirilmiştir. Yağış alanı olarak seçilen bölgeler, bu binaların çatı yüzeyleridir.

Tablo 3.5. Yağmur su hasadı birimi.

Bölge	Binalar	Kullanılabilir Yağış Alanı (m ²)	Toplam Yağış Alanı (m ²)	Potansiyel (m ³)
1	Mühendislik Fakültesi Dekanlığı	697	6599	3573.8
	İletişim Fakültesi	739		
	Mühendislik Fakültesi M3	1051		
	M4 Mühendislik Binası	695		
	Uluslararası Ofis	1123		
	Kütüphane	1290		
	Rektörlük İlk Bina	1004		
2	Mediko	546	3241	2315.3
	Fen-Edebiyat Fakültesi	1315		
	Kapalı Spor Salonu	1380		
3	Sanat Tasarım ve Mimarlık Fakültesi	1753	7590	5136.9
	T4 Elektrik-Elektronik Mekatronik	2048		
	Dekanlık	925		
	T1 bina	910		
	T3 bina	1954		
4	M5 Endüstri Mühendisliği	910	14,625	9898.2
	M6 Elektrik-Elektronik Müh.	924		
	Kongre Merkezi	2448		
	M7 Makine Mühendisliği	1944		
	M8 mühendislik bina	937		
	Personel Yemekhanesi	1805		
	Bilgisayar ve Bilişim Sistemleri	384		

Tablo 3.5: (Devamı) Yağmur su hasadı birimi.

Bölge	Binalar	Kullanılabilir Yağış Alanı (m ²)	Toplam Yağış Alanı (m ²)	Potansiyel (m ³)
4	Yazılım	1059	14,625	9898.2
	İlahiyat Fakültesi	4446		
	İlahiyat Fakültesi Kafeterya	668		
5	Fen Fakültesi A Blok	1201	3613	2445,2
	Fen Fakültesi B Blok	566		
	Fen Fakültesi C Blok	1201		
	Bilinmeyen Bina	185		
	İslam Ekonomi ve Finans Araştırma Merkezi	460		
6	Hukuk Fakültesi	1114	4703	3182.9
	Siyasal Bilimler Fakültesi	900		
	İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi	1144		
	İşletme Fakültesi	545		
	İşletme Enstitüsü	1000		
7	Kampüs Çarşı	400	3510	2375.5
	Ziraat Bankası	534		
	SAÜ Yabancı Dil C Blok	1083		
	Fen-Edebiyat Fakültesi	1493		
	Tarih-Sosyoloji			
8	Esentepe Yurdu	564	564	381.7

Geri kalan binalar, çatı şekilleri ve tasarımlarının yağmur suyu toplama tanklarının kurulumu için uygun olmaması nedeniyle değerlendirme dışı bırakılmıştır.

Tablo 3.6. Su talebi.

Bölge	Yıllık Talep (m ³)	Haftada Bir Sulama (m ³)	Gerekli Çatı Alanı (Teorik) (m ²)
1	98	5096	7530
2	320	16640	24586
3	60	3120	4610
4	240	12280	18144
5	127	6604	9758
6	166	8632	12754
7	87	4524	6684
8	61	3172	4686

3.4.2. Yağmur hasadı potansiyeli ve sistem elemanları

Tablo 3.7. Yağmur su hasadı potansiyeli.

Bölge	Bina Sayısı	Bina Çatı Alanı (m ²)	Çatı Yağmur Suyu Toplama Potansiyeli (m ³)	Etkinlik Oranı
Bölge 1	14	10250	6243	0.7126
Bölge 2	8	11895	7245	0.8270
Bölge 3	8	10525	6410	0.7317
Bölge 4	13	11528	7021	0.8014
Bölge 5	15	11250	6852	0.7821
Bölge 6	11	7479	4555	0.5199
Bölge 7	8	3477	2117	0.2416
Bölge 8	9	6440	3922	0.4477
Toplam	86	72844	44365	-

Aşağıda, oluklar ve yağmur iniş borularına ilişkin yapılan değerlendirmelerin sonuçları sunulmaktadır.

Tablo 3.8. Çatı alanı ve oluk eğimine göre oluk boyutlandırma tablosu.

Oluk Eğimi	Oluk Çapı (inç)	2 inç/sa	3 inç/sa	4 inç/sa	5 inç/sa	6 inç/sa
1/8-inç/ft	4	1.020	681	510	408	340
	5	1.260	880	704	587	—
	6	2.720	1.815	1.360	1.085	905
	7	3.900	2.600	1.950	1.560	1.300
1/4-inç/ft	4	1.440	960	720	576	480
	5	2.500	1.668	1.250	1.000	834
	6	3.840	2.560	1.920	1.536	1.280
	7	5.520	3.680	2.760	2.205	1.840

Bu tablo, oluk eğimi, çapı ve farklı yağış oranları (inç/saat) altında maksimum yatay çatı alanlarını göstermektedir.

Toplamda 8 depolama tankı önerilmektedir. Bu tanklar, bölgenin su talebine göre 3 adet 50 m³, 3 adet 75 m³ ve 2 adet 100 m³ kapasiteye sahip olacak şekilde tasarlanmıştır. Bu öneri, yapılan hesaplamalara dayanmaktadır; ancak uygulamaya henüz geçirilmemiştir.

