

İÇİNDEKİLER

Makale Adı	Makale Türü	Yazarlar	Sayfa Numarası
1. Gri Suyun Artılması ve Yeniden Kullanımı: Faydaları ve Riskleri	Derleme Makalesi	Muhammed Nimet Hamidi*, Nizamettin Hamidi	59-74
2. Kanal Tipi Mikroalg Havuzlarının Hidrolik Karakterinin Sayısal Olarak İncelenmesi	Araştırma Makalesi	Mehmet Sadık Akça*	75-86
3. Otomotiv Sektöründe Sürdürülebilirlik ve Otomotiv Üretici Firmalarının Sürdürülebilirlik Stratejileri	Derleme Makalesi	Ayşegül Şengel*	87-96
4. Türkiye'de Yeraltı Suyu Kullanımları ve Tahsislerinin Sürdürülebilirlik Anlayışı ile Değerlendirilmesi: Yeşilirmak Havzası Örneği	Araştırma Makalesi	Selim Armut*	97-110
5. UI Green Metric Sıralamasındaki Türkiye Üniversitelerinin Enerji ve İklim Değişikliği Stratejileri	Araştırma Makalesi	Ceydanur Sarıkoç*, Nihan Engin	111-122

DERLEME MAKALESİ

Gri Suyun Arıtılması ve Yeniden Kullanımı: Faydaları ve Riskleri

Muhammed Nimet HAMİDİ¹, Nizamettin HAMİDİ²

Yazışma yazarı:
Muhammed Nimet
HAMİDİ,
hamidim@itu.edu.tr

¹İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Maslak, İstanbul, Türkiye.

ORCID:0000-0002-6609-9977

²Dicle Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Diyarbakır, Türkiye.

ORCID: 0000-0003-0244-0264

Referans:

Hamidi, M.N., Hamidi, N (2024). Gri Suyun Arıtılması ve Yeniden Kullanımı: Faydaları ve Riskleri, *Çevre, İklim ve Sürdürülebilirlik*, 25, (2) 59–74.

Makale Gönderimi : 28 HAZİRAN 2024
Online Kabul : 7 EYLÜL 2024
Online Basım : 23 EYLÜL 2024

ÖZET

Bu derleme makalesinde, dünya genelinde içme suyu kaynaklarının azalmasına yönelik olarak gri suyun yeniden kullanım potansiyeli ele alınmakta ve çeşitli teknik çözümler sunulmaktadır. Artan nüfus, kentleşme ve iklim değişikliği ile su stresi de artmakta ve atıksu arıtımı daha önemli hale gelmektedir. Gri su, evsel atıksuyun bir bileşeni olarak, tuvalet atıksuyu hariç diğer evsel faaliyetlerden kaynaklanan atıksu olarak tanımlanmaktadır. Gri su kendi içinde su kalitesine göre açık ve koyu gri su olarak 2 sınıfa ayrılmaktadır. Bu makalede gri suyun karakterizasyonu, arıtma yöntemleri ve çeşitli kullanım alanları incelenmektedir, gri suyun yeniden kullanımının kentsel ve kırsal su yönetimi için stratejik faydaları ortaya konulmaktadır. Fiziksel, kimyasal ve biyolojik arıtma yöntemleri ile avantajları ve sınırlılıkları detaylandırılmaktadır. Gri suyun arıtılması ve yeniden kullanımının su tasarrufu, ekonomik ve çevresel yararları, farklı ülkelerdeki yasal düzenlemeler ve uygulama örnekleri değerlendirilmektedir. Ayrıca, gri suyun yeniden kullanımı ile ilişkili riskler ve yönetim stratejileri üzerinde durularak, bu alandaki araştırmaların ve politikaların önemi vurgulanmaktadır. Kapsamlı literatür araştırması sonucu gri suyun sulamada ve tuvalet sifonlarında kullanımının en yaygın yeniden kullanım yolları olduğu görülmektedir. Ayrıca gri su arıtımında membran biyoreaktörler az alan kaplaması ve yüksek kalitede arıtılmış su eldesi sağlaması gibi avantajlarıyla ön plana çıkmaktadır. Gri su arıtma yöntemi belirlenirken, gri suyun oluştuğu kaynağa, gri suyun miktarına ve karakterizasyonuna bakılmalı ve yeniden kullanım amacına uygun arıtma yöntemi seçilmelidir.

Anahtar Kelimeler: Gri Su, Arıtma, Yeniden Kullanım

Grey Water Treatment and Reuse: Benefits and Risks

Abstract

This review article addresses the potential for grey water reuse in the face of diminishing drinking water supplies worldwide and argues that grey water should play a central role in water management strategies, while offering various technical solutions. With increasing population, urbanization and climate change, water stress is increasing and wastewater treatment is becoming more important. Grey water, as a fraction of domestic wastes, is defined as wastewater from domestic activities other than toilet wastes. Grey water is also divided into 2 categories as light and dark grey water according to water quality. In this article, the characterization, treatment methods and various uses of grey water are examined and the strategic advantages of its reuse for urban and rural water management are presented. Physical, chemical and biological treatment methods and their advantages and limitations are detailed. Water saving, economic and environmental benefits of grey water treatment and reuse, legal regulations and application examples in different countries are evaluated. In addition, the risks and management strategies associated with grey water reuse are highlighted and the importance of research and policies in this field is emphasized. As a result of the extensive literature review, it is seen that the most common ways of grey water reuse are irrigation and toilet flushing. In addition, membrane bioreactors come to the forefront in grey water treatment with their advantages such as small footprint and high-quality water. When determining the grey water treatment method, the source of grey water, the amount and characterization of grey water should be considered and the treatment method should be selected according to the purpose of reuse.

Keywords: Greywater, Treatment, Reuse

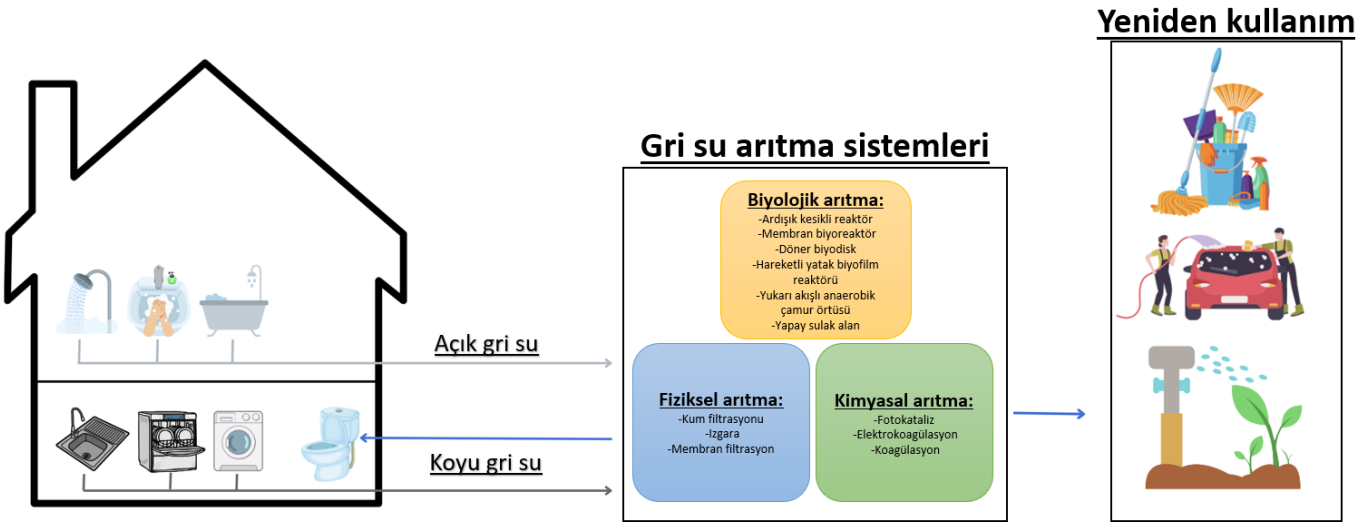
1. Giriş

Dünya genelinde içilebilir su kaynaklarının azalması giderek artan bir sorun haline gelmiş olup bu durum çoğunlukla çevre kirliliği, iklim değişikliği ve nüfus artışına bağlanmaktadır (Lanchipa-Ale vd., 2024). Birleşmiş Milletler'in 2022 yılı raporuna göre, yaklaşık 8 milyar olan dünya nüfusunun 2050 yılında 9,7 milyara, 2100 yılında ise 10,4 milyara ulaşacağı öngörülmektedir (UN, 2022). Bu demografik büyüme, özellikle kentleşme ve ekonomik kalkınmanın etkileriyle birleştiğinde, su kaynakları üzerinde dünya çapında ciddi bir baskı oluşturmaktadır ve küresel nüfusun yaklaşık %10'unu etkileyen yüksek seviyede su stresi riski oluşturmaktadır (C. He vd., 2021).

Özellikle yarı kurak ve kurak bölgelerde yağış miktarının azlığı ve değişkenliği ile yüksek buharlaşma, topraktaki su ve tuz dengesini bozmakta, bu da alternatif su kaynaklarına olan ihtiyacı arttırmaktadır. Su ve sanitoryona erişim, WHO ve UNICEF (2021) tarafından temel bir insan hakkı olarak tanımlanmış olmasına rağmen, dünya çapında 2,2 milyar insan güvenli içme suyuna, 3,6 milyar insan ise güvenli bir şekilde yönetilen sanitasyon hizmetlerine erişememektedir (Dos Santos vd., 2023). Mevcut ilerleme hızıyla, 2030 yılına kadar 1,6 milyar insanın güvenli içme suyuna, 2,8 milyar insanın ise uygun sanitasyon imkanlarına erişemeyeceği tahmin edilmektedir. Sürdürülebilir ve yaşanabilir kentler için su kıtlığının ve potansiyel çözümlerin kapsamlı bir şekilde değerlendirilmesi ve aksiyon alınması gerekmektedir (Öztekin, 2024).

Merkezi su arıtma tesislerinin yüksek yatırım maliyetleri ve bakım ihtiyaçları, özellikle gelişmemiş ve gelişmekte olan ülkelerde büyük zorluklar yaratmaktadır (Dos Santos vd., 2023). Bu nedenle, merkezi olmayan atıksu arıtma sistemlerinin kullanımı giderek daha fazla önem kazanmaktadır. Bu sistemlerde, gri su siyah sudan ayrılarak daha düşük kirletici konsantrasyonları ve daha yüksek hacimlerle yönetilmekte, böylece yeniden kullanım için daha uygun hale getirilmektedir (Kobayashi vd., 2020). Gri su, evsel faaliyetlerden kaynaklanan ve tuvalet atıkları hariç diğer tüm atıksuları içermektedir (Van de Walle vd., 2023). Bu bağlamda, gri suyun kullanımı, özellikle tuvalet sifonu, araba yıkama, bahçe sulama gibi yüksek kaliteli su gerektirmeyen faaliyetlerde yeniden kullanım için cazip bir alternatif olarak ortaya çıkmaktadır (Filali vd., 2023; Fırat vd., 2024). Gri su, gün içinde sürekli olarak oluşan sürdürülebilir bir kaynaktır. Gri su miktarı ve karakterizasyonu olduğu kaynağa göre değişmektedir. Gri suyun yeniden kullanılmasında en uygun arıtma sistemi seçilerek yeniden kullanım alternatifleri değerlendirilmelidir (Şekil 1).

Birleşmiş Milletler Sürdürülebilir Kalkınma Amaçlarından (BM, 2022) 6'ncısı, 2030 yılına kadar tüm insanların güvenli ve erişilebilir içme suyu ve sanitoryona erişimini hedeflemektedir. Sürdürülebilir su yönetimi ve alternatif su kaynaklarının geliştirilmesi, küresel su krizine çözüm bulmak adına hayati öneme sahiptir. Bu bakımdan gri su yeniden kullanımının, ekonomik ve çevresel avantajlar sağlayarak Sürdürülebilir Kalkınma Amaçlarına ulaşmada önemli bir araç olduğu düşünülmektedir. Bu derleme makale, gri suyun özellikleri ve karakterizasyonu, gri su arıtma yöntemleri, gri suyun yeniden kullanılmasının faydaları ve riskleri, dünyada gri su yeniden kullanımı ile ilgili uygulamalar ve mevzuat açıklanmıştır.



Şekil 1. Gri su oluşumu, arıtımı ve yeniden kullanımı

2. Gri suyun özellikleri ve miktarları

2.1 Gri suyun karakterizasyonu

Evsel atıksu, gri su ve siyah su olarak iki ana kategoriye ayrılmaktadır. Siyah su, tuvalet kaynaklı atıksuları temsil etmekte; gri su ise ev içerisinde yer alan çamaşır ve bulaşık makineleri, banyolar, duşlar, mutfaklar ve lavabolar gibi çeşitli

kaynaklardan meydana gelmektedir (Abdalla vd., 2021). Gri suyun kaynağına bağlı olarak kalitesi ve miktarı değişkenlik göstermektedir. Tablo 1'de gri su kaynakları ve karakterizasyonu gösterilmektedir. Gri su kalitesine göre açık gri su ve koyu gri su olmak üzere 2 sınıfa ayrılmaktadır. Açık gri su banyo, duş, el yıkama gibi aktiviteler sonucu oluşurken, koyu gri su mutfak lavabolarından, çamaşır ve bulaşık yıkama aktivitelerinden oluşmaktadır (Leiva vd., 2021). Açık gri su,

şampuan, sabun, diş macunu, az miktarda idrar, vücut bakım ürünleri, kıllar, deri, saç ve vücut yağları içermektedir. Mutfak lavabosunda oluşan koyu gri su, bulaşık deterjanları, yağ ve katı yağlar, yemek artıkları, çığ et artıkları, meyve ve sebze kabukları, çay, kahve ve gıda koruyucuları içermektedir. Çamaşır yıkama sonucu oluşan koyu gri su deterjanlar, yağlar, çözücüler, ağartıcılar, boyalar, sıcak su ve giysilerden gelen biyolojik olarak parçalanamayan liflerden kaynaklanan kimyasalları içermektedir (Elhegazy ve Eid, 2020). Koyu gri su, deterjanlardan dolayı genellikle yüksek pH ve fosfor içermektedir (Noutsopoulos vd., 2018). Açık gri su koyu gri suya göre nispeten daha az kirletici içermektedir. Gri su, bir evde üretilen toplam atıksuyun organik yükünün %30-50'sini ve besi maddesi yükünün %9-20'sini oluşturmaktadır (Van de Walle vd., 2023). Gri suyun yeniden kullanımı, su kaynaklarının sürdürülebilir yönetimi için önemli bir strateji sunmaktadır ancak çeşitli kaynaklardan gelen atıksuyun uygun şekilde arıtılması ve çevresel etkilerinin azaltılması için kirleticilerine göre özelleştirilmiş arıtma süreçlerinin uygulanması gerekmektedir (Babaei vd., 2019).

Mutfak lavabosunda yıkanan sebzeler, süt ve süt ürünleri, et kalıntıları ile lavaboda temizlenen yağlı yemek bulaşıkları, organik madde miktarını önemli ölçüde artırmaktadır. Açık gri su içerisindeki organik maddelerin büyük bir kısmının sabun ve şampandan gelmesi, bu suyun biyolojik olarak ayrıştırılabilirliğini azaltmaktadır (Van de Walle vd., 2023). Buna karşılık, koyu gri su içerisindeki organik maddelerin çoğunlukla yemek artıkları ve deterjanlardan oluşması, bu suyun biyolojik ayrıştırılabilirliğini artırmaktadır (Khanam ve Patidar, 2022). Bunlara ek olarak, deterjanların içerdiği organik madde ve fosfor koyu gri suyun kirletici yükünü önemli ölçüde yükseltmektedir (Shaikh ve Ahammed, 2020).