3.5. Maliyet Analizi ve Ekonomik Değerlendirme

3.5.1. Yatırım maliyeti

Tüm maliyet hesaplamaları, varsayımlara ve yaklaşık değerlere dayanmaktadır. 2024 yılı için Türkiye'deki yerel kaynaklardan alınan fiyatlar temel alınmıştır. Türkiye'de pompa maliyetleri, güç ve akış hızlarına göre aşağıdaki gibidir:

Yatırım maliyet darden pompa maliyet demektir

- **Q= 0-5 m³/h için 20 metre basma yüksekliği**
 - 220 Volt, 0.75 kW: **6.003,12 TL**
- **Q= 6-25 m³/h için 20 metre basma yüksekliği ve 4 kW güç**
 - **21.492,00 TL**
- **Q= 26-50 m³/h için 20 metre basma yüksekliği ve 4 kW güç**
 - **31.790,25 TL**

Optimal akış dağılımı için, **6-25 m³/h** akış kapasitesine ve **4 kW** güce sahip **8 pompa** kullanılması öngörülmüştür:

Toplam Pompa Maliyeti = 21.492,00 TL × 8 = 171.936 TL

Depolama tank boyut ve maliyetlerin tahminleri bunlardır

Tablo 3.9. Depolama tank boyut ve maliyetleri.

Tank Kapasitesi (m ³)	Fiyat (TL)
50	20.000
75	22.000
100	24.960

Sonuçlara göre, **3 adet 50 m³**, **3 adet 75 m³** ve **2 adet 100 m³** kapasiteli depolama tanklarının kullanılması önerilmektedir. Bu tankların toplam yatırım maliyeti şu şekilde hesaplanmıştır:

Tablo 3.10. Parçaların maliyetleri.

Bileşen	Fiyat (TL)
Filtreler	3.000
Borular	7.000
Tanklar	175.920
Pompalar	171.936

$$\text{Toplam Başlangıç Yatırım Maliyeti} = 3000 + 7.000 + 175.920 + 171.936 \text{ TL}$$

$$\text{Toplam Başlangıç Yatırım Maliyeti} = 357.856 \text{ TL}$$

3.5.2. İşletme maliyeti

Varsayımlar doğrultusunda, pompaların haftada 4 saat çalışacağı ve yılda yaklaşık 300 gün çalışacağı (temizlik ve bakım için ayrılan günler hariç) öngörülmüştür. Elektrik tüketimi şu formül ile hesaplanmıştır:

$$\text{Yıllık Tüketim (kWh)}$$

$$= \text{Güç (kW)} * \text{Günlük Çalışma Süresi (saat)}$$

$$* \text{Yıllık Çalışma Gün Sayısı}$$

$$\text{Yıllık Tüketim (KWh)} = 4 \text{ KW} * 4 \text{ Saat} * 360 \text{ gün}$$

$$\text{Yıllık tüketim (KWh)} = 4800 \text{ KW/pompa}$$

Toplam 8 pompa için:

$$\text{Yıllık Tüketim (KWh)} = \text{KWh/pompa} * 8 \text{ pompa}$$

$$\text{Yıllık tüketim} = 38,400 \text{ KWh}$$

2024 Yılı için elektrik birim fiyatı 2.17 TL dir.

$$\text{Yıllık elektrik tüketim maliyeti} = 38,400 \text{ KWh} * 2.17 \text{ TL}$$

$$\text{Yıllık elektrik tüketim maliyeti} = 83,328 \text{ TL}$$

Mevzuata göre günlük asgari işçilik maliyeti 500 TL olarak belirlenmiştir. Temizlik işlemleri için yılda bir kez 2 işçi görevlendirilmesi ve bu işlemin 2 gün sürmesi öngörülmüştür.

$$\text{Yıllık işçilik maliyeti} = 2 \text{ işçi} * 2 \text{ gün} * 500 \text{ TL/gün}$$

$$\text{Yıllık işçi maliyeti} = 2.000 \text{ TL}$$

$$\text{Toplam işletme maliyeti} = \text{yıllık elektrik maliyeti} + \text{yıllık işçilik maliyeti}$$

$$\text{Toplam işletme maliyeti} = 83,328 \text{ TL} + 2.000 \text{ TL}$$

$$\text{Toplam işletme maliyeti} = 85,328 \text{ TL}$$

Bir metreküp suyun maliyeti 5,5 TL olarak varsayılmıştır. Yağmur suyu hasadı sistemi sayesinde yılda yaklaşık 16.000 m³ su tasarrufu sağlanacağı öngörülmüştür. Bu doğrultuda, tasarruf hesaplamaları şu şekilde yapılmıştır:

$$\text{Yıllık Tasarruf} = \text{Tasarruf Edilen Su Miktarı} * \text{Metreküp Başına Su Maliyeti}$$

$$\text{Yıllık Tasarruf} = 16.000\text{m}^3 * 5,5 \text{ TL}/\text{m}^3$$

$$\text{Yıllık Tasarruf} = 88.000 \text{ TL}/\text{yıl}$$

$$\text{Net Yıllık Tasarruf} = \text{Yıllık Tasarruf} - \text{İşletme Maliyet}$$

2024 yılı için hesaplama şu şekilde yapılmıştır:

$$\text{Net Yıllık Tasarruf} = 88.000\text{TL} - 85.328\text{TL}$$

$$\text{Net Yıllık Tasarruf} = 2.672\text{TL}$$

Her yıl %2 oranında bir artış olacağı varsayılmıştır.

Tablo 3.11. Maliyet ve tasarruf analizi.