Gri sudaki fosfor konsantrasyonunun büyük kısmı bulaşık makinesi deterjanından kaynaklanmaktadır (Noutsopoulos vd., 2018). Bu nedenle açık gri su genellikle koyu gri sudan daha düşük fosfor içeriğine sahiptir (Ziemba vd., 2018). Fosfor bazı deterjanlar, deterjanın temizleme gücünü arttırmak için geçmiş yıllarda kullanılmaktaydı (Kogawa vd., 2017). Kullanılan deterjanın fosfor içermemesi gri sudaki fosfor konsantrasyonunu önemli ölçüde azaltmaktadır (F. Li vd., 2009). 1940 yılından önce piyasada bulunan çamaşır deterjanlarında fosfor kullanımı yaygın değilken, 1945 yılından itibaren deterjanlardaki fosfor oranı %8'in üzerine çıkmıştır. Bu artış, deterjanlardan kaynaklanan yüksek fosfor yüklerinin, ötrofik göllerin oluşumuna yol açmıştır. Bu durumun ortaya çıkardığı çevresel sorunlar nedeniyle birçok ülke, deterjanlarda bulunabilecek maksimum fosfor miktarını sınırlandırma yoluna gitmiştir (Haq, 2021). 1972 yılında, ABD'nin bazı eyaletleri deterjanlardaki fosforun maksimum ağırlığını %8,7 olarak sınırlandırmış, ancak kısa bir süre sonra bu oran %0,5'e düşürülmüştür. 2000 yılına gelindiğinde, Avrupa'nın 7 ülkesi fosfor içeren deterjanların kullanımını tamamen yasaklamıştır. Diğer Avrupa ülkeleri ise deterjanlardaki fosfor içeriği için belirli maksimum sınır değerler getirmiştir (van Puijenbroek vd., 2018). Sentetik deterjanlarda biyolojik olarak ayrışmayı azaltan alkil benzen sülfonat içeren ürünlerin yasaklanması 1965 yılında ABD'de başlamıştır (Kogawa vd., 2017). Fosfor bazlı deterjanların Avrupa Birliği ve ABD dahil olmak üzere birçok yerde yasaklanmasına rağmen halen bazı ülkelerde bu tür deterjanlar kullanılmaktadır (Khalil ve Liu, 2021; X. Chen vd., 2022).

Gri sudaki azot içeriğinin büyük kısmı lavabolarda yemek atıklarının temizlenmesi sonucu oluşmaktadır (De Gisi vd., 2016). Gri sudaki azot konsantrasyonu evsel atıksuya göre oldukça düşüktür. Bunun sebebi evsel atıksudaki azot içeriğinin büyük kısmının tuvaletlerde insan dışkı ve idrardan kaynaklanmasıdır (F. Li vd., 2009).

Gri suda patojenlerin kaynağı el yıkama, duş, mutfakta çığ tavuk, et ve çamaşır yıkamadır (Disha vd., 2020; Porob vd., 2020; Goncalves vd., 2021). Gri sudaki fekal kirlenmenin kaynağı genellikle bebek bezlerinin yıkanmasıdır (Porob vd., 2020). Ham gri suda patojenlerin varlığına ilişkin önceki araştırmalar, nispeten yüksek konsantrasyonlarda (10^4 CFU/100mL'den fazla) *Salmonella spp.*, *Pseudomonas aeruginosa*, *Staphylococcus aureus*, *Legionella pneumophila* ve *Escherichia coli* gibi patojenler bulunduğunu belirtmektedir (Van de Walle vd., 2023). Ayrıca gri suda, protozoa, helmintler ve diğer önemli mikrobiyal kirletici kaynaklarının bulunabileceği belirtilmektedir (Ottoson ve Stenström, 2003).

Gri su genellikle alkali karakterdedir ve bunun sebebi deterjanların kullanımındadır (Chrispim ve Nolasco, 2017; Disha vd., 2020). Bulaşık ve çamaşır makinesinden oluşan gri suyun pH'ı 10'a kadar çıkabilmekte iken, mutfak lavabosundan kaynaklanan gri suyun pH'ı 7 civarındadır (Noutsopoulos vd., 2018).

Gri suda, kullanılan deterjanlar ve kişisel bakım ürünlerinden dolayı paraben, benzofenon, triklosan ve ftalat başta olmak üzere birçok mikrokirletici bulunmaktadır (De Gisi vd., 2016). Eriksson vd. (2003) gri suda yüzey aktif maddeler, emülgatörler, koruyucular, antioksidanlar, yumuşatıcılar, plastikleştiriciler ve çözücüler dahil olmak üzere 200'den fazla mikro kirletici tespit etmişlerdir. Gri suda ağır metallerin içeriği evsel atıksuya kıyasla oldukça düşüktür. Eriksson ve Donner (2009) özellikle banyo gibi aktivitelerden kaynaklanan açık gri suda ağır metal içeriğinin oldukça düşük olduğunu tespit etmişlerdir. Shaikh ve Ahammed (2020), gri sudaki ağır metal içeriğini analiz ettikleri derleme çalışmasında tüm ağır metallerin Dünya Sağlık Örgütü İçme Suyu Standartının altında olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca aynı çalışmada gri sudaki ağır metallerin kaynağının metal borular olabileceği vurgulanmaktadır.

Gri suda en yaygın bulunan anyonik yüzey aktif maddenin lineer alkilbenzen sülfonat (LAS) olduğu belirtilmektedir (Khalil ve Liu, 2021). Örneğin, açık ve koyu gri suda sırasıyla 78 mg/L ve 118 mg/L'ye kadar ortalama LAS konsantrasyonları bildirilirken (Shaikh ve Ahammed, 2020), evsel atıksudaki değerler 10 mg/L'nin altındadır (Nie vd., 2019). Dünyada yüzey aktif madde üretiminin yaklaşık %60'ını anyonik yüzey aktif madde oluştururken, iyonik olmayan yüzey aktif maddeler %30'unu, amfoterik ve katyonik yüzey aktif maddeler ise %10'unu oluşturmaktadır (Palmer ve Hatley, 2018).

2.2 Gri suyun miktarı

Evsel atıksu hacminin önemli bir kısmı gri su tarafından oluşturulmaktadır. Hindistan'da gerçekleştirilen bir araştırmaya göre, gri su toplam atıksu hacminin en az %80'ini oluşturmaktadır. Bu miktarda en büyük pay (%44) mutfak kaynaklı gri suya aittir (Vakil vd., 2014). Yunanistan'da yapılan başka bir çalışmada ise, kişi başına düşen ortalama günlük gri su üretiminin 98 litre olduğu ve toplam evsel atıksu üretiminin yaklaşık %70-75'ini oluşturduğu tespit edilmiştir (Noutsopoulos vd., 2018). Almanya'da kişi başına günlük gri su oluşumu kişi başına 70 litre olarak belirtilmiştir ve bu miktar evsel atıksuyun yaklaşık %50'sini oluşturmaktadır (Ceconet vd., 2019). Eriksson vd. (2003) gri su hacmini evsel atıksu hacminin %75'i olarak belirtirken, benzer bir oran (%60-70) Friedler ve Hadari (2006) tarafından raporlanmıştır. Literatürde gri su hacmi ile ilgili çeşitli veriler bulunmakla birlikte, öncü çalışmalardan olan (F. Li vd., 2009) ve (Z. He vd., 2022) gri suyun evsel atıksu hacminin %50-80'ini oluşturduğunu belirtirken, (Van de Walle vd., 2023) ise %75-90 arasında bir oran belirtmiştir. Çalışmalar arasındaki bu çeşitlilik, gri su hacminin tüketim alışkanlıklarına göre önemli

farklılıklar gösterdiğini ortaya koymaktadır. Sosyo-ekonomik yapı, çamaşır ve bulaşık makinelerinin kullanımı, evin büyüklüğü ve evde yaşayan kişi sayısı gibi faktörler gri su oluşumunu etkilemektedir (Khanam ve Patidar, 2022). Düşük gelir düzeyine sahip ülkelerde, banyo, el yıkama, mutfak ve çamaşır yıkama kaynaklı gri su oranları sırasıyla %27±14, %21±17, %28±17 ve %19±7 iken yüksek gelir düzeyine sahip ülkelerde bu oranlar %40±19, %10±15, %22±10 ve %25±10 olarak raporlanmıştır (Shaikh ve Ahammed, 2020).

Gri suyun miktarı ve karakterizasyonu ülkelerin gelişmişlik düzeyine ve su kaynaklarına sahip olma durumuna göre değişmektedir. Az gelişmiş ve suya erişimi kısıtlı olan ülkelerde gri su hacmi daha az ve su ile seyrelme az olduğu için gri su kirletici konsantrasyonları daha yüksek olmaktadır (Khalil ve Liu, 2021).

Tablo 1. Gri su kaynağı ve karakterizasyonu değerleri

Gri su kaynağı	Kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ) (mg/L)	Çözülmüş KOİ (mg/L)	Biyokimyasal oksijen ihtiyacı (BOİ) (mg/L)	Askıda katı madde (AKM) (mg/L)	Fekal koliform (EMS/100mL)	Toplam fosfor (mg/L)	Amonyum azotu (mg/L)	İletkenlik (uS/cm)	pH	Referans
Duş										
Banyo	294	-	130	353	-	-	-	1400	7,40	(Prathapar vd., 2005)
lavabosu	58	-	42	505	-	-	-	1500	7,10	
Çamaşır yıkama	231	-	179	315	-	-	-	2900	8,30	
Karışık	245	177	90	48	10 ³	7,3	1,30	401	7,10	(Atasoy vd., 2007)
Karışık	2568	-	1056	845	3 x 10 ⁵	19,5	-	1830	6,35	(Halalsheh vd., 2008)
Banyo ve duş	412	180	200	115	-	0,2	-	-	-	(Chaillou vd., 2011)
Duş	372	147	-	60	-	-	4,50	812	7,23	(Antonopoulou vd., 2013)
Banyo	273	106	-	54	-	-	1,20	749	7,10	
Mutfak	867	202	-	156	-	-	1,70	768	6,76	
Banyo ve duş	461	-	81	148	930	-	2,10	-	7,50	(Vakil vd., 2014)
El yıkama	225	-	43	48	39	-	1,60	-	7,50	
Mutfak	602	-	293	308	230	-	4,70	-	6,20	
Çamaşır yıkama	824	-	269	1852	430	-	10,70	-	9,40	
Abdesthane	318	-	-	-	-	-	-	380	7,95	(Chowdhury, 2015)
Karışık	757	-	252	-	-	2,3	14,80	2044	7,00	(Oteng-Peprah vd., 2018)
Banyo ve duş	390	193	263	73	-	0,1	0,53	318	7,50	(Noutsopoulos vd., 2018)
El yıkama	427	272	305	90	-	1,3	0,33	318	7,60	
Mutfak	1119	518	831	319	-	2,7	0,20	449	6,90	
Çamaşır yıkama	2072	1165	1363	169	-	1,2	1,40	653	8,30	
Bulaşık yıkama	411	307	184	11	-	187	0,11	2199	10,00	
El yıkama	77	-	44	5	-	-	-	580	7,6	(Laaffat vd., 2019)
Karışık	29	-	106	47	6 x 10 ³	0,33	-	596	7,23	(Potivichayanon vd., 2021)
Karışık	-	-	89	150	-	-	-	776	7,31	(Henderson vd., 2022)
Çamaşır ve bulaşık yıkama	2563	-	1409	1439	7,9 x 10 ⁹	-	-	1650	6,90	(Compaore vd., 2023)
El yıkama ve duş	92	-	46	40	2,8 x 10 ⁵	0,74	5,71	-	7,01	(Karaham vd., 2023)

3. Gri Su Arıtma Teknolojileri

Evsel atıksu bileşenlerinden en kirlisi tuvaletlerden kaynaklanan dışkı içerikli siyah su iken, gri su bunu içermediği için kirletici konsantrasyonu siyah sudan çok daha düşüktür. Gri suyun çok kirliliği olmaması, arıtılarak yeniden kullanıma potansiyelini artırmaktadır (Samayamanthula vd., 2019). Gri suyun yeniden kullanılması için mutlaka arıtılması gereklidir (USEPA, 2012). Gri suyun arıtılmasında basit arıtma sistemi (kaba filtrasyon ve dezenfeksiyon); kimyasal sistemler (fotokataliz, elektrokoagülasyon, koagülasyon); fiziksel sistem (kum filtreleri, adsorpsiyon, membran filtrasyonu); biyolojik sistemler (ardışık kesikli reaktör, membran biyoreaktör (MBR), döner biyolojik disk, hareketli yatak biyofilm reaktörü ve yukarı akışlı anaerobik çamur örtüsü; ve doğal sistemler (yapay sulak alanlar) kullanılmaktadır (Ceconet vd., 2019; Awasthi vd., 2024). Bu arıtma sistemlerinin fayda ve mahzurları Tablo 2'de gösterilmektedir.

Açık gri su arıtımı, kum filtrasyonu, membran filtrasyonu veya yapay sulak alanlar gibi yöntemlerle gerçekleştirilebilir. Buna karşın, koyu gri su arıtımında aerobik veya anaerobik biyolojik süreçler tercih edilmektedir. Fiziksel ve kimyasal arıtma yöntemlerinin biyolojik yaklaşımlar üzerindeki temel üstünlüğü, besin eksikliklerine karşı gösterdikleri

dayanıklılıktır (Uceveli ve Kaya, 2021). Fiziksel arıtma yöntemlerinde özellikle koyu gri suyun arıtılması sırasında filtre tıkanıklığı gibi sorunlarla karşılaşmaktadır (Khalil ve Liu, 2021). Bu durum, koyu gri sudaki yüksek katı madde konsantrasyonları nedeniyle ortaya çıkmaktadır. Gri su arıtımında fiziksel, kimyasal ve biyolojik proseslerin hibrit olarak uygulanmasının arıtma verimlerini arttırdığı bilinmektedir (Ghaitidak ve Yadav, 2016). Noutsopoulos vd. (2018) tarafından koagülasyon, sedimentasyon, kum filtrasyonu, granüler aktif karbon (GAC) ve dezenfeksiyon tekniklerinin kombinasyonunu kullanarak açık gri su arıtımında yüksek kaliteli arıtılmış su elde edilmiştir. Nguyen vd. (2020) tarafından gerçekleştirilen bir araştırmada, lamelli durultucu, kum filtrasyonu ve aktif karbon içeren kombine bir reaktör sistemi incelenmiş ve KOİ için yaklaşık %60'lık bir giderim verimi elde edilmiştir. Bahrami vd. (2020), GAC, zeolit ve kum filtrasyonunu, gri su arıtımında organik madde ve bulanıklığı gidermek için etkili yöntemler olarak raporlamışlardır. Alsulaili vd. (2017), özellikle okullarda gri su arıtımı için kum filtrasyonunu takiben ultraviyole (UV) dezenfeksiyon uygulamasıyla arıtılmış gri suyun sulama suyu kalite standartlarına uyum sağladığını raporlamışlardır. aynı çalışmada açık gri su arıtımında AKM, KOİ ve BOİ parametreleri için sırasıyla %63, %30 ve %20'ye varan giderim verimleri elde edilmiştir. Kum filtrasyonu uygun maliyetli bir arıtma seçeneği sunmaktadır; ancak, Ghaitidak ve

Yadav (2016) kum değişiminin (30-40 gün aralıklarla) getirdiği sınırlılıkları vurgulamaktadır. Buna karşılık, GAC, daha yüksek maliyetine rağmen, gri sudan renk, KOİ, bulanıklık ve ağır metaller için yüksek giderim verimliliği sağlayabilmektedir. Leong vd. (2018) çok tabakalı filtre (MMF), GAC ve ozon dezenfeksiyonu kullanılan pilot ölçekli bir arıtma sisteminde, KOİ, BOİ, amonyak azotu, fosfor, renk, bulanıklık, AKM, toplam koliform, bakır ve çinko dahil çeşitli parametrelerde önemli düşüşler sağladıklarını rapor etmiştir. Ghaitidak ve Yadav (2016), polialüminyum klorür (PAC), demir klorür ($FeCl_3$), şap ve kum filtrasyonunun kullanımını araştırmış ve arıtılmış gri suyun sulama suyu standartlarına uygun olduğunu belirtmişlerdir. Ndiaye vd. (2020) yüksek yüzey aktif madde, sodyum ve yağ konsantrasyonları içeren

koyu gri suların arıtılması için uygun maliyetli bir verimfiltrasyon sistemini araştırmışlardır. Bu sistemde solucan, talaş, kum ve çakıl katmanlı ortam kullanılmış ve yüksek giderim verimi elde edilmiştir. Düşük maliyetli inert bir malzeme olan biyokömür, Dalahmeh vd. (2016) tarafından düşük ve orta gelirli ülkelerde gri su arıtımı için araştırılmış ve elde edilen bulgular, biyokömürün %90'ı aşan BOİ giderim verimliliğine ulaşmada etkili olduğu göstermiştir. Vakil vd. (2014), gri su arıtımında elektrokoagülasyon prosesi kullanarak %70 KOİ giderim verimi elde ederken, Mousazadeh vd. (2023) KOİ, renk, bulanıklık ve toplam organik karbon (TOK) giderim verimlerinde sırasıyla %96,1, %97,5, %90,9 ve %98 değerlerine ulaşmıştır.

Tablo 2. Gri su arıtma yöntemlerinin fayda ve mahzurları

Gri su arıtma yöntemi	Avantaj	Dezavantaj	Referans
Dönen biyolojik kontaktörler	-İşletmesi basit ve maliyeti düşüktür. -Az çamur oluşur. -Az yer kaplar.	-Gri sudaki antimikrobiyal maddeler biyofilm oluşumunu bozmaktadır. -KOİ giderim verimi düşüktür.	(Awasthi vd., 2024)
Ardışık kesikli reaktörler	-Az yer kaplar. -Maliyeti düşüktür. -Kontrollü ve az çamur oluşumu vardır.	-Sürekli beslemeli sistemler için uygun değildir. -İşletme döngülerinin ayarlanması karmaşıktır.	(Priyanka vd., 2022)
Anaerobik çamur battaniyeleri	-Toksik ve çok yüklere dayanıklıdır. -Az yer kaplar.	-Gri sudaki antimikrobiyal maddeler biyofilm oluşumunu bozmaktadır.	(Awasthi vd., 2024)
Membran biyoreaktör	-Az yer kaplar. -Yüksek kalitede çıkış suyu elde edilir.	-Membran tıkanabilir. -Membran fiyatlarından dolayı ilk yatırım maliyeti artmaktadır. -Enerji maliyeti yüksektir.	(Noutsopoulos vd., 2018)
Yapay sulak alan	-İşletmesi basit ve maliyeti düşüktür. -Enerji ihtiyacı düşüktür.	-Fazla yer kapladığı için şehir merkezlerinde uygulaması zordur. -Gri sudaki deterjanlar sulak alandaki bitkilere zarar verebilir.	(Abunaser ve Abdelhay, 2020)
Elektrokoagülasyon	-İşletmesi basit ve maliyeti düşüktür. -Az yer kaplar. -Az çamur oluşur.	-Kullanılan elektrotlar korozyon nedeniyle zamanla bozularak düzenli bakım ve değiştirme gerektirebilir.	(Barışçı ve Turkey, 2016)
Kum filtrasyonu	-İşletmesi basit ve maliyeti düşüktür. -Tasarımı ve uygulanması kolay	-Büyük ölçekli uygulamalarda geniş alan gereksinimi bulunmaktadır. -Organik madde giderim verimi çok yüksek değildir.	(Charchalac Ochoa vd., 2014)
Granüler aktif karbon	-İşletmesi basittir. -Az yer kaplar. -KOİ giderim verimi yüksektir.	-Adsorpsiyon kapasitesinin zamanla azalmaktadır. -Maliyeti yüksektir.	(Sharaf ve Liu, 2021)

Gri suyun aerobik biyolojik arıtmada arıtılmasında dışardan besin maddesi takviyesi ile arıtma verimleri yükseltilebilmektedir (Krishnan vd., 2008). Ham koyu gri suyun KOİ:N:P oranı 100:1.82:0.76 olan bir çalışmada, besin maddesi takviyesi ile biyolojik arıtmada %90'ın üzerinde KOİ giderim verimi elde edilmiştir (Krishnan vd., 2008). Gri suyun anaerobik arıtılmasında besin maddesi ilavesini inceleyen bir çalışmaya literatürde rastlanmamıştır (Khalil ve Liu, 2021).

Yüzey aktif maddeler aerobik koşullar altında biyolojik olarak parçalanabilir, ancak anaerobik şartlarda biyolojik olarak parçalanması zordur (Khalil ve Liu, 2021). Gri su ile siyah su arasındaki temel farklar, atıksudaki toplam azotun yalnızca onda birini içermesi, daha az fekal patojenik organizma ve daha yüksek konsantrasyonlarda yüzey aktif madde içermesidir (Oron vd., 2014). Bu farklılık gri suyun biyolojik proseslerle arıtılmasında belirli kısıtlar oluşturabilmektedir (Khalil ve Liu, 2021). Yüzey aktif maddelerin varlığının aktif çamur havalandırma tanklarında oksijen kütle transferini azalttığı bildirilmiştir (Henkel vd., 2009). Ayrıca yüzey aktif maddelerin anaerobik arıtmada mikroorganizmalar üzerinden toksik etkisi olduğu belirtilmektedir (Khalil ve Liu, 2021). Bu dezavantajlara rağmen günümüzde kullanılan yüzey aktif maddelerin çoğunlukla biyolojik ayrışabilirliğinin yüksek olması biyolojik arıtma proseslerinin verimini arttırmaktadır. Çok sayıda çalışma, aktif çamur tanklarının ve damlatmalı filtrenin LAS için sırasıyla %98 ve %90'ın üzerinde giderim verimi sağlayabildiğini raporlamışlardır (Palmer ve Hatley, 2018). Anaerobik koşullar altında LAS giderimi tipik olarak %40 ila %85 arasında bir giderim verimliliğine sahiptir (Khalil ve Liu, 2021). Yüzey aktif maddelerin bazı metojenik bakterilere karşı yüksek toksisiteyi nedeniyle anaerobik prosesin verimliliğini azalttığı gösterilmiştir (Gavala ve Ahring,

2002; Garcia vd., 2006). Yüksek yüzey aktif madde konsantrasyonlarının, biyolojik proseslerdeki karıştırma ve havalandırma nedeniyle aerobik ve anaerobik reaktörlerde köpüklenme sorunlarına yol açtığı da bilinmektedir (Petkova vd., 2020).

Gri su arıtımında en yaygın kullanılan biyolojik arıtma sistemi MBR'dir (Ceconet vd., 2019). MBR'lerin binalarda, iş yerlerinde, havalimanlarında ve sitelerde merkezi olmayan gri su arıtımı için cazip bir çözüm olduğu belirtilmektedir ve su geri kazanımı için oldukça avantajlıdır (Khajvand vd., 2022). Geleneksel aktif çamur sistemleri, tipik olarak 4000 mg/L civarında uçucu askıda katı madde (UAKM) konsantrasyonu ile biyokütle sağlarken (Tchobanoglu, vd., 2003), MBR sistemleri 10000 mg/L'ye varan daha yüksek UAKM konsantrasyonlarına imkan tanımaktadır. Bu yüksek konsantrasyonlar, MBR sistemlerinin daha küçük tank hacimlerinde etkin bir biyolojik arıtma gerçekleştirmesine olanak sağlamaktadır (Lousada-Ferreira vd., 2010). MBR teknolojisinin diğer avantajları arasında, çeşitli atıksu türlerinin arıtılabilmesi, düşük bakım gereksinimleri, kompakt yapıda olması ve azalan çamur üretimi sayılabilir (Obaideen vd., 2022). Bununla birlikte, MBR sistemlerinin mahzurları arasında yüksek enerji maliyetleri ve membran kirlenmesi gibi sorunlar bulunmaktadır (Iorhemen vd., 2016). Membran kirlenmesi akıda azalmaya yol açmaktadır. Membran kirlenmesini azaltmak için uygulanan fiziksel ve kimyasal geri yıkama işlemleri, işletme maliyetlerini artırmakta ve membran ömrünü kısaltmaktadır (Obaideen vd., 2022). Ayrıca, MBR sistemlerinde elde edilen yüksek biyokütle konsantrasyonları, mikrobiyal metabolizmaları desteklemek için gerekli olan aşırı havalandırma ihtiyacını doğurmakta ve bu da enerji tüketiminde ve dolayısıyla işletme maliyetlerinde artışa neden olmaktadır (Hao vd., 2018).

Döner biyolojik disk, biyofilm tabakası ile kaplı döner plastik medyalar içeren bir atıksu arıtma prosesidir. Disk döndükçe hava ile temas eden kısımda oksidasyon ve nitrifikasyon gerçekleşmekte iken diskin suda batık kısmında anoksik koşullarda denitrifikasyon gerçekleşmektedir (Cortez vd., 2013).

Ardışık kesikli reaktörler, bir dizi farklı operasyonel aşamayı (dolum, reaksiyon, çökeltme, boşaltma) tek bir reaktör içerisinde gerçekleştirir ve bu yönüyle hem yer hem de maliyet açısından verimlidirler. Priyanka vd. (2022), ardışık kesikli reaktörle gri su arıtımında, %92 KOİ, %91 TOK, %84 toplam azot giderim verimleri elde ettiklerini belirtmişlerdir.

Kaynak sıkıntısı çeken, düşük ve orta gelirli ülkelerde, özellikle de Sahra altı Afrika ülkelerinde, inşa edilmiş yapay sulak alanlar gri su arıtımı için yaygın bir seçenektir (Compaore vd., 2023). Sulak alan sistemlerinin basitliği, düşük enerji gereksinimi ve kırsal ortamlarda kanıtlanmış etkinliği özellikle düşük gelirli ülkelerde cazip kılmaktadır (Kobayashi vd., 2020). Abunaser ve Abdelhay (2020) karışık gri suyu yapay sulak alanda arıtarak BOİ, KOİ ve AKM için sırasıyla %90, %90 ve %92'lik giderim verimi elde etmişlerdir.

Gri su arıtımında arıtma sonrası dezenfeksiyon prosesleri mikrobiyal riski azaltmak için uygulanmalıdır (Goncalves vd., 2021). Büyüklüğü nanometre mertebelerinde olan virüslerin giderilmesi için uygulanan ultrafiltrasyon ve nanofiltrasyon (NF) gibi membran sistemlerde virüs ve bakteriler giderilse dahi ek olarak membran sistemini takiben dezenfeksiyon uygulanması sağlık risklerini azaltmak için önerilmektedir (C. Chen vd., 2021). Güneş ışığı, patojenlerin giderilmesinde kullanılan dezenfeksiyon yöntemlerinden bir tanesidir ve bu yöntem solar dezenfeksiyon olarak adlandırılmaktadır (Al-Gheethi vd., 2019). 6 saatlik solar dezenfeksiyon gri sudaki patojenleri önemli ölçüde ortadan kaldırmıştır (Disha vd., 2020). Ancak bulanıklığın fazla olması solar dezenfeksiyonun etkinliğini düşürmektedir. UV dezenfeksiyon gri su arıtımında sıkça kullanılmaktadır. UV dezenfeksiyon, kimyasal içermemesi ve kompakt yapıyla merkezi olmayan sistemlerde önemli avantajlara sahiptir (Teodoro vd., 2018). Gri su arıtımında UV dezenfeksiyonda 50 mWs/cm² UV dozunun yeterli olduğu belirtilmektedir (Laaffat vd., 2019). Ayrıca UV dezenfeksiyon organik madde oksidasyonu da sağlayabilmektedir. Alsulaili vd., (2017), gri suda UV dezenfeksiyon ile KOİ konsantrasyonunun 53,4 mg/L'ten 26,7 mg/L'ye azaltıldığını belirtmektedir.

4. Arıtılmış gri suyu yeniden kullanımı

4.1 Kullanım alanları

Arıtılmış gri suyun içilebilir olmayan amaçlar için geri dönüştürülmesi ve yeniden kullanılması, tatlı su ihtiyacı üzerindeki baskının önemli ölçüde azaltılabilmesi potansiyeline sahiptir (Vakil vd., 2014). Gri su evsel atıksuya göre daha temiz bir atıksu olması ve arıtılması daha kolay olması yeniden kullanılmasında avantaj sağlamaktadır. Ayrıca toplam evsel atıksuyun büyük bir kısmını gri suyun oluşturması, geri kazanım potansiyelini ortaya koymaktadır (Van de Walle vd., 2023). Arıtılmış gri su tuvalet sifon suyunu, sulamada, rekreasyon alanlarında ve temizlik işlerinde kullanılmaktadır (Amaris vd., 2020). Gri suyun yeniden kullanımının büyük kısmını kentsel uygulamalar oluşturmaktadır ancak pek yaygın olmasa da arıtılmış gri su yer altı suyuna deşarj ve endüstriyel amaçlar için de kullanılmaktadır (Daniel vd., 2023).

Alternatif bir su kaynağı olarak gri su, tarımsal sulamada kullanılabilir (Cardoso ve Bodnar, 2022). Gri su boru hatları genellikle mor renge boyanarak ana su şebekesinden farklı olarak gösterilmektedir (Oron vd., 2014). Müstakil evlerde

bahçelerinde sulama suyu ve araba yıkama gibi diğer ev dışı su kullanımları su talebinin büyük bir kısmını oluşturmaktadır. Örneğin, Kaliforniya'da evin bahçesi ve garajındaki su kullanımı evsel su kullanımının %53'ünü oluşturmaktadır (Aslı vd., 2023). Üretilen toplam gri suyun neredeyse yarısını kullanarak bir evin tuvalet sifonu ve sulama suyu ihtiyacının tamamı karşılanabilir ancak bu su talebi ve gri su arzına göre değişmektedir (Shaikh ve Ahammed, 2020). Ürdün'de bazı camilerde abdest alma sonucu oluşan gri su, düşük maliyetli ve kullanımı kolay sistemlerle arıtılarak peyzaj sulamasında kullanılmaktadır (Al-Zu'bi vd., 2015).

Tuvalet sifonunda kullanılacak suyun kalitesi insanlar tarafından pek önemli görülmesi de bu suda bulunabilecek mikrobiyal kirlilik birçok hastalığa sebep olabilmektedir. Arıtılmamış gri su, kokusu, klozetin lekelenme potansiyeli ve bakteri ve virüs taşıması nedeniyle tuvalet sifonu için kullanılması önerilmemektedir (Mourad vd., 2011).

Yağmur suyuyla seyreltme, gri su içerisindeki kirlenici konsantrasyonlarını azaltma ve pH dengesini sağlama konusunda uygulanabilir bir strateji olarak öne çıkmaktadır (Leong vd., 2018). Yağmur suyu hasadı, alternatif bir su kaynağı olarak değerlendirilmekte; fakat özellikle yoğun nüfuslu alanlarda artan su taleplerini karşılamada yetersiz kalabilmektedir (Hamidi vd., 2023). Bunun ana sebepleri arasında yüksek depolama ihtiyacı ve sınırlı yağış modelleri bulunmaktadır (Leong vd., 2018). Almanya'da gerçekleştirilen Impulse Projesi'nde ise, cephe yeşillendirmelerini sulamak amacıyla %75 arıtılmış gri su ve %25 yağmur suyu karışımı kullanılmıştır (Morandi vd., 2021). Bu uygulama, su kaynaklarının daha etkin kullanımı ve çevresel sürdürülebilirlik adına önemli bir örnektir.

4.2 Gri Suyun Kullanımının Faydaları ve Riskleri

Gri suyun yeniden kullanılmasının su tasarrufu konusunda önemli faydaları bulunmaktadır. Brezilya'da yapılan bir çalışmada gri suyun arıtılarak yeniden kullanılmasıyla, %28,7 ila %34,8 arasında içilebilir su tasarrufu sağlanmıştır (Ghisi ve Ferreira, 2007). Avusturalya'da yapılan bir çalışmada gri suyun konut bahçelerinde sulamada kullanılmasıyla şebeke suyuna olan ihtiyacın %33 ila %59 arasında değişen oranlarda azalma sağlayabileceği gösterilmiştir (Byrne vd., 2020). Gri suyun yalnızca tuvalet sifonu için yeniden kullanımı, evlerde %30'a kadar, ofis binalarında ise %60'a kadar su tasarrufu sağlayabilmektedir (Zadeh vd., 2013). Buna ek olarak, bahçe sulaması için yeniden kullanımda, bahçeli müstakil evlerde %40 oranında su tasarrufu sağlandığı belirtilmektedir (Penn vd., 2012). Gelişmiş ülkelerdeki ortalama atıksu miktarları göz önünde bulundurulduğunda ve tüm gri su akışlarının tamamen yeniden kullanıldığı varsayıldığında, teorik olarak %80'e varan toplam su tasarrufu elde edilebileceği vurgulanmaktadır (Van de Walle vd., 2023). Gri suyun yeniden kullanımı, özellikle kırsal bölgelerde, ekonomik ve çevresel avantajlar sağlamaktadır. Kırsal yerleşimlerin dağınık yapısı ve düşük nüfus yoğunluğu, geleneksel su temini ve atıksu altyapılarının inşasını ekonomik ve teknik olarak zorlaştırmaktadır (Massoud vd., 2009; K. Li vd., 2023). Gri suyun yeniden kullanılmasıyla şebeke suyuna olan ihtiyaç azalacağı için su arıtma tesisi ve su temini maliyetlerinde azalma olabileceği düşünülmektedir (Laaffat vd., 2019). Bu bağlamda, gri suyun yeniden kullanımı, su tasarrufu sağlamak için maliyet-etkin bir yöntem olarak öne çıkmaktadır.