Yıl	Başlangıç Maliyeti (TL)	İşletme Maliyetinin Mevcut Değeri (TL)	Yenileme Maliyetinin Mevcut Değeri (TL)	Su Tasarrufunun Mevcut Değeri (TL)
2024	357.856	85.328	0	2.672
2025	0	87.034	0	2.725
2026	0	88.775,2	0	2.779
2027	0	90.550,7	0	2.835
2028	0	92.361,7	0	2.892
2029	0	94.208,94	0	2.950
2030	0	96.093,12	0	3.009
2031	0	98.014,98	0	3.069
2032	0	99.975,28	0	3.130
2033	0	101.974,79	0	3.193
2034	0	104.014,29	0	3.257
2035	0	106.094,57	0	3.322
2036	0	108.216,46	0	3.388
2037	0	110.380,79	0	3.456
2038	0	112.588,414	0	3.525
2039	0	114.840,18	0	3.596
2040	0	117.136,98	0	3.668
2041	0	119.479,72	0	3.741
2042	0	121.869,31	0	3.816
2043	0	124.306,74	521.324	3.892
Toplam		2.073.234		64.915

Pompa için geri ödeme süresi 20 yıl olarak belirlenmiştir, bu da pompanın 20. Yılda değiştirilmesi gerektiğini ifade eder. Bu durumda 20. Yıl için yenileme maliyeti şu şekilde hesaplanır:

$$Yenileme\ Maliyeti = başlangıç\ Maliyeti * (1 + 0,02)^{19}$$

Su tasarrufunun bugünkü değeri ise şu formül ile hesaplanmaktadır:

$$Bugünkü\ değer = Başlangıç\ Maliyeti * (1 + 0,02)$$

kümülatif Nakit Akışı

$$\begin{aligned} &= -(Başlangıç\ Maliyeti) - (İşletme\ Maliyeti) \\ &- (yenileme\ maliyeti) + Su\ tasarrufu \end{aligned}$$

Yapılan maliyet-fayda analizi, Sakarya Üniversitesi'nde yağmur suyu hasadı ünitesinin uygulanmasının ekonomik ve çevresel faydalarını net bir şekilde ortaya koymaktadır. İlk kurulum maliyeti yüksek olsa da, bu maliyet uzun vadede sağlanacak finansal ve çevresel kazançlarla dengelenmektedir. Sistemin düşük işletme maliyetleri, yüksek yağmur suyu toplama kapasitesi ile birleştiğinde önemli su tasarruflarına ve 20 yıllık bir geri ödeme süresine olanak tanımaktadır. Bu süre boyunca sistem, toplamda 64.915 TL tasarruf sağlayarak ekonomik olarak uygulanabilir bir çözüm sunmaktadır. Yağış miktarındaki değişiklikler ve gelecekteki su fiyatları gibi potansiyel değişkenlere rağmen, sistem hem maliyet tasarrufu hem de çevresel sürdürülebilirlik açısından değerli bir alternatif olarak öne çıkmaktadır.



4. TARTIŞMA VE ÖNERİLER

Bu çalışma, Sakarya Üniversitesi'nin su ayak izini değerlendirmeyi, mevcut su yönetim uygulamalarının etkinliğini incelemeyi ve yağmur suyu hasadı (YSH) gibi sürdürülebilir çözümler önererek net sıfır su hedeflerine ulaşmayı amaçlamaktadır. Elde edilen bulgular, kampüs genelinde etkin su kullanımı yönetiminin çevresel etkilerin en aza indirilmesi ve sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşılması açısından kritik öneme sahip olduğunu açıkça ortaya koymaktadır.

Su ayak izi metodolojisi, üniversite ortamında hem doğrudan hem de dolaylı su kullanımına dair kapsamlı bir analiz sunmuştur. Geleneksel su yönetimi genellikle yalnızca musluklardan ve sulama sistemlerinden görülebilir su tüketimine odaklanmakta, dolaylı kullanımı ise göz ardı etmektedir. Ancak bu araştırma, kampüs binalarında kullanılan enerji ve öğrenciler ile personel tarafından üretilen atıklarla ilişkili olarak önemli miktarda dolaylı su tüketimi olduğunu ortaya koymuştur. Örneğin, enerjiyle ilişkili su ayak izi analizleri, elektrik üretiminde kullanılan soğutma işlemleri ve diğer enerji yoğun faaliyetlerin 2022 yılında yaklaşık 802,6 m³ ve 2023 yılında 671,5 m³ su tükettiğini göstermiştir. Benzer şekilde, atık kaynaklı su ayak izi analizleri, kâğıt ve gıda atıklarının bertarafı ve geri dönüşümü sırasında dolaylı olarak 2022 yılında yaklaşık 450,8 ve 569,3m³ ve 2023 yılında 370,3 ve 428,07 m³ su kullanıldığını ortaya koymuştur.

Üniversitenin toplam su ayak izi, 2022 yılında yaklaşık 1.442.600,35m³ ve 2023 yılında 1.166.487,803 m³ olarak hesaplanmıştır ve 2022 yılında bunun %95,03 ve 2023 yılında %94,3'si dolaylı kullanımlara atfedilmiştir. Ayrıca, 2022 yılı su ayak izi değerleri 2023 yılına kıyasla daha yüksek bulunmuştur. Bunun başlıca nedeni, 2023 yılında meydana gelen büyük çaplı deprem felaketi sonrası üniversitelerin uzun süre kapalı kalmasıdır. Bu durum, kampüs genelinde su ve enerji kullanımında önemli ölçüde azalmaya yol açmış ve dolayısıyla toplam su ayak izini düşürmüştür.

Bu bulgular, Kolombiya'daki Pereira Teknoloji Üniversitesi'nde yürütülen bir çalışmayla da desteklenmektedir. Söz konusu çalışmada, dolaylı su tüketiminin toplam su kullanımının %86,2'sine kadar çıktığı, bunun yalnızca %2'sinin ise elektrik

tüketiminden kaynaklandığı belirlenmiştir (Osorio-Tejada et al., 2022). Konya Teknik Üniversitesi'nde elde edilen bulgular, kampüsün toplam su ayak izinin yıllık 102.670 m³ olduğunu ve kişi başı su tüketiminin yıllık 17,3 m³ olduğunu ortaya koymuştur. Bu toplamın %86,2'si dolaylı faaliyetlere atfedilmiştir (Mesutoğlu, 2024). Birleşik Krallık'taki Keele Üniversitesi'nde, dolaylı bileşenler (özellikle gıda ve enerji), toplam su kullanımının yaklaşık %97'sini oluşturmuş ve bu miktar yıllık 532.415,00 m³ olarak hesaplanmıştır (Vaidya et al., 2021). Boğaziçi Üniversitesi'nde yürütülen bir çalışma da, dolaylı su kullanımının—özellikle beslenme alışkanlıkları yoluyla—doğrudan tüketim değerlerini aştığını ortaya koymuştur (Okutan & Akkoyunlu, 2021). Gazi Üniversitesi Beşevler Kampüsü'nde yürütülen çalışmada ,Simapro yazılımı aracılığıyla Hoekstra yöntemi kullanılarak 2021 ve 2022 yıllarına ait su ayak izi değerleri sırasıyla 13,2 L ve 9,9 L olarak hesaplanmıştır².

Bu karşılaştırmalar, Sakarya Üniversitesi'nin toplam su kullanımının nispeten ölçülü olduğunu ve kampüs sürdürülebilirliği üzerine yapılan daha geniş kapsamlı çalışmalarla uyumlu olduğunu göstermektedir. Ayrıca, dolaylı etmenlerin bu çalışmaya dâhil edilmesi, gizli su akışlarının belirlenmesini sağlamış ve kampüs genelindeki toplam su kullanımına ilişkin daha doğru bir anlayış sunmuştur. Kullanılan metodoloji, enerji ve atık sistemlerine bağlı su tüketimlerini de hesaba katarak geleneksel ölçüm tekniklerinin ötesine geçmiştir. Elde edilen sonuçlar, su kullanımı, enerji tüketimi ve atık yönetimi arasındaki güçlü ilişkiyi vurgulamaktadır. Enerji kullanımının azaltılması, atık yönetimi uygulamalarının iyileştirilmesi ve geri dönüşüm oranlarının artırılması, üniversitenin toplam su ayak izini azaltmak için önemli fırsatlar sunmaktadır.

Doğrudan ve dolaylı su maliyetlerinin birlikte ele alınmasıyla, üniversite hem net sıfır su hedeflerine hem de daha geniş sürdürülebilirlik amaçlarına ulaşabilir. Bulgular, mevcut su yönetim uygulamalarında verimsizlikler olduğunu ve su tüketiminin azaltılması ile israfın en aza indirilmesi için acil eylem gerektiğini ortaya koymaktadır. Bu bağlamda, yağmur suyu hasadı, üniversitenin net sıfır su stratejisinin temel bileşenlerinden biri olarak önerilmektedir.

Her ne kadar sistem henüz inşa edilmemiş olsa da, önerilen tasarım, yağmur suyunun toplanarak yeşil alanların sulanmasında kullanılmasını amaçlamaktadır. Bu sistemin, içme suyu niteliği taşımayan kullanımlar için belediye su kaynaklarına olan bağımlılığı önemli ölçüde azaltması beklenmektedir. Yağmur suyu hasadı, kampüs

genelinde doğrudan su tüketimini ciddi oranda azaltma potansiyeline sahiptir. Hâlihazırda sulama, arıtılmış suyun en yoğun kullanıldığı alanlardan biridir ve bu ihtiyaç, bina çatıları ve diğer yüzeylerden toplanacak yağmur suyu ile karşılanabilir. Bu dönüşüm, içilebilir suyun içme ve hijyen gibi temel ihtiyaçlar için korunmasına yardımcı olurken, suyun çıkarılması ve arıtılması süreçlerinin çevresel etkilerini de azaltacaktır.

Benzer başarılı uygulamalar dünya genelinde de rapor edilmiştir. Örneğin, Bragança Politeknik Enstitüsü'nde yürütülen bir çalışma, yağmur suyu hasadı ile su tasarrufu sağlayan cihazların üniversite yurtlarında birlikte kullanılmasının, içme suyu kullanımını %23,17'ye kadar azaltabileceğini ortaya koymuştur (Antão-Geraldes et al., 2024). British Columbia Üniversitesi'ne bağlı Sürdürülebilirlik Üzerine Etkileşimli Araştırma Merkezi (CIRS), su açısından kendi kendine yetebilen bir tesis olarak öne çıkmaktadır. Merkez, günlük ihtiyaçları karşılamak amacıyla yılda 1,2 milyon litreden fazla yağmur suyu toplamaktadır ve arıtılmış gri suyu yerinde yeniden kullanmaktadır (Alshuwaikhat & Abubakar, 2008). Emory Üniversitesi'nde yürütülen WaterHub projesi, günlük yaklaşık 400.000 galon atık suyu peyzaj sulaması ve tuvalet rezervuarlarında kullanmak üzere geri dönüştürmekte ve bu sayede içme suyu kullanımında %40 oranında bir azalma sağlamaktadır (Allison et al., 2018). Elde edilen bulgular, dünya genelinde hakemli dergilerde yayımlanmış çalışmalarla da örtüşmekte; kampüs genelinde yağmur suyu hasadı ve su geri kullanım sistemlerinin teknik ve ekonomik olarak uygulanabilirliğini doğrulamakta, Sakarya Üniversitesi'nin bu modeli uygulama yönündeki stratejik kararını desteklemektedir.