Gri su kullanımının maliyet avantajlarının yanı sıra uzun vadede çevresel faydaları da büyüktür. Yapılan çalışmalar, gri su kullanımının içme suyu talebini %50 oranında azaltabileceğini ve bu sayede tatlı su kaynakları üzerindeki baskıyı hafifletebileceğini göstermiştir (Gorgich vd., 2020a;

Mahmoudi vd., 2021; Hajlaoui vd., 2022; Rodrigues vd., 2023). Kırsal bölgelerde, gri su kullanımı, septik tanklara yönlendirilen atıksu miktarını azaltarak septik tank boyutlarını küçültmekte ve böylece koku ve sivrisinek üremesi gibi çevresel zararları minimize etmektedir (Dalahmeh vd., 2016; Thaher vd., 2020). Ek olarak, gri suyun yeniden kullanımını, geleneksel su yönetim tekniklerine kıyasla daha düşük enerji tüketimi ve karbondioksit emisyonlarına yol açmaktadır (Matos vd., 2014). Gri su, içerdiği azot ve fosfor sayesinde kimyasal gübrelerin yerini alabilecek şekilde sulamada kullanılabilen ve böylece çevresel faydaları artırmaktadır (Ammari vd., 2014). Gri suyun yeniden kullanımı tatlı su kaynaklarına olan bağımlılığı azaltmakta ve yüzeyel sulara yapılan atıksu deşarjının azalmasına sebep olmaktadır. Gri suyun yeniden kullanımı hem kentsel hem de kırsal su yönetimi için sürdürülebilir bir çözüm olarak ön plana çıkmaktadır (Rahman vd., 2023).

Günlük olarak 15 milyon m³ arıtılmamış atıksuyun sulama amaçları için kullanılması, toprak kalitesi ve çevreye potansiyel tehditler oluştururken, arıtılmış gri su kullanımı bu tehditlere karşı etkili bir çözüm sunmaktadır (Ungureanu vd., 2020). Çalışmalar, arıtılmış gri su ile yapılan sulamanın, tarımsal üretimi artırma, bitki büyümesini teşvik etme ve mahsul verimini iyileştirme potansiyeline sahip olduğunu göstermektedir. Örneğin, Siggins vd. (2016) tarafından yapılan bir çalışmada, gri su kullanılarak sulanan bitkilerde, musluk suyuyla sulananlara göre daha hızlı büyüme gözlemlenmiştir. Ayrıca Gorgich vd. (2020b) da benzer bulgularla, gri suyun bitki büyümesindeki pozitif etkilerini doğrulamıştır.

Albalawneh vd. (2016) tarafından yürütülen iki yıllık bir çalışma, arıtılmış gri su ile sulamanın toprak özellikleri üzerinde herhangi bir zararlı etki oluşturmadığını belirlemiştir. Potivichayanon vd. (2021), arıtılmış gri su ile sulamanın toprak sağlığı üzerinde kısa vadede risk oluşturmadığını vurgulamışlardır. Bunun yanı sıra, gri su kullanımının çevresel etkileri üzerine daha fazla araştırma yapılması gerektiği konusunda genel bir fikir birliği bulunmaktadır (Asl vd., 2023). Gri suyun sulamada uzun vadeli kullanımının yeraltı suyu, yüzey suyu ve toprakta ağır metal konsantrasyonlarını artırabileceğini ve önemli çevresel tehditler oluşturabileceği belirtilmektedir (Turner vd., 2019). Bu sebeple uzun vadede sulamada gri su kullanımının toprak kalitesi ve çevresel etkisi üzerine daha fazla araştırma yapılması önerilmektedir.

5. Dünyada Gri Suyun Yeniden Kullanım Uygulamaları

Birçok ülkede, gri su yönetimi için yasal bir çerçevenin olmaması, atıksuyun yeniden kullanım sistemlerinin geliştirilmesini ve uygulanmasını engellemektedir. Gri suyun sulama ve tuvalet sifonunda kullanılmasına yönelik kılavuzlar bulunsada henüz gri suyun doğrudan içilebilir yeniden kullanımına yönelik uluslararası bir yeniden kullanım kılavuzu sunulmamıştır (Van de Walle vd., 2023).

Gri suyun yeniden kullanımı için verilen izinler küresel ölçekte önemli farklılıklar göstermektedir. Gri suyun yeniden kullanım uygulamalarında öncü ülkelerden İsrail'de 1994 yılından beri kamu spor tesislerinde duştan elde edilen gri suyun yeniden kullanımına onay verilmiştir (Oron vd., 2014). Japonya'nın Tokyo kentinde 30.000 m²'yi aşan veya günlük yeniden kullanım potansiyeli 100 m³ olan binalarda gri su sistemi kurulması zorunludur (Oron vd., 2014). Şili, 2018 yılında gri suyun toplanması, yeniden kullanımı ve bertarafı için düzenlemeler getiren 21.075 sayılı Kanunu yürürlüğe koymuştur (Rodriguez vd., 2022). Bu mevzuat, Şili'deki kırsal hanelerin yalnızca %53'ünün şebeke içme suyuna erişimi olduğu düşünüldüğünde özellikle önemlidir ve gri suyun

yeniden kullanım uygulamalarının artmasını teşvik etmektedir (Rodriguez vd., 2020).

ABD'de atıksuyun kentsel, tarımsal, endüstriyel, yer altı suyuna deşarj ve rekreasyonel amaçlı kullanımı için gerekli su kalite değerleri EPA, (2012) dokümanında belirlenmiştir. Bu dokümanda gri suyun yeniden kullanılması için mutlaka artırılması gerekliliği vurgulanmaktadır. Gri suyun yeniden kullanımına izin verilip verilmemesi gri suyun kaynağına bağlıdır. Açık gri suyun artırılarak yeniden kullanılmasında bir kısıt bulunmazken koyu gri suyun artırılarak yeniden kullanılması konusunda fikir birliği yoktur. ABD'de 36 eyaletten 14'ü sadece mutfakta üretilen gri suyun yeniden kullanımını yasaklamakta iken, 4 eyalet ise bulaşık makinelerinden gelen gri suda sakınca görmemekte ancak mutfak lavabolarından gelen gri suyu yeniden kullanımını yasaklamaktadır. 15 eyalette ise herhangi bir kısıt bulunmamaktadır (Yu vd., 2013).

Almanya'da artan çevre bilincinin yanı sıra, su maliyetlerin de artması binalara kurulan gri su arıtma sistemlerine olan talebin artmasına sebep olmuştur. Bu sistemlerin amortisman maliyetleri genellikle 5 ila 7 yıl arasında değişmektedir. Almanya'da kimyasal kullanmadan düşük enerji ve bakım gereksinimleri altında çalışan gri su sistemleri çoğunlukla tercih edilmektedir. Almanya'da gri su geri dönüşüm sistemleri, içme suyu şebekesi ile çapraz bağlantıların bulunmadığını ve boruların yönetmeliklere göre etiklendiğini garanti etmek için Sağlık Dairesi'ne kaydedilmelidir. Tuvalet sifonu için kullanılan arıtılmış gri su için su kalitesi değerleri, Avrupa Birliği Yüzme Suyu Standartları'na uygun olmalıdır (Nolde, 2005).

Avustralya'daki insanlar, özellikle kurak iklimi ve sık sık yaşanan su kıtlığı göz önüne alındığında, gri suyun yeniden kullanımını destekleme konusuna oldukça olumlu yaklaşmaktadır. Sistemlerin uygun şekilde kurulması ve bakımının yapılması koşuluyla tuvalet sifonu ve bahçe sulamasında gri suyun yeniden kullanımına izin veren kılavuzlar mevcuttur (Jeppesen, 1996). Avustralya'da 2010 yılında "Gri Su Kullanımına İlişkin Uygulama Kuralları" adlı kılavuz oluşturulmuştur. Melbourne'de şiddetli kuraklıklar nedeniyle dış mekan musluk suyu kullanımında katı kısıtlamalar getirilmesi Melbourne'deki hanelerin %71'inin çoğunlukla çamaşırhane ve banyodan toplanan gri suyu yeniden kullanmaya mecbur bırakmıştır (Fountoulakis vd., 2016).

Suudi Arabistan gibi ülkelerde gri su yeniden kullanımının maliyeti, içme ve kullanma suyu elde etmenin maliyetinden daha düşüktür; ancak içme ve kullanma suyu hükümet tarafından sübvansede edildiği için gri suyun yeniden kullanımı halkın büyük bir kısmı tarafından benimsenmemektedir (Al-Jasser, 2011).

Kanada'da "Tuvalet ve Pisuvar Sifonlarında Kullanılmak Üzere Eysel Geri Kazanılmış Su için Kanada Kılavuzları" adlı dokümanda gri suyun yeniden kullanımına yönelik mevzuat ve su kalitesi parametreleri detaylı bir şekilde açıklanmaktadır (Health Canada, 2017).

Türkiye'de arıtılmış atıksuların yeniden kullanılmasına yönelik Atıksu Arıtma Tesisleri Teknik Usuller Tebliği EK 7'de gerekli kriterler belirtilmektedir. Ancak Türkiye'de gri suların arıtılması ve yeniden kullanımı ile ilgili bir mevzuat bulunmamaktadır (Karagözoğlu ve Yılmaz, 2023). Ancak Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı tarafından 17.12.2022 tarihinde "Su Kirilliliği Kontrolü Yönetmeliği'nde değişiklik yapılmış ve gri suyun yeniden kullanımına ilişkin teşvik edici esaslar eklenmiştir. Yapılan değişiklik kapsamında "Gri suyun yeniden kullanımına uygun altyapının oluşturulması esastır." ibaresi ve "Gri su ve yağmur sularının yeniden kullanım imkânlarının

değerlendirilmesi esastır." ibaresi eklenmiştir. İstanbul Büyükşehir Belediyesi Meclisi'nde 2020 yılında alınan kararda toplam inşaat alanı 30.000 m²'nin üzerinde olan yapılarda gri su şebekelerinin depo ve sıhhi tesisatlarının yapılması zorunlu hale getirilmiştir. İstanbul il sınırları içerisinde yapılacak bu büyüklükteki yeni binalarda gri su projeleri (depo ve sıhhi tesisat), yapı projeleri ile yapı ruhsatı başvurusunda bulunulan

kuruma (ilgili belediye) onaya sunulması gerekmektedir (T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı, 2022). Köse-Mutlu (2020), İstanbul ilinde gri suyun yeniden kullanılmasının fizibilitesini araştırdığı çalışmada 160 ve üzeri daireye sahip çok katlı binalarda gri su yeniden kullanımının fizibil olduğunu belirtmiştir.

Tablo 4. Gri su için yeniden kullanım standartları

Ülke	BOI (mg/L)	AKM (mg/L)	Bulanıklık (NTU)	pH	Bakiye klor (mg/L)	Patojen (EMS/100mL)	Yeniden kullanım amacı	Referans
ABD	≤10	-	≤2	6-9	≥1	Fekal koliform olmamalı	-Kentlerde park ve bahçe gibi girişi sınırlı olmayan yerler	(USEPA, 2012)
WHO	≤10	≤10	-	-	-	Termorezistans koliform ≤10	-Tuvalet sifon suyu	(WHO, 2006)
Kanada	≤20	≤20	≤5	-	≥0.5	<i>E. coli</i> ≤200	-Tuvalet ve pisuvar sifon suyu	(Health Canada, 2010)
Almanya	<5	-	-	-	-	Termorezistans koliform ≤200 Toplam koliform <100 Fekal koliform <10 <i>P. Aeruginosa</i> <1	-Servis suyu	(Nolde, 2000)
Japonya	≤20 ≤20	- -	- -	5,8-8,6 5,8-8,6	≥0.4	Toplam koliform <1000 Toplam koliform <50	-Tuvalet sifon suyu -Sulama suyu	(Maeda vd., 1996)
Güney Kore	<10	-	<2	5,8-8,5	>0,2mL/L	<i>E. coli</i> ≤0	-Tuvalet sifon suyu	(Jong vd., 2010)
Çin	<10 <20 <6	- - -	<5 <20 <5	6,0-9,0 6,0-9,0 6,0-9,0	>0,2 >0,2 >0,2	Fekal koliform <3 Fekal koliform <3 Fekal koliform <3	-Tuvalet sifon suyu -Sulama -Temizlik	(Zhu ve Dou, 2018)

6. Gri Suyun Yeniden Kullanımının Ekonomik ve Teknik Fizibilitesi

Gri suyun yeniden kullanımının, ekonomik ve teknik fizibilite açısından değerlendirilmesi gerekmektedir. Farklı ölçeklerde ve bölgelerde yapılan çalışmalar, gri su arıtımının su tasarrufu sağlama potansiyelini ve ekonomik uygulanabilirliğini ortaya koymaktadır. Ancak, bu sistemlerin başarılı olabilmesi için yerel koşullar ve maliyet faktörlerinin dikkate alınması gerekmektedir. Gri su arıtma sistemi, depolama tankı ve borulama maliyetleri her ülkede değişebilmektedir (Friedler ve Hadari, 2006).

Abdelkader (2021), gri su arıtımında MBR ve döner biyodisk sistemlerini karşılaştırmıştır. MBR sisteminin daha yüksek arıtma verimliliğine sahip olduğu kanıtlanmış, ancak döner biyodisk işletme maliyetlerinin daha az olduğu belirtilmiştir. Scheumann vd. (2009) gri su arıtımında düşük teknoloji arıtma prosesi (yatay ve dikey akışlı saz yatakları ve kum-çakıl filtreleri) ile MBR prosesini karşılaştırmıştır. Düşük teknoloji sistemlerin düşük yatırım ve işletme maliyetleri ile avantaj sağladığı belirtilmektedir. Lam vd. (2017) gri su arıtımında aerobik MBR ve anaerobik MBR'yi (AnMBR) yaşam döngüsü analizi yöntemiyle karşılaştırmış ve aerobik MBR'nin daha yüksek işletme maliyetine, AnMBR'nin ise daha düşük çevresel etkiye sahip olduğunu bildirmiştir. Alresheedi vd. (2023) gri su arıtımında seramik membranların maliyetinin polimerik membranlardan daha düşük olduğunu bildirmiştir. Gri su arıtımı ile ilgili maliyet analizi çalışmalarında, küçük ölçekli ve büyük ölçekli uygulamalar arasında önemli farklılıklar vardır. Küçük ölçekli sistemler, büyük ölçekli sistemlere kıyasla, arıtılan birim gri su başına daha yüksek işletme maliyetlerine ve enerji tüketimine sahiptir (Jeong vd., 2018). Köse-Mutlu (2020), İstanbul ilinde gri suyun yeniden kullanılmasının fizibilitesini araştırdığı çalışmada 160 ve üzeri daireye sahip çok katlı binalarda gri su yeniden kullanımının fizibil olduğunu belirtmiştir. Leiva vd. 2021 Şili'de yaptıkları çalışmada benzer bulgularla, küçük ölçekli sistemlerde gri su arıtımının ekonomik olarak fizibil olmadığını sonucuna varmışlardır. Ayrıca Leiva vd. 2021 koyu gri suya kıyasla, açık gri su arıtımının ve yeniden kullanımının teknik ve ekonomik açıdan daha az soruna neden olacağını

raporlamışlardır. Bunun sebebi, açık gri suyun daha az kirlenmiş ve daha basit arıtma yöntemleriyle arıtılabilir olması olarak açıklanmıştır. Gri suyun yeniden kullanılmasının ilk uygulamaları okul, alışveriş merkezi ve otel gibi yerlerde başlamıştır. Atanasova vd. (2017) bir otelde 3 m³/gün, 7 m³/gün ve 30 m³/gün kapasiteli gri su arıtma MBR sistemlerin geri ödeme süresini sırasıyla 15 yıl, 5 yıl ve 3 yıl olarak raporlamışlardır.