Emory Üniversitesi'nin WaterHub projesi gibi büyük ölçekli gri su geri kazanım sistemlerinden farklı olarak, Sakarya Üniversitesi'nin yaklaşımı daha yerel düzeyde ancak ölçeklenebilir bir çözüm sunmaktadır. Alternatif su kaynaklarının uygulanabilirliğini ve çevresel faydalarını gösteren bir pilot proje olarak önerilen yağmur suyu hasadı sistemi, Sakarya Üniversitesi'ni, yerinde ve desantralize su geri kazanımı ile tasarruf uygulamaları aracılığıyla net sıfır su stratejilerine yönelen kurumlar arasında stratejik bir konuma taşımaktadır.

Zamanla, sistem gri su geri kazanımı, geçirgen zemin kaplamaları ve su tasarruflu peyzaj uygulamaları gibi diğer girişimlerle genişletilebilir veya entegre edilebilir; böylece bütüncül bir su azaltım yaklaşımı geliştirilebilir. Arıtılmış belediye suyu

yerine hasat edilen yağmur suyunun kullanılması, üniversitenin toplam su ayak izinin azaltılmasına doğrudan katkı sağlamaktadır.

Ayrıca yapılan maliyet-fayda analizi, Sakarya Üniversitesi'nde yağmur suyu hasadı ünitesinin kurulmasının finansal açıdan uygulanabilir olduğunu doğrulamıştır. 357.856 TL tutarındaki başlangıç yatırımı, uzun vadeli tasarruflarla dengelenecek olup, geri ödeme süresinin yaklaşık 20 yıl olması öngörülmektedir. Bu süre zarfında sistemin yaklaşık 64.915 TL tasarruf sağlaması beklenmekte ve bu durum, önerilen çözümü ekonomik açıdan mantıklı bir seçenek haline getirmektedir.

Finansal tasarrufların ötesinde, yağmur suyu hasadı sistemi üniversitenin su ayak izinin azaltılmasına, yerel su kaynaklarının korunmasına ve yağmur suyu yönetiminin iyileştirilmesine katkı sağlamaktadır. Bu sistem, üniversitenin çevresel hedefleriyle uyumlu olup, sürdürülebilir su yönetimi uygulamalarını benimsemeyi amaçlayan diğer kurumlar için de örnek teşkil etmektedir.

Kampüs genelinde yağmur suyu hasadının görünür şekilde uygulanması, su tasarrufunun önemi konusunda sürekli bir hatırlatıcı işlevi görebilir ve sürdürülebilirlik konusunda farkındalık oluşturabilir. Yağmur suyunun sulamada işlevsel olarak kullanılması, alternatif su kaynaklarının günlük faaliyetlere entegre edilmesine yönelik somut bir örnek sunmaktadır. Bu tür uygulamalar, bilinçli su kullanımı yönünde davranış değişikliğini teşvik edebilir, israfı en aza indirebilir ve kampüs topluluğunu olumlu yönde etkileyen diğer çevre dostu girişimleri destekleyebilir.

KAYNAKLAR

- Ağaçayak, T., & Keyman, F. (2018). Water and food security in Turkey in a changing climate. *IPC Policy Brief*, 1-11.
- Ahuja, S. (2021). *Handbook of water purity and quality*. Academic press.
- Alcamo, J., Henrichs, T., & Rosch, T. (2000). World water in 2025. *World water series report*, 2.
- Aldaya, M. M., Chapagain, A. K., Hoekstra, A. Y., & Mekonnen, M. M. (2012). *The water footprint assessment manual: Setting the global standard*. Routledge.
- Al-Hamaiedeh, H., & Bino, M. (2010). Effect of treated grey water reuse in irrigation on soil and plants. *Desalination*, 256(1-3), 115-119.
- Allison, D., Lohan, E., & Baldwin, T. (2018). The WaterHub at Emory University: Campus Resiliency through Decentralized Reuse: Allison et al. *Water Environment Research*, 90(2), 187-192.
- Al-Otaibi, A., & Abdel-Jawad, M. (2007). Water security for Kuwait. *Desalination*, 214(1-3), 299-305.
- Alshuwaikh, H. M., & Abubakar, I. (2008). An integrated approach to achieving campus sustainability: assessment of the current campus environmental management practices. *Journal of Cleaner Production*, 16(16), 1777-1785.
- Antão-Geraldes, A. M., Ohara, G., Afonso, M. J., Albuquerque, A., & Silva, F. (2024). Towards Sustainable Water Use in Two University Student Residences: A Case Study. *Applied Sciences*, 14(17), 7559.
- Army, U. (2011). Army vision for net zero. *White paper*. Washington, DC: Office of the Assistant Secretary of the Army for Installations, Energy & Environment (ASA (IE&E)), Department of the Army.
- Bai, X., Ren, X., Khanna, N. Z., Zhou, N., & Hu, M. (2018). Comprehensive water footprint assessment of the dairy industry chain based on ISO 14046: A case study in China. *Resources, Conservation and Recycling*, 132, 369-375.
- Bains, W., Petkowski, J. J., & Seager, S. (2024). Alternative solvents for life: framework for evaluation, current status, and future research. *Astrobiology*, 24(12), 1231-1256.
- Ball, P. (2012). The importance of water. In *Astrochemistry and Astrobiology* (pp. 169-210). Springer.
- Boulay, A.-M., Drastig, K., Chapagain, A., Charlon, V., Civit, B., DeCamillis, C., De Souza, M., Hess, T., Hoekstra, A. Y., & Ibidhi, R. (2021). Building consensus on water use assessment of livestock production systems and supply chains: Outcome and recommendations from the FAO LEAP Partnership. *Ecological Indicators*, 124, 107391.

- Burak, S. (2008). Overview of water management in Turkey: Issues, constraints, achievements, prospect. Sustainable use and development of watersheds, Challenge, L. B. (2012). International Living Future Institute. In.
- Chapagain, A. K., & Hoekstra, A. Y. (2007). The water footprint of coffee and tea consumption in the Netherlands. *Ecological economics*, 64(1), 109-118.
- Crosson, C., Tong, D., Zhang, Y., & Zhong, Q. (2021). Rainwater as a renewable resource to achieve net zero urban water in water stressed cities. *Resources, Conservation and Recycling*, 164, 105203.
- Ding, N., Liu, J., Yang, J., & Lu, B. (2018). Water footprints of energy sources in China: Exploring options to improve water efficiency. *Journal of Cleaner Production*, 174, 1021-1031. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.10.273>
- El-Ghonemy, A. (2012). Future sustainable water desalination technologies for the Saudi Arabia: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(9), 6566.
- Ertop, H., Kociğcka, J., Atilgan, A., Liberacki, D., Niemiec, M., & Rolbiecki, R. (2023). The Importance of Rainwater Harvesting and Its Usage Possibilities: Antalya Example (Turkey). *Water*, 15(12), 2194.
- Fowler, K. M., Demirkanli, D. I., Hostick, D. J., McMordie Stoughton, K. L., Solana, A. E., & Sullivan, R. S. (2017). *Federal New Buildings Handbook for Net Zero Energy, Water, and Waste*.
- Gleick, P. H. (2003). Water use. *Annual review of environment and resources*, 28(1), 275-314.
- Gu, Y., Xu, J., Keller, A. A., Yuan, D., Li, Y., Zhang, B., Weng, Q., Zhang, X., Deng, P., & Wang, H. (2015). Calculation of water footprint of the iron and steel industry: a case study in Eastern China. *Journal of Cleaner Production*, 92, 274-281.
- Helmreich, B., & Horn, H. (2009). Opportunities in rainwater harvesting. *Desalination*, 248(1-3), 118-124.
- Hoekstra, A. Y. (2011). *The water footprint assessment manual: Setting the global standard*. Routledge.
- Hoekstra, A. Y., Chapagain, A. K., & Van Oel, P. R. (2017). Advancing water footprint assessment research: Challenges in monitoring progress towards sustainable development goal 6. In (Vol. 9, pp. 438): MDPI.
- Hoekstra, A. Y., Chapagain, A. K., Aldaya, M. M., & Mekonnen, M. M. (2009). *Water footprint manual*. Water footprint network Enschede, The Netherlands.
- Hossain, L. (2020). Water Footprint Management for Sustainable Growth in the Bangladesh Apparel Sector. *Water*, 12(10), 2760. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/w12102760>
- Hosseini, S. M., & Nezamoleslami, R. (2018). Water footprint and virtual water assessment in cement industry: A case study in Iran. *Journal of Cleaner Production*, 172, 2454-2463.

- Jackson, N., Konar, M., & Hoekstra, A. Y. (2015). The water footprint of food aid. *Sustainability*, 7(6), 6435-6456.
- Jenicek, E. M., Curvey, L. E., Stumpf, A. L., & Fishman, K. (2011). Net zero water for Army installations: Considerations for policy and technology.
- Kandanand, K. (2019). The energy related water footprint accounting of a public organization: The case of a public University in Thailand. *Energy Procedia*, 156, 149-153.
- Li, J., & Chen, G. (2014). Water footprint assessment for service sector: A case study of gaming industry in water scarce Macao. *Ecological Indicators*, 47, 164-170.
- Luo, T., Young, R., & Reig, P. (2015). Aqueduct projected water stress country rankings. *Technical Note*, 16, 1-16.
- Mekonnen, M. M., & Hoekstra, A. Y. (2011). The green, blue and grey water footprint of crops and derived crop products. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15(5), 1577-1600.
- Mekonnen, M. M., & Hoekstra, A. Y. (2012). A global assessment of the water footprint of farm animal products. *Ecosystems*, 15(3), 401-415.
- Mekonnen, M., & Hoekstra, A. Y. (2012). The blue water footprint of electricity from hydropower. *Hydrology and Earth System Sciences*, 16(1), 179-187.
- Mesutoğlu, Ö. Ç. (2024). Quantifying Water Footprint: A Study on the Academic and Administrative Personnel at Konya Technical University.
- Miglietta, P. P., Morrone, D., & De Leo, F. (2018). The Water Footprint Assessment of Electricity Production: An Overview of the Economic-Water-Energy Nexus in Italy. *Sustainability*, 10(1), 228. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/su10010228>
- Mishra, S. S., Shruthi, B., & Rao, H. J. (2020). Design of rooftop rainwater harvesting structure in a University campus. *Int. J. Recent Technol. Eng*, 8(5), 3591-3595.
- Okadera, T., Chontanawat, J., & Gheewala, S. H. (2014). Water footprint for energy production and supply in Thailand. *Energy*, 77, 49-56.
- Okutan, P., & Akkoyunlu, A. (2021). Identification of water use behavior and calculation of water footprint: a case study. *Applied Water Science*, 11, 1-13.
- Olmos, K. C., & Loge, F. J. (2013). Offsetting water conservation costs to achieve net- zero water use. *Journal- American Water Works Association*, 105(2), E62-E72.
- Osorio-Tejada, J. L., Varón-Hoyos, M., & Morales-Pinzón, T. (2022). Comprehensive water footprint of a University Campus in Colombia: Impact of wastewater treatment modeling. *Water, Air, & Soil Pollution*, 233(5), 174.
- ÖÇ, M. (2024). Quantifying Water Footprint: A Study on the Academic and Administrative Personnel at Konya Technical University.
- Özbaş, E. E., PEHLİVAN, T. S., ÖZCAN, H. K., Öngen, A., AYDİN, S., & Güneysu, S. (2021). Distribution of Water Footprint Components of University Students and Detecting the Factors that Affect Those Components. *International Journal of Agriculture Environment and Food Sciences*, 5(4), 456-463.