Humeau vd. (2011), 500 kişilik bir MBR prosesinde arıtılmış gri su maliyetini 4.40 €/m³, aynı koşullar altında çalışan bir NF süreci için ise 4.81 €/m³ olarak hesaplamışlardır. 50 kişilik konfigürasyonlarda maliyetler sırasıyla 7.40 €/m³ ve 7.80 €/m³ olarak belirlenmiştir. Al-Ismaeli vd. (2017) gri su arıtımında yapay sulak alanları inceledikleri çalışmada ilk yatırım ve işletme maliyetini sırasıyla 980 USD ve 78 USD/yıl olarak raporlamış ve amortisman süresi 2 yıl olarak hesaplanmıştır. Aynı çalışmada yapay sulak alanların düşük maliyetli ve kolay bakım yapılabilir arıtma sistemleri olduğu ve ev bahçelerinde sulama için kullanılması için uygun kalitede arıtılmış gri su elde edildiği belirtilmektedir. 500 öğrenciye sahip bir okulda kum filtrasyonu ve UV dezenfeksiyon kullanılan bir pilot ölçekli gri su arıtma sisteminde amortisman süresi 6 yıl 11 ay olarak hesaplanmıştır (Alsulaili vd., 2017). Ürdün'de yapılan bir çalışmada dikey akışlı yapay sulak alan kullanılarak hesaplanan ortalama gri su arıtma maliyetleri 1 m³ arıtılmış gri su başına 0,391 USD raporlanırken geri ödeme süresinin 8,8-15,5 yıl arasında olabileceği belirtilmiştir. Aynı çalışmada geri ödeme süresindeki farklılıkların su fiyatı, gri su karakterizasyonu ve miktarı, sahaya özgü işletme ve ilk yatırım maliyetlerindeki farklılıklar olduğu belirtilmiştir. Nasr vd. (2016) karışık gri su arıtımında elektro-koagülasyon prosesinin inceledikleri çalışmada, enerji kullanımını 4.1 kWh/m³, ortalama işletme maliyeti 0.25 USD/m³ ve amortisman süresini 2 yıl olarak raporlamışlardır. Bir başka çalışmada Lin vd. (2005) benzer bulgularla 0.27 USD/m³ işletme maliyeti raporlamışlardır. Caetano vd. (2022) çamaşırhane kaynaklı koyu gri su arıtımında enerji kullanımını ve işletme maliyetini sırasıyla 20.54 kWh/m³ 4,10 USD/m³ olarak raporlamışlardır. Bu durum açık gri su ve karışık gri su arıtımında elektro-koagülasyon prosesinin koyu gri su arıtımına göre daha az enerji maliyeti olduğunu göstermektedir.

Gri su arıtma sistemlerinin uzun vadeli başarısı, düzenli bakım ve izlemeyi gerektirir. Bakım yapılmadığında, sistemler su kalitesini korumakta yetersiz kalabilir ve sağlık riskleri ortaya çıkabilir (Alfiya vd., 2013). Özellikle mevcut binalardaki kurulu borulara ve tesisatı değiştirmek zordur ve gri su için yeni tesisat eklenmesi ekonomik ve teknik açıdan zorlayıcı olabilmektedir (Friedler ve Hadari, 2006). Teknik zorluklardan bir diğeri de arıtma yöntemlerinin güvenli bir şekilde sürekli olarak çalıştığından emin olma durumudur. Yeniden kullanım standartlarına uygun şekilde gri suyun arıtımından emin olunması ve arıtma sisteminin doğru çalıştığına anlaşılması gereklidir (Maimon vd., 2014). Özellikle karmaşık arıtma sistemlerinde tecrübeli ve nitelikli elemanlara ihtiyaç duyulabilir.

7. Sonuç ve Öneriler

Bu derleme makalede gri su miktarı, karakterizasyonu, arıtma yöntemleri, yeniden kullanım alanları, yeniden kullanımın faydaları ve riskleri, gri suyun yeniden kullanımının ekonomik ve teknik fizibilitesi ile dünyadaki uygulamalar ve mevzuat değerlendirilmiştir. Gri suyun miktar bakımından evsel atıksuyun %75'inden fazlası olması ve tuvalet kaynaklı kirleticiler içermemesi sebebiyle arıtılıp yeniden kullanım potansiyeli yüksektir. Gri su tuvalet sifon suyu, sulama, araç yıkama gibi amaçlar için kullanılarak şebeke suyundan önemli ölçüde tasarruf yapılabilmektedir. Ancak bu kullanımlarda gri suyun uygun arıtma yöntemleriyle arıtılması ve her bir kullanım amacı için mevzuatta belirtilen standartların sağlanması gereklidir. Aksi halde insan sağlığı ve ekosisteme zararlı etkileri bulunabilir. Literatürde açık gri su ve koyu gri su için farklı arıtma metodlarının uygulanması gerektiğine dikkat çekilmektedir. Organik madde konsantrasyonu yüksek olan koyu gri sularda anaerobik veya aerobik biyolojik arıtma tercih edilirken, daha az kirletici içeren açık gri su arıtımında kum filtresi gibi daha az karmaşık sistemler tercih edilmektedir. Arıtma yöntemlerindeki bu çeşitlilik gri su karakterizasyonları ve yeniden kullanım amaçlarının farklılığından kaynaklanmaktadır. Gri su arıtma yöntemlerinde maliyet ve amortisman süreleri yerel koşullara, arıtma teknolojisine, gri suyun miktarına ve karakterizasyonuna göre değişebilmektedir. Gri su arıtımında otel, okul, alışveriş merkezi gibi debisi yüksek yerlerde genellikle MBR sistemi uygulanmaktadır. Literatürde yapay sulak alan, membran filtrasyon, kum filtrasyonu ve elektrokoagülasyon sistemlerinin gri su arıtımında kullanıldığı birçok araştırma bulunmaktadır. Bu arıtma sistemlerinden hangisinin ekonomik ve teknik açıdan daha uygun olduğu yerel koşullara ve gri suyun karakterizasyonuna göre farklılık göstermektedir. Koyu gri su arıtımında genellikle MBR gibi biyolojik arıtma sistemleri önerilirken, açık gri su arıtımında daha basit olan fiziksel ve kimyasal arıtma prosesleri uygulanabilmektedir. Ayrıca gri suyun yeniden kullanım amacına göre seçilmesi gereken arıtma yöntemi değişmektedir. İçme ve kullanma dışındaki suyla temas gerektirmeyen uygulamalar için daha düşük kalitede su gerekirken, insanla temasın söz konusu olduğu durumlarda daha yüksek kaliteli arıtılmış suya ihtiyaç vardır. Gri su arıtma sistemlerinin maliyetlerinin halk tarafından karşılanması özellikle gelişmekte olan ve az gelişmiş ülkelerde mümkün olmayabilir. Bu sebeple gri suların yeniden kullanımının yaygınlaşmasının önünün açılması için merkezi yönetim ve belediye destekli teşvik mekanizmalarına ihtiyaç duyulmaktadır.

Dünyada gri su arıtımı ve yeniden kullanımı konusunda araştırma yapan başlıca ülkeler arasında İsrail, ABD, Almanya, Japonya, Avusturalya gibi ülkeler gelmektedir. Ancak İran, Ürdün, Türkiye, Tunus gibi su stresi altındaki ülkelerde de gri su üzerine araştırmalar ve uygulamalar bulunmaktadır. Dünyada su stresinin çoğu ülkede arttığı ve mevcut tatlı su kaynaklarının hızla tükendiği günümüzde gri

suyun yeniden kullanımı bu sorunlarla başa çıkmak için önemli bir araç olarak kabul edilmektedir. Gelecekteki çalışmalar gri su arıtımında enerji verimli, uygun maliyetli ve işletimi basit teknolojilerin geliştirilmesine yönelik olmalıdır. Günümüzde internet ve yapay zekanın gelişmesiyle beraber bu teknolojilerin arıtma proseslerinin kontrolü ve otomasyonunda kullanılması üzerine çalışmalar yapılmalıdır. Gri su arıtma ve yeniden kullanım sistemlerinin ekonomik yönleri daha detaylı incelenerek geri ödeme süreleri ve farklı ölçeklerdeki uygulamaların karşılaştırılması konusunda çalışmaların sayısı artmalıdır. Arıtılmış gri suyun sulama suyu olarak kullanımının uzun vadeli çevresel etkileri konusunda çalışmalar yapılmalıdır. Farklı ülkelerdeki gri su yönetimi ve mevzuat karşılaştırmalı olarak incelenmeli, daha etkin ve uygulanabilir yasal düzenlemeler için öneriler geliştirilmelidir. Toplumun gri su arıtma ve yeniden kullanımının faydaları konusunda daha fazla bilinçlendirilmesi gereklidir. Bu, yerel yönetimler, eğitim kurumları ve sivil toplum kuruluşları tarafından yürütülebilecek kampanya ve eğitim programları ile sağlanabilir.

Makale araştırma ve yayın etiğine uygun olarak hazırlanmıştır. Yazarlar arasında herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

8. Kaynaklar

- Abbasi, T., and Abbasi, S. A. (2011). Sources of pollution in rooftop rainwater harvesting systems and their control. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 41(23), 2097-2167.
- Abdalla, H., Rahmat-Ullah, Z., Abdallah, M., Alsmadi, S., & Elashwah, N. (2021). Eco-efficiency analysis of integrated grey and black water management systems. *Resources, Conservation and Recycling*, 172, 105681. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105681>
- Abdelkader, A. (2021). Comparative Study between Membrane Bioreactor MBR and Rotating Biological Contactors RBC for Greywater Treatment. *International Journal of Environmental Science and Development*, 12, 1326. <https://doi.org/10.18178/ijesd.2021.12.4.1326>
- Abunaser, S. G., & Abdelhay, A. (2020). Performance of a novel vertical flow constructed wetland for greywater treatment in rural areas in Jordan. *Environmental Technology*. <https://doi.org/10.1080/09593330.2020.1841832>
- Albalawneh, A., Chang, T.-K., & Chou, C.-S. (2016). Impacts on soil quality from long-term irrigation with treated greywater. *Paddy And Water Environment* (Vol. 14, Issue 2, pp. 289–297). <https://doi.org/10.1007/s10333-015-0499-6>
- Alfiya, Y., Gross, A., Sklarz, M., & Friedler, E. (2013). Reliability of on-site greywater treatment systems in Mediterranean and arid environments—a case study. *Water Science and Technology*, 67(6), 1389-1395.
- Al-Gheethi, A. A. S., Noman, E. A., Radin Mohamed, R. M. S., Talip, B. A., Abdullah, A. H., & Mohd Kassim, A. H. (2019). Reuse of Greywater for Irrigation Purpose. In R. M. S. Radin Mohamed, A. A. S. Al-Gheethi, & A. H. Mohd Kassim (Eds.), *Management of Greywater in Developing Countries: Alternative Practices, Treatment and Potential for Reuse and Recycling* (pp. 73–87). *Springer International Publishing*. https://doi.org/10.1007/978-3-319-90269-2_4

- Al-Ismaili, A. M., Ahmed, M., Al-Busaidi, A., Al-Adawi, S., Tandlich, R., & Al-Amri, M. (2017). Extended use of grey water for irrigating home gardens in an arid environment. *Environmental Science and Pollution Research*, 24, 13650-13658.
- Al-Jasser, A. O. (2011). Greywater reuse in Saudi Arabia: Current situation and future potential. 159–169. <https://doi.org/10.2495/WS110151>
- Alresheedi, M.T., Albuaymi, A.M., AlSaleem, S.S., Haider, H., Shafiqzaman, Md., AlHarbi, A., & Ahsan, A. (2023). Low-cost ceramic filter bioreactor for treatment and reuse of residential septic tank effluent: A decentralized approach for small communities. *Environmental Technology & Innovation*, 31, 103213. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2023.103213>
- Alsulaili, A. D., Hamoda, M. F., Al-Jarallah, R., & Alrukaibi, D. (2017). Treatment and potential reuse of greywater from schools: A pilot study. *Water Science And Technology* (Vol. 75, Issue 9, pp. 2119–2129). <https://doi.org/10.2166/wst.2017.088>
- Al-Zu'bi, Y., Ammari, T. G., Al-Balawneh, A., Al-Dabbas, M., Ta'any, R., & Abu-Harb, R. (2015). Ablution greywater treatment with the modified re-circulated vertical flow bioreactor for landscape irrigation. *Desalination And Water Treatment* (Vol. 54, Issue 1, pp. 59–68). <https://doi.org/10.1080/19443994.2013.876673>
- Amaris, G., Dawson, R., Gironas, J., Hess, S., & Ortuzar, J. de D. (2020). Understanding the preferences for different types of urban greywater uses and the impact of qualitative attributes. *Water Research* (Vol. 184). <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.116007>
- Ammari, T. G., Al-Zu'bi, Y., Al-Balawneh, A., Tahhan, R., Al-Dabbas, M., Ta'any, R. A., & Abu-Harb, R. (2014). An evaluation of the re-circulated vertical flow bioreactor to recycle rural greywater for irrigation under arid Mediterranean bioclimate. *Ecological Engineering* (Vol. 70, pp. 16–24). <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2014.03.009>
- Antonopoulou, G., Kirkou, A., & Stasinakis, A. S. (2013). Quantitative and qualitative greywater characterization in Greek households and investigation of their treatment using physicochemical methods. *Science of The Total Environment*, 454–455, 426–432. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.03.045>
- Asl, S. K., Cushing, K., O'Malley, R., Dahl, A., Rouhani, A., Bryan, S., & Burks, J. (2023). A field assessment of residential laundry to landscape greywater quality in the San Francisco Bay area. *Water Policy*. <https://doi.org/10.2166/wp.2023.101>
- Atanasova, N., Dalmau, M., Comas, J., Poch, M., Rodriguez-Roda, I., & Buttiglieri, G. (2017). Optimized MBR for greywater reuse systems in hotel facilities. *Journal of Environmental Management*, 193, 503–511. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.02.041>
- Atasoy, E., Murat, S., Baban, A., & Tiris, M. (2007). Membrane Bioreactor (MBR) Treatment of Segregated Household Wastewater for Reuse. *CLEAN– Soil, Air, Water*, 35(5), 465–472. <https://doi.org/10.1002/clen.200720006>
- Awasthi, A., Gandhi, K., & Rayalu, S. (2024). Greywater treatment technologies: A comprehensive review. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 21(1), 1053–1082. <https://doi.org/10.1007/s13762-023-04940-7>
- Babaei, F., Ehrampoush, M. H., Eslami, H., Ghaneian, M. T., Fallahzadeh, H., Talebi, P., Fard, R. F., & Ebrahimi, A. A. (2019). Removal of linear alkylbenzene sulfonate and turbidity from greywater by a hybrid multi-layer slow sand filter microfiltration ultrafiltration system. *Journal of Cleaner Production*, 211, 922–931. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.11.255>
- Bahrani, M., Amiri, M. J., & Mahmoudi, M. R. (2020). Clustering the Adsorbents of Horizontal Series Filtration in Greywater Treatment. *SUSTAINABILITY* (Vol. 12, Issue 8). <https://doi.org/10.3390/su12083194>
- Bani-Melhem, K., Al-Qodah, Z., Al-Shannag, M., Qasaimeh, A., Rasool Qtaishat, M., & Alkasrawi, M. (2015). On the performance of real grey water treatment using a submerged membrane bioreactor system. *Journal of Membrane Science*, 476, 40–49. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2014.11.010>
- Barişçı, S., & Turkey, O. (2016). Domestic greywater treatment by electrocoagulation using hybrid electrode combinations. *Journal of Water Process Engineering*, 10, 56–66. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2016.01.015>
- Birleşmiş Milletler (2022). The Sustainable Development Goals Report.
- Byrne, J., Dallas, S., Anda, M., & Ho, G. (2020). Quantifying the Benefits of Residential Greywater Reuse. *Water*, 12(8), Article 8. <https://doi.org/10.3390/w12082310>
- Caetano, M. O., Silva, I. D., Carvalho, É. C. D., & Gomes, L. P. (2022). Efficiency of electrocoagulation in the treatment of laundromat greywater. *Engenharia Sanitaria e Ambiental*, 27(1), 91-101.
- Canada Health (2010) Canadian guidelines for domestic reclaimed water for use in toilet and urinal flushing. Ontario, Ottawa
- Cardoso, C. C. A., & Bodnar, I. (2022). Modelling Treated Laundry Greywater Reuse for Irrigation Using an Affordable Treatment Method and Seed Germination Test. *SUSTAINABILITY* (Vol. 14, Issue 3). <https://doi.org/10.3390/su14031314>
- Cecconet, D., Callegari, A., Hlavinek, P., & Capodaglio, A. G. (2019). Membrane bioreactors for sustainable, fit-for-purpose greywater treatment: A critical review. *Clean Technologies And Environmental Policy* (Vol. 21, Issue 4, pp. 745–762). <https://doi.org/10.1007/s10098-019-01679-z>
- Chaillou, K., Gerente, C., Andres, Y., & Wolbert, D. (2011). Bathroom Greywater Characterization and Potential Treatments for Reuse. *WATER AIR AND SOIL POLLUTION* (Vol. 215, Issues 1–4, pp. 31–42). <https://doi.org/10.1007/s11270-010-0454-5>
- Charchalac Ochoa, S. I., Ushijima, K., Hijikata, N., & Funamizu, N. (2014). Treatment of domestic greywater by geotextile filter and intermittent sand filtration bioreactor. *Journal of Water Reuse and Desalination*, 5(1), 39–49. <https://doi.org/10.2166/wrd.2014.042>
- Chen, C., Guo, L., Yang, Y., Oguma, K., & Hou, L. (2021).