- Pagano, T., & Sorooshian, S. (2002). Hydrologic cycle. *Encyclopedia of Global Environment Change*.
- Schlosser, C. A., Strzepek, K., Gao, X., Fant, C., Blanc, É., Paltsev, S., Jacoby, H., Reilly, J., & Gueneau, A. (2014). The future of global water stress: An integrated assessment. *Earth's Future*, 2(8), 341-361.
- Simpson, J. Y. (1914). The Fitness of the Environment. *Harvard Theological Review*, 7(1), 72-87.
- Srb, M., Grešíková, M., Salová, N., Sýkora, P., Štrupl, J., Xia, R., Huml, O., Prokop, P., Hájková, M., & Harasymchuk, I. (2023). Prague water net zero strategy 2025: methodology and roadmap. *Water Supply*, 23(5), 1859-1873.
- Şahin, N. İ., & Manioğlu, G. (2019). Water conservation through rainwater harvesting using different building forms in different climatic regions. *Sustainable Cities and Society*, 44, 367-377.
- Tiara Suci, R., Oki, S., & Martin, A. (2023). Study of rainwater harvesting as a water conservation in mall building in South Tangerang. *IOP Conference Series. Earth and Environmental Science*, 1169(1), 012013. <https://doi.org/https://doi.org/10.1088/1755-1315/1169/1/012013>
- Toyran, C., & Var, M. (2022). YAĞMUR SUYU HASADININ KENTSEL TASARIM VE YEŞİL ALTYAPI UYGULAMALARINDA DEĞERLENDİRİLMESİ-BÜYÜKÇEKMECE İLÇESİ ÖRNEĞİ. *Turkish Journal of Forest Science*, 6(1), 255-274.
- Turan, E., & BAYRAKDAR, E. (2020). Türkiye'nin su yönetim politikaları: Ulusal güvenlik açısından bir değerlendirme. *Uluslararası Politik Araştırmalar Dergisi*, 6(2), 1-19.
- Tzanakakis, V. A., Paranychanakis, N. V., & Angelakis, A. N. (2020). Water supply and water scarcity. In (Vol. 12, pp. 2347): MDPI.
- UNEP, G. M. A. (2002). United Nations environment programme. *Chemicals, Geneva, Switzerland*.
- Vaidya, B., Shrestha, S., & Ghimire, A. (2021). Water footprint assessment of food-water-energy systems at Kathmandu University, Nepal. *Current Research in Environmental Sustainability*, 3, 100044.
- Valiente Parra, N., Jirsa, F., & Gómez-Alday, J. J. (2022). Saline lakes as barriers against pollution: a multidisciplinary overview. *Limnetica*, 41(2).
- Water, U. (2021). Water scarcity. *United Nations*.
- Weiland, P. (2010). Biogas production: current state and perspectives. *Applied microbiology and biotechnology*, 85, 849-860.
- Westall, F., & Brack, A. (2018). The importance of water for life. *Space Science Reviews*, 214, 1-23.
- Yonkofski, C. M., Tartakovsky, G. D., Feng, Y., Loper, S. A., Yoder, T. A., & Solana, A. E. (2021). Redefining Net-Zero Water for Resilient Aquifers. *Journal AWWA*, 113(PNNL-SA-155669).

Zhang, Y., Tian, Q., Hu, H., & Yu, M. (2019). Water Footprint of Food Consumption by Chinese Residents. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16(20). [https://doi.org/https://doi.org/10.3390/ijerph16203979](https://doi.org/10.3390/ijerph16203979)

URL

[https://www.owasa.org/local-community-celebrates-15-year-anniversary-of-reclaimed-water system](https://www.owasa.org/local-community-celebrates-15-year-anniversary-of-reclaimed-water-system)

<https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/tezSorguSonucYeni.jsp>

<https://en.climate-data.org/asia/turkey/sakarya/adapazar%C4%B1-180/>





EKLER

EK A. 2022 Elektrik, Doğalgaz ve Su Tüketimi

EK B. 2023 Elektrik, Doğalgaz ve Su Tüketimi



EK A.

2022 ELEKTRİK TÜKETİMİ		
AYLAR	TÜKETİM (kws)	HARCAMA (TL)
OCAK	1,030,560.31	2,686,383.48
ŞUBAT	892,942.29	1,974,013.81
MART	1,183,679.82	3,015,984.79
NİSAN	760,615.38	2,336,105.39
MAYIS	692,059.52	2,110,486.02
HAZİRAN	726,729.73	2,690,518.69
TUMMUZ	653,767.48	2,433,119.80
AĞUSTOS	877,980.28	4,039,668.80
EYLÜL	622,318.68	3,478,258.37
EKİM	787,531.71	4,083,927.65
KASIM	875,179.23	4,545,000.39
ARALIK	1,030,509.32	5,661,003.52
TOPLAM	10,133,873.74	39,054,470.71

2022 DOĞALGAZ TÜKETİMİ		
AYLAR	TÜKETİM (m³)	HARCAMA (TL)
OCAK	122,313.51	585,881.71
ŞUBAT	141,112.45	675,928.64
MART	155,332.20	744,041.24
NİSAN	152,895.23	732,368.15
MAYIS	120,501.21	577,200.80
HAZİRAN	25,647.18	122,849.99
TUMMUZ	12,551.32	60,120.82
AĞUSTOS	3,588.49	17,188.87
EYLÜL	2,428.15	11,630.84
EKİM	5,319.43	25,480.07
KASIM	100,689.58	482,303.09
ARALIK	153,878.36	737,077.34
TOPLAM	996,257.11	4,772,071.56

2022 SU TÜKETİMİ		
AYLAR	TÜKETİM (m³)	HARCAMA (TL)
OCAK	5,010.11	79,460.34
ŞUBAT	5,457.33	86,553.25
MART	5,778.56	91,647.96
NİSAN	6,502.21	103,125.05
MAYIS	6,889.41	109,266.04
HAZİRAN	7,402.58	117,404.92
TÜMMUZ	7,699.75	122,118.04
AĞUSTOS	7,441.61	118,023.93
EYLÜL	4,512.49	71,568.09
EKİM	4,699.54	74,534.70
KASIM	4,471.88	70,924.02
ARALIK	4,323.98	68,578.32
TOPLAM	70,189.45	1,113,204.68

EK B.

2023 ELEKTRİK TÜKETİMİ		
AYLAR	TÜKETİM (kws)	HARCAMA (TL)
OCAK	884,454.16	4,765,826.15
ŞUBAT	775,319.18	3,540,761.08
MART	722,815.93	2,614,448.83
NİSAN	624,406.43	2,003,872.34
MAYIS	604,007.67	2,057,052.62
HAZİRAN	471,523.34	1,524,932.49
TUMMUZ	755,328.85	2,869,022.51
AĞUSTOS	809,695.39	3,373,156.37
EYLÜL	523,012.81	1,977,542.73
EKİM	634,267.47	2,663,556.59
KASIM	780,805.54	3,129,405.70
ARALIK	893,023.43	3,567,665.86
TOPLAM	8,478,660.20	34,087,243.27

2023 DOĞALGAZ TÜKETİMİ		
AYLAR	TÜKETİM (m³)	HARCAMA (TL)
OCAK	138,192.23	1,559,692.82
ŞUBAT	143,215.33	1,616,385.46
MART	151,881.71	1,714,197.76
NİSAN	97,686.96	1,102,534.05
MAYIS	95,202.51	1,074,493.59
HAZİRAN	36,504.57	412,005.14
TUMMUZ	1,290.20	14,561.70
AĞUSTOS	377.25	4,257.75
EYLÜL	1,749.98	19,751.00
EKİM	1,523.40	17,193.69
KASIM	2,886.53	32,578.48
ARALIK	108,255.55	1,221,815.47
TOPLAM	778,766.21	8,789,466.91

2023 SU TÜKETİMİ		
AYLAR	TÜKETİM (m³)	HARCAMA (TL)
OCAK	5,650.51	194,095.00
ŞUBAT	4,269.18	146,646.50
MART	6,209.28	213,288.78
NİSAN	5,201.05	178,655.95
MAYIS	3,615.60	124,196.00
HAZİRAN	5,140.83	176,587.52
TUMMUZ	4,502.93	154,675.50
AĞUSTOS	4,692.69	161,194.00
EYLÜL	3,264.02	112,119.00
EKİM	6,663.11	228,878.00
KASIM	8,397.87	288,467.00
ARALIK	8,926.96	306,641.05
TOPLAM	66,534.04	2,285,444.30



ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Mınahıl FATİMA

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2021, University of Engineering and Technology Taxila, Pakistan
- **Yükseklisans** : 2025, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Çevre Mühendisliği Bölümü

TEZDEN TÜRETİLEN ESERLER:

- Mınahıl FATİMA, Ahmet ÇELEBİ, “ Campus Water Management Along With Net-zero Water Approaches”19th International Istanbul Scientific Research Congress on Life, Engineering, Architecture, and Mathematical Sciences,16-18 November, 2024, Istanbul, Türkiye.
- Mınahıl FATİMA, Ahmet ÇELEBİ, “ Rainwater Harvesting For The Less Water Footprint: Case Study of Sakarya University Esentepe Campus Area” 19th International Istanbul Scientific Research Congress on Life, Engineering, Architecture, and Mathematical Sciences,16-18 November, 2024, Istanbul, Türkiye

DİĞER ESERLER:

- Engr. Babar, Ayesha & Fatima, Mınahıl Fatıma.(2022). Recycling Paper Waste into Plaster Composite Mixture