- Comparative effectiveness of membrane technologies and disinfection methods for virus elimination in water: A review. *Science of The Total Environment*, 801, 149678. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149678>
- Chen, X., Wang, Y., Bai, Z., Ma, L., Stokral, M., Kroeze, C., Chen, X., Zhang, F., & Shi, X. (2022). Mitigating phosphorus pollution from detergents in the surface waters of China. *Science of The Total Environment*, 804, 150125. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150125>
- Chowdhury, R. K. (2015). Greywater reuse through a bioretention system prototype in the arid region. In *WATER SCIENCE AND TECHNOLOGY* (Vol. 72, Issue 12, pp. 2201–2211). <https://doi.org/10.2166/wst.2015.442>
- Chrispim, M. C., & Nolasco, M. A. (2017). Greywater treatment using a moving bed biofilm reactor at a university campus in Brazil. *Journal Of Cleaner Production* (Vol. 142, Issues 1, SI, pp. 290–296). <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.07.162>
- Compaore, C. O. T., Maiga, Y., Nikiema, M., Mien, O., Nagalo, I., Pananditigri, H. T., Mihelcic, J. R., & Ouattara, A. S. (2023). Constructed wetland technology for the treatment and reuse of urban household greywater under conditions of Africa's Sahel region. *Water Supply* (Vol. 23, Issue 6, pp. 2505–2516). <https://doi.org/10.2166/ws.2023.121>
- Cortez, S., Teixeira, P., Oliveira, R., & Mota, M. (2013). Bioreactors: Rotating Biological Contactors. *Encyclopedia of Industrial Biotechnology* (pp. 1013–1030). John Wiley & Sons, Ltd. <https://doi.org/10.1002/9780470054581.eib650>
- Dalahmeh, S. S., Lalander, C., Pell, M., Vinneras, B., & Jonsson, H. (2016). Quality of greywater treated in biochar filter and risk assessment of gastroenteritis due to household exposure during maintenance and irrigation. *Journal Of Applied Microbiology* (Vol. 121, Issue 5, pp. 1427–1443). <https://doi.org/10.1111/jam.13273>
- Daniel, M., Ahammed, M. M., & Shaikh, I. N. (2023). Selection of Greywater Reuse Options Using Multi-criteria Decision-making Techniques. *Water Conservation Science and Engineering*, 8(1), 2. <https://doi.org/10.1007/s41101-023-00181-4>
- De Gisi, S., Casella, P., Notarnicola, M., & Farina, R. (2016). Grey water in buildings: A mini-review of guidelines, technologies and case studies. *Civil Engineering and Environmental Systems*, 33(1), 35–54. <https://doi.org/10.1080/10286608.2015.1124868>
- Disha, A. S., Al Harun, M. A. Y., Akter, S., Billah, S. M., & Abdullah-Al-Noman, M. (2020). Reusing greywater for cultivation of *Capsicum frutescens* and *Calendula officinalis*. *Journal Of Environmental Management* (Vol. 272). <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111088>
- Dos Santos, A. J., Barazorda-Ccahuana, H. L., Caballero-Manrique, G., Chérémond, Y., Espinoza-Montero, P. J., González-Rodríguez, J. R., Jáuregui-Haza, U. J., Lanza, M. R. V., Nájera, A., Oporto, C., Pérez Parada, A., Pérez, T., Quezada, V. D., Rojas, V., Sosa, V., Thiam, A., Torres-Palma, R. A., Vargas, R., & Garcia-Segura, S. (2023). Accelerating innovative water treatment in Latin America. *Nature Sustainability*, 6(4), 349–351. <https://doi.org/10.1038/s41893-022-01042-z>
- Elhegazy, H., & Eid, M. M. M. (2020). A state-of-the-art-review on grey water management: A survey from 2000 to 2020s. *Water Science and Technology*, 82(12), 2786–2797. <https://doi.org/10.2166/wst.2020.549>
- Eriksson, E., & Donner, E. (2009). Metals in greywater: Sources, presence and removal efficiencies. *DESALINATION* (Vol. 248, Issues 1–3, pp. 271–278). <https://doi.org/10.1016/j.desal.2008.05.065>
- Eriksson, E., Auffarth, K., Eilersen, A.-M., Henze, M., & Ledin, A. (2003). Household chemicals and personal care products as sources for xenobiotic organic compounds in grey wastewater. *Water*, 29(2), Article 2. <https://doi.org/10.4314/wsa.v29i2.4848>
- Filali, H., Barsan, N., Hoermann, G., Nedeff, V., Irimia, O., Nedeff, F., & Hachicha, M. (2023). Greywater Vertical Treatment and Possibility of Reuse in the Fields from Peri-Urban Area. *AGRONOMY-BASEL* (Vol. 13, Issue 3). <https://doi.org/10.3390/agronomy13030940>
- Firat, B., Sericik, S., Çakmak, Y., Uğuzlu, S. (2024). Atıksuların Yeniden Kullanımına Genel Bir Bakış. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 12(2), 612-630. <https://doi.org/10.29130/dubited.1207875>
- Fountoulakis, M. S., Markakis, N., Petousi, I., & Manios, T. (2016). Single house on-site grey water treatment using a submerged membrane bioreactor for toilet flushing. *Science of The Total Environment*, 551–552, 706–711. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.02.057>
- Friedler, E., & Hadari, M. (2006). Economic feasibility of on-site greywater reuse in multi-storey buildings. *Desalination*, 190(1), 221–234. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2005.10.007>
- Garcia, M. T., Campos, E., Sánchez-Leal, J., & Ribosa, I. (2006). Effect of linear alkylbenzene sulphonates (LAS) on the anaerobic digestion of sewage sludge. *Water Research*, 40(15), 2958–2964. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2006.05.033>
- Gavala, H. N., & Ahring, B. K. (2002). Inhibition of the anaerobic digestion process by linear alkylbenzene sulfonates. *Biodegradation*, 13(3), 201–209. <https://doi.org/10.1023/A:1020860027176>
- Ghaitidak, D. M., & Yadav, K. D. (2016). Greywater treatment for reuse: Comparison of reuse options using analytic hierarchy process. *Journal Of Water Reuse And Desalination* (Vol. 6, Issue 1, pp. 108–124). <https://doi.org/10.2166/wrd.2015.177>
- Ghisi, E., & Ferreira, D. F. (2007). Potential for potable water savings by using rainwater and greywater in a multi-storey residential building in southern Brazil. *Building and Environment*, 42(7), 2512–2522. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.07.019>
- Goncalves, R. F., Vaz, L. de O., Peres, M., & Merlo, S. S. (2021). Microbiological risk from non-potable reuse of greywater treated by anaerobic filters associated to vertical constructed wetlands. *JOURNAL OF WATER PROCESS ENGINEERING* (Vol. 39). <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101751>

- Gorgich, M., Mata, T. M., Martins, A., Caetano, N. S., & Formigo, N. (2020a). Application of domestic greywater for irrigating agricultural products: A brief study. *Energy Reports*, 6, 811–817. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2019.11.007>
- Gorgich, M., Mata, T. M., Martins, A., Caetano, N. S., & Formigo, N. (2020b). Application of domestic greywater for irrigating agricultural products: A brief study. *Energy Reports* (Vol. 6, Issue 1, pp. 811–817). <https://doi.org/10.1016/j.egy.2019.11.007>
- Hajlaoui, H., Akrimi, R., Sayehi, S., & Hachicha, S. (2022). Usage of treated greywater as an alternative irrigation source for tomatoes cultivation. *WATER AND ENVIRONMENT JOURNAL* (Vol. 36, Issue 3, pp. 484–493). <https://doi.org/10.1111/wej.12780>
- Halalsheh, M., Ghunmi, L. A., Al-Alami, N., & Fayyad, M. (2008). Fate of Pathogens In Tomato Plants and Soil Irrigated With Secondary Treated Wastewater. In I. A. Baz, R. Otterpohl, & C. Wendland (Eds.), *Efficient Management of Wastewater* (pp. 81–89). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-540-74492-4_7
- Hamidi, M.N., Hamidi, N., Işık, O., Güven, H., Özgün, H. ve Erşahin, M.E. (2023), Sürdürülebilir Yağmur Suyu Hasadı, *İTÜ Çevre, İklim ve Sürdürülebilirlik*, 24(2), 97-110.
- Hao, X. D., Li, J., van Loosdrecht, M. C. M., & Li, T. Y. (2018). A sustainability-based evaluation of membrane bioreactors over conventional activated sludge processes. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 6(2), 2597–2605. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2018.03.050>
- Haque, S. E. (2021). How Effective Are Existing Phosphorus Management Strategies in Mitigating Surface Water Quality Problems in the U.S.? *Sustainability*, 13(12), Article 12. <https://doi.org/10.3390/su13126565>
- He, C., Liu, Z., Wu, J., Pan, X., Fang, Z., Li, J., & Bryan, B. A. (2021). Future global urban water scarcity and potential solutions. *Nature Communications*, 12(1), 4667. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-25026-3>
- He, Z., Li, Y., & Qi, B. (2022). Recent insights into greywater treatment: A comprehensive review on characteristics, treatment technologies, and pollutant removal mechanisms. *ENVIRONMENTAL SCIENCE AND POLLUTION RESEARCH* (Vol. 29, Issue 36, pp. 54025–54044). <https://doi.org/10.1007/s11356-022-21070-8>
- Health Canada. (2017, May 10). Canadian Guidelines for Domestic Reclaimed Water for Use in Toilet and Urinal Flushing [Navigation page]. <https://www.canada.ca/en/health-canada/services/publications/healthy-living/canadian-guidelines-domestic-reclaimed-water-use-toilet-urinal-flushing.html>
- Henderson, M., Ergas, S. J., Ghebremichael, K., Gross, A., & Ronen, Z. (2022). Occurrence of Antibiotic-Resistant Genes and Bacteria in Household Greywater Treated in Constructed Wetlands. *WATER* (Vol. 14, Issue 5). <https://doi.org/10.3390/w14050758>
- Henkel, J., Lamac, M., Wagner, M., & Cornel, P. (2009). Oxygen transfer in membrane bioreactors treating synthetic greywater. *Water Research*, 43(6), 1711–1719. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2009.01.011>
- Hocaoglu, S. M., Atasoy, E., Baban, A., & Orhon, D. (2013). Modeling biodegradation characteristics of grey water in membrane bioreactor. *Journal of Membrane Science*, 429, 139–146. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2012.11.012>
- Huelgas, A., & Funamizu, N. (2010). Flat-plate submerged membrane bioreactor for the treatment of higher-load graywater. *Desalination*, 250(1), 162–166. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2009.05.007>
- Iorhemen, O. T., Hamza, R. A., & Tay, J. H. (2016). Membrane Bioreactor (MBR) Technology for Wastewater Treatment and Reclamation: Membrane Fouling. *Membranes*, 6(2), Article 2. <https://doi.org/10.3390/membranes6020033>
- Jabornig, S., & Favero, E. (2013). Single household greywater treatment with a moving bed biofilm membrane reactor (MBBMR). *Journal of Membrane Science*, 446, 277–285. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2013.06.049>
- Jeppesen, B. (1996). Domestic greywater re-use: Australia's challenge for the future. *Desalination*, 106(1), 311–315. [https://doi.org/10.1016/S0011-9164\(96\)00124-5](https://doi.org/10.1016/S0011-9164(96)00124-5)
- Jong, J., Lee, J., Kim, J., Hyun, K., Hwang, T., Park, J., & Choung, Y. (2010). The study of pathogenic microbial communities in graywater using membrane bioreactor. *Desalination*, 250(2), 568–572. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2009.09.025>
- Karagözoğlu, M. B., & Yılmaz, Z. (2023). Gri Su Arıtımında Teknolojik Yaklaşımlar ve Yeniden Kullanımı. *Gaziosmanpaşa Bilimsel Araştırma Dergisi*, 12(1), 1-14.
- Karahan, B. N., Akdag, Y., Fakioglu, M., Korkut, S., Guven, H., Ersahin, M. E., & Ozgun, H. (2023). Coupling ozonation with hydrogen peroxide and chemically enhanced primary treatment for advanced treatment of grey water. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 11(3), 110116. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.110116>
- Khajvand, M., Mostafazadeh, A. K., Drogui, P., Tyagi, R. D., & Brien, E. (2022). Greywater characteristics, impacts, treatment, and reclamation using adsorption processes towards the circular economy. *ENVIRONMENTAL SCIENCE AND POLLUTION RESEARCH* (Vol. 29, Issue 8, pp. 10966–11003). <https://doi.org/10.1007/s11356-021-16480-z>
- Khalil, M., & Liu, Y. (2021). Greywater biodegradability and biological treatment technologies: A critical review. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 161, 105211. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2021.105211>
- Khanam, K., & Patidar, S. K. (2022). Greywater characteristics in developed and developing countries. *Materials Today: Proceedings*, 57, 1494–1499. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.12.022>
- Kobayashi, Y., Ashbolt, N. J., Davies, E. G. R., & Liu, Y. (2020). Life cycle assessment of decentralized greywater treatment systems with reuse at different scales in cold regions. *ENVIRONMENT INTERNATIONAL* (Vol. 134). <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.105215>

- Kogawa, A. C., Cernic, B. G., do Couto, L. G. D., & Salgado, H. R. N. (2017). Synthetic detergents: 100 years of history. *Saudi Pharmaceutical Journal*, 25(6), 934–938. <https://doi.org/10.1016/j.jsps.2017.02.006>
- Köse Mutlu, B. (2021). Çok Katlı Binalarda Gri Suyun Yerinde Arıtılması ile Yeniden Kullanılmasının Fizibilitesi: İstanbul'da Bir Kentsel Dönüşüm Projesi Örneği. *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen Ve Mühendislik Dergisi*, 23(67), 81-91. <https://doi.org/10.21205/deufmd.2021236707>
- Krishnan, V., Ahmad, D., & Jeru, J. B. (2008). Influence of COD:N:P ratio on dark greywater treatment using a sequencing batch reactor. *JOURNAL OF CHEMICAL TECHNOLOGY AND BIOTECHNOLOGY* (Vol. 83, Issue 5, pp. 756–762). <https://doi.org/10.1002/jctb.1842>
- Kurniawan, S., Novarini, Yuliwati, E., Ariyanto, E., Morsin, M., Sanudin, R., & Nafisah, S. (2023). Greywater treatment technologies for aquaculture safety: Review. *Journal of King Saud University - Engineering Sciences*, 35(5), 327–334. <https://doi.org/10.1016/j.jksues.2021.03.014>
- Laaffat, J., Aziz, F., Ouazzani, N., & Mandi, L. (2019). Biotechnological approach of greywater treatment and reuse for landscape irrigation in small. *SAUDI JOURNAL OF BIOLOGICAL SCIENCES* (Vol. 26, Issue 1, pp. 83–90). <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2017.01.006>
- Lam, C.-M., Leng, L., Chen, P.-C., Lee, P.-H., & Hsu, S.-C. (2017). Eco-efficiency analysis of non-potable water systems in domestic buildings. *Applied Energy*, 202, 293–307. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.05.095>
- Lamine, M., Samaali, D., & Ghrabi, A. (2012). Greywater treatment in a submerged membrane bioreactor with gravitational filtration. *Desalination and Water Treatment*, 46(1–3), 182–187. <https://doi.org/10.1080/19443994.2012.677553>
- Lanchipa-Ale, T., Cruz-Baltuano, A., Molero-Yañez, N., Chucuya, S., Vera-Barrios, B., & Pino-Vargas, E. (2024). Assessment of Greywater Reuse in a University Building in a Hyper-Arid Region: Quantity, Quality, and Social Acceptance. *Sustainability*, 16(7), Article 7. <https://doi.org/10.3390/su16073088>
- Leiva, E., Rodríguez, C., Sánchez, R., & Serrano, J. (2021). Light or Dark Greywater for Water Reuse? Economic Assessment of On-Site Greywater Treatment Systems in Rural Areas. *Water*, 13(24), Article 24. <https://doi.org/10.3390/w13243637>
- Leong, J. Y. C., Chong, M. N., & Poh, P. E. (2018). Assessment of greywater quality and performance of a pilot-scale decentralised hybrid rainwater-greywater system. *JOURNAL OF CLEANER PRODUCTION* (Vol. 172, pp. 81–91). <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.10.172>
- Li, F., Wichmann, K., & Otterpohl, R. (2009). Review of the technological approaches for grey water treatment and reuses. *Science of The Total Environment*, 407(11), 3439–3449. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2009.02.004>
- Li, K., Ren, W., Wang, Q., Xu, L., Shi, X., Bai, X., Jin, X., Wang, X. C., & Jin, P. (2023). Onsite treatment of decentralized rural greywater by ecological seepage well (ESW). *JOURNAL OF CLEANER PRODUCTION* (Vol. 393). <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136180>
- Lin, C. J., Lo, S. L., Kuo, C. Y., & Wu, C. H. (2005). Pilot-scale electrocoagulation with bipolar aluminum electrodes for on-site domestic greywater reuse. *Journal of environmental engineering*, 131(3), 491-495.
- Lousada-Ferreira, M., Geilvoet, S., Moreau, A., Atasoy, E., Krzeminski, P., van Nieuwenhuijzen, A., & van der Graaf, J. (2010). MLSS concentration: Still a poorly understood parameter in MBR filterability. *Desalination*, 250(2), 618–622. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2009.09.036>
- Maeda, M., Nakada, K., Kawamoto, K., & Ikeda, M. (1996). Area-wide use of reclaimed water in Tokyo, Japan. *Water Science and Technology*, 33(10), 51–57. [https://doi.org/10.1016/0273-1223\(96\)00406-4](https://doi.org/10.1016/0273-1223(96)00406-4)
- Mahmoudi, A., Mousavi, S. A., & Darvishi, P. (2021). Greywater as a sustainable source for development of green roofs: Characteristics, treatment technologies, reuse, case studies and future developments. *JOURNAL OF ENVIRONMENTAL MANAGEMENT* (Vol. 295). <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112991>
- Maimon, A., Friedler, E., & Gross, A. (2014). Parameters affecting greywater quality and its safety for reuse. *Science of the Total Environment*, 487, 20-25.
- Massoud, M. A., Tarhini, A., & Nasr, J. A. (2009). Decentralized approaches to wastewater treatment and management: Applicability in developing countries. *Journal of Environmental Management*, 90(1), 652–659. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2008.07.001>
- Matos, C., Pereira, S., Amorim, E. V., Bentes, I., & Briga-Sa, A. (2014). Wastewater and greywater reuse on irrigation in centralized and decentralized systems—An integrated approach on water quality, energy consumption and CO2 emissions. *Science of the Total Environment* (Vol. 493, pp. 463–471). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.05.129>
- Morandi, C., Schreiner, G., Moosmann, P., & Steinmetz, H. (2021). Elevated Vertical-Flow Constructed Wetlands for Light Greywater Treatment. *Water* (Vol. 13, Issue 18). <https://doi.org/10.3390/w13182510>
- Mourad, K. A., Berndtsson, J. C., & Berndtsson, R. (2011). Potential fresh water saving using greywater in toilet flushing in Syria. *Journal of Environmental Management*, 92(10), 2447–2453. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2011.05.004>
- Mousazadeh, M., Khademi, N., Kabdaşlı, I., Rezaei, S., Hajalifard, Z., Moosakhani, Z., & Hashim, K. (2023). Domestic greywater treatment using electrocoagulation-electrooxidation process: Optimisation and experimental approaches. *Scientific Reports*, 13(1), 15852. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-42831-6>
- Nasr, M., Ateia, M., & Hassan, K. (2016). Artificial intelligence for greywater treatment using electrocoagulation process. *Separation Science and Technology*, 51(1), 96-105.

- Ndiaye, A., Andrianisa, H. A., Saapi, S. S. Y., Changotade, O. A., Adugna, A. T., Konate, Y., & Maiga, A. H. (2020). Assessment on overall efficiency of urban greywater treatment by vermifiltration in hot climate: Enhanced pollutants removal. *Environmental Technology* (Vol. 41, Issue 17, pp. 2219–2228). <https://doi.org/10.1080/09593330.2018.1561755>
- Nguyen, H. T., Blazejewski, R., & Spychala, M. (2020). Greywater treatment in Lamella settler and combined filters. *Desalination and Water Treatment* (Vol. 203, pp. 202–210). <https://doi.org/10.5004/dwt.2020.26201>
- Nicolaidis, C., & Vyrides, I. (2014). Closing the water cycle for industrial laundries: An operational performance and techno-economic evaluation of a full-scale membrane bioreactor system. *Resources, Conservation and Recycling*, 92, 128–135. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2014.09.001>
- Nie, Y., Chen, R., Tian, X., & Li, Y.-Y. (2019). Characterization of the effect of surfactant on biomass adaptation and microbial community in sewage treatment by anaerobic membrane bioreactor. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 76, 268–276. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2019.03.051>
- Nolde, E. (2000). Greywater reuse systems for toilet flushing in multi-storey buildings – over ten years experience in Berlin. *Urban Water*, 1(4), 275–284. [https://doi.org/10.1016/S1462-0758\(00\)00023-6](https://doi.org/10.1016/S1462-0758(00)00023-6)
- Nolde, E. (2005). Greywater recycling systems in Germany—Results, experiences and guidelines. *Water Science and Technology* (Vol. 51, Issue 10, pp. 203–210). <https://doi.org/10.2166/wst.2005.0368>
- Noutsopoulos, C., Andreadakis, A., Kouris, N., Charchousi, D., Mendrinou, P., Galani, A., Mantziaras, I., & Koumaki, E. (2018). Greywater characterization and loadings—Physicochemical treatment to promote onsite reuse. *Journal of Environmental Management* (Vol. 216, Issue SI, pp. 337–346). <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.05.094>
- Obaideen, K., Shehata, N., Sayed, E. T., Abdelkareem, M. A., Mahmoud, M. S., & Olabi, A. G. (2022). The role of wastewater treatment in achieving sustainable development goals (SDGs) and sustainability guideline. *Energy Nexus*, 7, 100112. <https://doi.org/10.1016/j.nexus.2022.100112>
- Oron, G., Adel, M., Agmon, V., Friedler, E., Halperin, R., Leshem, E., & Weinberg, D. (2014). Greywater use in Israel and worldwide: Standards and prospects. *Water Research* (Vol. 58, pp. 92–101). <https://doi.org/10.1016/j.watres.2014.03.032>
- Oteng-Peprah, M., de Vries, N. K., & Acheampong, M. A. (2018). Greywater characterization and generation rates in a pen urban municipality of a developing country. *Journal of Environmental Management* (Vol. 206, pp. 498–506). <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.10.068>
- Ottoson, J., & Stenström, T. (2003). Faecal contamination of greywater and associated microbial risks. *WATER RESEARCH* (Vol. 37, Issue 3, pp. 645–655). [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(02\)00352-4](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(02)00352-4)
- Öztekin, E. (2024). Sürdürülebilir kentsel gelişim bağlamında eko şehirlerde su ve atık yönetimi. *Karaelmas Fen ve Mühendislik Dergisi*, 14(1), 92–100. <https://doi.org/10.7212/karaelmasfen.1383715>
- Palmer, M., & Hatley, H. (2018). The role of surfactants in wastewater treatment: Impact, removal and future techniques: A critical review. *Water Research*, 147, 60–72. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.09.039>
- Penn, R., Hadari, M., & Friedler, E. (2012). Evaluation of the effects of greywater reuse on domestic wastewater quality and quantity. *Urban Water Journal* (Vol. 9, Issue 3, pp. 137–148). <https://doi.org/10.1080/1573062X.2011.652132>
- Petkova, B., Tcholakova, S., Chenkova, M., Golemanov, K., Denkov, N., Thorley, D., & Stoyanov, S. (2020). Foamability of aqueous solutions: Role of surfactant type and concentration. *Advances in Colloid and Interface Science*, 276, 102084. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2019.102084>
- Porob, S., Craddock, H. A., Motro, Y., Sagi, O., Gdalevich, M., Ezery, Z., Davidovitch, N., Ronen, Z., & Moran-Gilad, J. (2020). Quantification and Characterization of Antimicrobial Resistance in Greywater Discharged to the Environment. *Water*, 12(5), Article 5. <https://doi.org/10.3390/w12051460>
- Potivichayanon, S., Sittitoo, N., & Vinneras, B. (2021). Exposure assessment of treated greywater reused for irrigation. *Water Supply* (Vol. 21, Issue 8, pp. 4404–4417). <https://doi.org/10.2166/ws.2021.191>
- Prathapar, S. A., Jamrah, A., Ahmed, M., Al Adawi, S., Al Sidairi, S., & Al Harassi, A. (2005). Overcoming constraints in treated greywater reuse in Oman. *Desalination*, 186(1), 177–186. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2005.01.018>
- Priyanka, K., Remya, N., & Behera, M. (2022). Sequential biological and solar photocatalytic treatment system for greywater treatment. *Water Science and Technology*, 86(3), 584–595. <https://doi.org/10.2166/wst.2022.229>
- Rahman, K. Z., Al Saadi, S., Al Rawahi, M., Knappe, J., van Afferden, M., Moeller, L., Bernhard, K., & Mueller, R. A. (2023). A multi-functional nature-based solution (NBS) for greywater treatment and reuse at the same plot. *Ecological Engineering* (Vol. 191). <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2023.106952>
- Rodrigues, A. M., Formiga, K. T. M., & Milograna, J. (2023). Integrated systems for rainwater harvesting and greywater reuse: A systematic review of urban water management strategies. *Water Supply*, 23(10), 4112–4125. <https://doi.org/10.2166/ws.2023.240>
- Rodriguez, C., Carrasco, F., Sanchez, R., Rebolledo, N., Schneider, N., Serrano, J., & Leiva, E. (2022). Performance and treatment assessment of a pilot-scale decentralized greywater reuse system in rural schools of north-central Chile. *Ecological Engineering* (Vol. 174). <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2021.106460>
- Rodriguez, C., Sanchez, R., Rebolledo, N., Schneider, N., Serrano, J., & Leiva, E. (2020). Cost-Benefit Evaluation of Decentralized Greywater Reuse Systems in Rural Public Schools in Chile. *Water* (Vol. 12, Issue 12). <https://doi.org/10.3390/w12123468>

- Samayamanthula, D. R., Sabarathinam, C., & Bhandary, H. (2019). Treatment and effective utilization of greywater. *Applied Water Science*, 9(4), 90. <https://doi.org/10.1007/s13201-019-0966-0>
- Scheumann, R., Masi, F., El Hamouri, B., & Kraume, M. (2009). Greywater treatment as an option for effective wastewater management in small communities. *Desalination and Water Treatment*, 4, 33–39. <https://doi.org/10.5004/dwt.2009.352>
- Shaikh, I. N., & Ahammed, M. M. (2020). Quantity and quality characteristics of greywater: A review. In *JOURNAL OF ENVIRONMENTAL MANAGEMENT* (Vol. 261). <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110266>
- Sharaf, A., & Liu, Y. (2021). Mechanisms and kinetics of greywater treatment using biologically active granular activated carbon. *Chemosphere*, 263, 128113. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.128113>
- Siggins, A., Burton, V., Ross, C., Lowe, H., & Horswell, J. (2016). Effects of long-term greywater disposal on soil: A case study. *Science of The Total Environment* (Vol. 557, pp. 627–635). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.03.084>
- Smith, E., & Bani-Melhem, K. (2012). Grey water characterization and treatment for reuse in an arid environment. *Water Science and Technology*, 66(1), 72–78. <https://doi.org/10.2166/wst.2012.167>
- Tarım ve Orman Bakanlığı Su Yönetimi Genel Müdürlüğü, GRİ SUYUN KULLANIMI / 2022 Rehber Dokümanı
- Teodoro, A., Júnior, A. M., Boncz, M. Á., & Paulo, P. L. (2018). Alternative use of *Pseudomonas aeruginosa* as indicator for greywater disinfection. *Water Science and Technology*, 78(6), 1361-1369.
- Thaher, R. A., Mahmoud, N., Al-Khatib, I. A., & Hung, Y.-T. (2020). Reasons of Acceptance and Barriers of House Onsite Greywater Treatment and Reuse in Palestinian Rural Areas. *WATER* (Vol. 12, Issue 6). <https://doi.org/10.3390/w12061679>
- Turner, R. D. R., Warne, M. St. J., Dawes, L. A., Thompson, K., & Will, G. D. (2019). Greywater irrigation as a source of organic micro-pollutants to shallow groundwater and nearby surface water. *Science of The Total Environment* (Vol. 669, pp. 570–578). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.03.073>
- Uceвли, O., & Kaya, Y. (2021). A comparative study of membrane filtration, electrocoagulation, chemical coagulation and their hybrid processes for greywater treatment. *Journal of Environmental Chemical Engineering* (Vol. 9, Issue 1). <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.104946>
- Ungureanu, N., Vlăduț, V., & Voicu, G. (2020). Water Scarcity and Wastewater Reuse in Crop Irrigation. *Sustainability*, 12(21), Article 21. <https://doi.org/10.3390/su12219055>
- United Nations. (2022). The Sustainable Development Goals Report.
- Vakil, K. A., Sharma, M. K., Bhatia, A., Kazmi, A. A., & Sarkar, S. (2014). Characterization of greywater in an Indian middle-class household and investigation of physicochemical treatment using electrocoagulation. *Separation and Purification Technology*, 130, 160–166. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2014.04.018>
- Van de Walle, A., Kim, M., Alam, M. K., Wang, X., Wu, D., Dash, S. R., Rabaey, K., & Kim, J. (2023). Greywater reuse as a key enabler for improving urban wastewater management. *Environmental Science and Ecotechnology* (Vol. 16). <https://doi.org/10.1016/j.ese.2023.100277>
- van Puijenbroek, P. J. T. M., Beusen, A. H. W., & Bouwman, A. F. (2018). Datasets of the phosphorus content in laundry and dishwasher detergents. *Data in Brief*, 21, 2284–2289. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2018.11.081>
- WHO/UNICEF. 2021 Joint Monitoring Program for Water Supply, Sanitation and Hygiene (JMP) – Progress on Household Drinking Water, Sanitation and Hygiene 2000–2020.
- Yu, Z. L. T., Rahardianto, A., DeShazo, J. r., Stenstrom, M. K., & Cohen, Y. (2013). Critical Review: Regulatory Incentives and Impediments for Onsite Graywater Reuse in the United States. *Water Environment Research*, 85(7), 650–662. <https://doi.org/10.2175/106143013X13698672321580>
- Zadeh, S. M., Hunt, D. V. L., Lombardi, D. R., & Rogers, C. D. F. (2013). Shared Urban Greywater Recycling Systems: Water Resource Savings and Economic Investment. *Sustainability*, 5(7), Article 7. <https://doi.org/10.3390/su5072887>
- Zhu, Z., & Dou, J. (2018). Current status of reclaimed water in China: An overview. *Journal of Water Reuse and Desalination*, 8(3), 293–307. <https://doi.org/10.2166/wrd.2018.070>
- Ziemba, C., Larivé, O., Reynaert, E., & Morgenroth, E. (2018). Chemical composition, nutrient-balancing and biological treatment of hand washing greywater. *Water Research*, 144, 752–762. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.07.005>

ARAŞTIRMA MAKALESİ

Kanal Tipi Mikroalg Havuzlarının Hidrolik Karakterinin Sayısal Olarak İncelenmesi

Mehmet Sadık Akca*

Yazışma yazarı:

Mehmet Sadık AKCA,
akcameh@itu.edu.tr*İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Maslak, İstanbul, Türkiye.
ORCID:0000-0002-2119-5279

Referans: Akca, M. S. (2024). Kanal tipi mikroalg havuzlarının hidrolik karakterinin sayısal olarak incelenmesi, *İTÜ Çevre İklim ve Sürdürülebilirlik*, 24 (2), 75-86.

Makale Gönderimi : 21 EYLÜL 2024
Online Kabul : 4 ARALIK 2024
Online Basım : 13 ARALIK 2024

Özet Mikroalg biyokütlesi üretimi ve algal atıksu arıtımı için kullanılan en yaygın reaktör sistemi olan kanal tipi havuzların biyokütle üretim verimleri bir dizi faktör sebebiyle kapalı sistemlere oranla daha düşüktür. Fotosentetik hücrelerin güneş ışığına maruz kalmaları ve büyüme için gerekli diğer besi elementleriyle temas etmelerini sağlayan karışım, alg havuzlarının verimini kısıtlayan faktörler arasında öne çıkmaktadır. Kanal tipi havuzlarda oluşan ölü bölgeler havuzdaki yük kayıplarını artırdığı gibi havuzun biyokütle üretimi için faydalı hacminin düşmesine, pH ve sıcaklık gradyanlarıyla birlikte havuz içinde anoksik ortamlar oluşmasına sebep olmaktadır. Bu çalışma kapsamında kanal tipi alg havuzlarına yarım daire şeklinde akış düzenleyiciler eklenmesi ve alg kültürünün etrafında sirküle ettiği orta perdenin kalınlığının artırılmasının hidrolik güç tüketimine ve ölü bölge oluşumuna etkisi, farklı uzunluk/genişlik oranları için sayısal olarak incelenmiştir. Kanaldaki akışın çözülmesi için Reynolds ortalamalı Navier-Stokes denklem takımı hesaplamalı akışkan dinamiği yazılımı kullanarak çözülmüş, sayısal model sonuçlarının literatürle uyumlu olduğu görülmüştür. Buna göre havuzların temel tasarım parametrelerinden biri olan uzunluk/genişlik oranının 5'ten 20'ye çıkarılması yük kayıplarını ve ölü bölgeleri yaklaşık olarak %50 oranında azaltmış, havuzların dirsek kısmına eklenen akış düzenleyicilerin yük kayıplarını %84'e kadar indirdiği gözlemlenmiştir. Ayrıca bu yolla havuz içerisindeki ölü bölgeler %2'ye kadar düşürülebilmektedir. Orta perdeyi genişleterek akışı kanal çeperlerine yönlendirme yoluyla hidrolik güç tüketimi ve ölü bölge oluşumu %90 civarında azaltılabilirken, bu durumun aynı zamanda havuz hacminin düşmesini beraberinde getirdiğine dikkat çekilmiştir. Son olarak optimum tasarım kriterlerini belirlemek için reaktör geometrisinin havuzların gerçek ölçekteki biyolojik performansına etkisinin bilinmesi gerektiği belirtilirken, hesaplamalı akışkan dinamiği modellemesinin kanal tipi alg havuzlarının hidrolik davranışını anlamakta etkili bir yöntem olduğu anlaşılmıştır.

Anahtar Kelimeler: mikroalg, kanal tipi alg havuzu, hesaplamalı akışkanlar dinamiği, hidrolik tasarım

Numerical Analysis of The Hydraulic Behavior in Raceway Ponds

Abstract The raceway ponds which is the most common reactor system used for microalgae biomass production and algal wastewater treatment, raceway ponds have lower biomass production yields than closed systems due to a number of factors. The exposure of photosynthetic cells to sunlight and the mixture that provides them to contact with other nutrients required for growth are prominent factors limiting the yield of algal ponds. Dead zones formed in raceway ponds increase the head losses in the pond, decrease the active volume of the pond for biomass production, and cause anoxic environments together with pH and temperature gradients. In this study, the effects of adding semicircular flow deflectors to algal ponds and increasing the thickness of the central divider around which the algal culture circulates, on hydraulic power consumption and dead zone formation were investigated numerically for different length/width ratios. Reynolds averaged Navier-Stokes equation set was solved using computational fluid dynamics software to solve the flow in the channel, and it was observed that the numerical model results were compatible with the literature. Accordingly, increasing the length/width ratio, which is one of the basic design parameters of the ponds, from 5 to 20 reduced the head losses and dead zones by approximately 50%, and it was observed that the flow deflectors added to the bend section of the ponds reduced the head losses by up to 84%. In addition, dead zones within the pond can be reduced by up to 2% in this way. While hydraulic power consumption and dead zone formation can be reduced by approximately 90% by widening the central divider and directing the flow to the channel walls, it was noted that this situation also brought about a decrease in the pond volume. Finally, it was stated that the effect of the reactor geometry on the biological performance of the pools in real scale should be known in order to determine the optimum design criteria, and it was understood that computational fluid dynamics modeling is an effective method for understanding the hydraulic behavior of raceway ponds.

Keywords: microalgae, raceway ponds, computational fluid dynamics, hydraulic design

1. Giriş

Küresel iklim değişikliğiyle ilgili endişeler karbon-nötr teknolojilerin, atıksu arıtımı, kaynak geri kazanımı ve genel olarak biyoteknoloji alanlarında daha yaygın olarak uygulanmasını zorunlu hale getirmiştir. Bu bakımdan mikroalgler -ya da mikroyosunlar- atmosferik CO₂'i bağlama özellikleri, büyüme hızı ve değerli ürün sentezleme yetenekleriyle geleceğimizi şekillendirecek olan biyo-ekonominin önemli bir bileşeni olarak görülmektedir. Mikroalg temelli ürünler, biyoyakıt -biyodizel, biyoetanol, biyogaz-, gıda ve yem, ilaç ve kozmetik sanayilerinde hammadde olarak kullanılmaktadır. Ayrıca mikroalgler besi maddesi giderim kapasiteleriyle konvansiyonel atıksu arıtım sistemlerine güçlü bir alternatif teşkil etmektedir.

Mikroalg biyokütlesi üretim teknolojileri ana hatlarıyla açık havuzlar ve kapalı fotobiyoreaktörler olarak iki sınıfta ele alınabilir. Kapalı fotobiyoreaktörler, hidrodinamik rejimleri itibarıyla biyokütle üretim verimi olarak açık sistemlere göre daha avantajlıdır. Ayrıca kapalı olmaları sebebiyle istilacı türler ya da iklimsel olaylar (yağış, vb.) kaynaklı kültür çökmeleri bu tür sistemlerde daha az beklenir. Açık sistemler ise önemli ölçüde düşük ilk yatırım ve işletme maliyetleriyle öne çıkmakta olup, dünya genelindeki ticari ölçekteki mikroalg tesislerinin %90'ından fazlasında tercih edilmektedir (Ghasemi, vd., 2012; Mendoza, vd., 2013). Bu reaktör sistemi uzun dikdörtgen bir havuzun ortasının bir perdeyle ayrılarak hücre kültürünün bu perde etrafında döndürülmesiyle teşkil olunur. Havuzun dirsekleri yarım daire formunda olup mikroalg kültürünün tahriki genelde bir pedal yardımıyla gerçekleştirilir (Şekil 1). Bu tür sistemlerde derinlik, ışık geçirgenliğini sağlamak adına 30 – 40 cm ile sınırlandırılmış olup, akış hızı 0.2-0.5 m/s arasında değişir (Mendoza, vd., 2013). Maliyet açısından önemli bir avantaja sahip bu tür sistemlerde biyokütle üretim verimi kapalı sistemlere göre oldukça düşüktür. Açık sistemlerde biyokütle konsantrasyonu 0.3-0.5 g/L arasında değişirken, bu değer kapalı sistemlerde 3 g/L'nin üzerine çıkabilmektedir (Lundquist, vd., 2010; Norsker, vd., 2011; Borowitzka ve Moheimani, 2013).

Açık sistemlerde biyokütle üretim kapasitesinin düşük olmasına etki eden faktörlerin arasında fotosentetik hücrelerin güneş ışığına maruz kalma süresine doğrudan etki eden karışımın yetersiz olması öne çıkmaktadır. Alg havuzlarının tasarımında akış rejiminin ihmal edilmesi, biyokütle üretim performansın ve arıtma verimliliğinin düşmesine, enerji tüketiminin artmasına yol açabilir. Sonuç olarak, bu tür havuzlarda biyokütlenin çökebileceği ve ışık maruziyetinin azalabileceği, uygun biyokütle hasadının engellenebileceği ölü bölgelerin oluşma riski vardır. Bu nedenle, alg havuzlarındaki biyolojik sürecin verimliliğini artırmak için hidrodinamik davranışın optimize edilmesi çok önemlidir (Ortiz, vd., 2022). Mikroalg havuzlarında akış hızının 0.1 m/s altına düştüğü bölgeler ölü bölge kabul edilmektedir (Hadiyanto, vd., 2013). Bu bölgelerde biyokütle havuz dibine çökmekte, hatta zaman zaman anoksik şartlar oluşmakta ve havuzun mikroalg üretimi açısından faydalı hacminde ciddi düşüşler meydana gelmektedir. Akış hızının artırılması yoluyla karışımın iyileştirilmesi ve ölü bölgelerin azaltılması mümkün olsa da bu durumun aynı zamanda tesisin enerji ihtiyacını artırmasından dolayı istenmemektedir. Bununla beraber, açık mikroalg havuzlarının tasarımı, karışımın iyileştirilmesi ve işletme maliyetlerinin düşürülmesi bakımından kritik öneme sahiptir. İyi bir tasarım, mikroalg kültürünü askıda tutmalı ve reaktör boyunca oluşabilecek ölü

bölgeleri minimuma indirmelidir (Sompech, vd., 2012). Mikroalg havuzlarının tasarımında ve ölçek büyütmesinde kullanılan temel geometrik parametre uzunluk/genişlik (U/G) oranıdır (Hadiyanto vd., 2013). Literatürde alg havuzlarının hidrolik tasarımıyla ilgili yapılan çalışmalar U/G oranının artmasının enerji tüketimi ve ölü bölge oluşumu bakımından faydalı olduğunu ortaya koymuştur (Sompech vd., 2012; Liffman, vd., 2013; Hadiyanto vd., 2013; Ghasemi ve Mendoza, 2013). Bununla beraber belirlenecek U/G oranı tesisin kurulacağı araziyle de ilgilidir. U/G oranının azaltılması dışında alg havuzlarının temel tasarımında basit değişiklikler yaparak ölü bölgelerin ve enerji tüketiminin önemli ölçüde azaltılabileceği bilinmektedir (Sompech vd., 2012; Liffman, vd., 2013; Hadiyanto vd., 2013). Bunlardan en yaygın olanlar arasında havuzların dirsek bölgelerine yarım daire şeklinde akım düzenleyiciler yerleştirmek, orta bölmeyi genişletmek, ya da dirsek sonrası ölü bölge oluşumu gözlenen bölgeleri fiziksel yapılarla doldurmak sayılabilir. Bununla birlikte kanal tipi alg havuzlarının tam ölçekli uygulaması hala birkaç örnekle sınırlıdır ve tasarım prosedürleri standartlaştırılmamıştır (Ortiz, vd., 2022).

Bu çalışmada alg havuzlarındaki akışın, çeşitli tasarım değişiklikleri ve eklemelerle, farklı U/G oranları için sistematik bir sayısal değerlendirilmesinin yapılması amaçlanmıştır. Hesaplama kapasitesindeki sürekli gelişmelerle desteklenen sayısal teknikler, biyoteknoloji alanında giderek daha fazla uygulanmaktadır. Matematiksel modelleme, özellikle endüstriyel ölçekte mikroalg kültür sistemlerinin tasarımı ve optimizasyonuna yardımcı olmak ve bunu doğrulamak için bir araç olarak kullanılabilir (Ortiz, vd., 2022). Literatürde alg havuzlarının akış karakteristiğiyle ilgili çalışmalarda tek bir U/G oranı referans alınıyor olup, arazi özelliklerinden kaynaklanan farklı U/G oranları için yapılan tasarımların ölü bölge ve yük kaybı açısından sistematik bir kıyaslaması bulunmamaktadır. Buna karşın, akış düzenleyici gibi basit tasarım değişikliklerinin havuzların hidrolik karakterine olan etkisi, U/G oranı ve tesis büyüklüğü gibi temel parametrelerle değişmekte, bu durum mevcut çalışmaların karar vericiler ve mühendisler tarafından kullanılabilirliğini kısıtlamaktadır. Bu bakımdan mevcut çalışmanın tasarım mühendisleri için yol gösterici olacağı düşünülmektedir. Model tesis olarak 1 hektar alanı kaplayan bir alg havuzu seçilmiş, akışı çözmek için hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) kodu kullanılmıştır. Sayısal sonuç, literatürle karşılaştırılmış, farklı U/G oranlarının ve bu oranlardaki tasarım değişikliklerinin ölü bölge oluşumu ve basınç kaybına olan etkisi ortaya konulmuştur.

2. Yöntem

2.1 Model mikroalg tesisi

Borowitzka (1999) tekil havuz alanının 1 hektara kadar çıkabileceğini belirtmiştir ve bu ölçekte, 1 hektar alana sahip tesislerde mikroalg biyokütlesi üretimi gerçekleştirilmektedir (Craggs, vd., 2012; Sutherland, vd., 2020). En güncel olarak Yeni Zelanda'daki Cambridge atıksu arıtma tesisinde bulunan alg havuzunun boyutu artırılarak alanı 1 hektara çıkarılmıştır (Sutherland, vd., 2020). Bu aynı zamanda bu tür sistemlerle ilgili rastlanan en büyük havuzlardandır. Hem güncel uygulamasının olması hem de boyutundan dolayı, bu çalışmada model olarak 1 hektar alana sahip bir alg havuzu kullanılacaktır.

Tablo 1. Sayısal çalışmada kullanılan model mikroalg tesisinin boyutları.

U/G oranı	Uzunluk (m)	Genişlik (m)
5	210	42
10	300	30
20	440	22

Yukarıda bahsedildiği gibi tekil havuzların U/G oranı arazi kullanım durumuna göre değişkenlik gösterebilir. Buna göre U/G oranı 5, 10, 20 olan tesislerin boyutu aşağıdaki gibi olacaktır (Tablo 1).

Yukarıda da bahsedildiği gibi alg havuzlarının geleneksel tasarımına bazı müdahaleler yaparak havuzlardaki karışımın iyileştirilmesi ve güç tüketiminin azaltılması sık uygulanan bir pratiktir. Buna göre çalışma dahilinde i) Havuz dirsek

bölgelerine 1, 2 ve 3 adet yarım daire şeklinde akış düzenleyicisi eklenmiş ve ii) Kanalin orta perdesi toplam havuz genişliğinin %30, %45 ve %60'ını kapsayacak şekilde genişletilerek havuzdaki akış modellenmiş, bu müdahalelerin karışıma ve güç tüketimine etkisi incelenmiştir (Şekil 1). Böylece aşağıdaki özelliklere ait havuzların akış alanı hesaplanmıştır (Tablo 2). Böylece toplam 21 adet model tesisin akış analizi yapılmıştır.

Tablo 2. Sayısal çalışmada kullanılan model mikroalg tesislerinin özellikleri.

Model No	U/G oranı	Akış düzenleyici sayısı	Orta perde genişliği (m)/Toplam kanal genişliği(m)
1	5	0	0
2	5	1	0
3	5	2	0
4	5	3	0
5	5	0	0,3
6	5	0	0,45
7	5	0	0,6
8	10	0	0
9	10	1	0
10	10	2	0
11	10	3	0
12	10	0	0,3
13	10	0	0,45
14	10	0	0,6
15	20	0	0
16	20	1	0
17	20	2	0
18	20	3	0
19	20	0	0,3
20	20	0	0,45
21	20	0	0,6

2.2 Sayısal model

Havuzdaki akış ANSYS Fluent 21 ticari yazılımı kullanılarak RANSE (Reynolds ortalamalı Navier-Stokes) denklem takımının çözülmesiyle hesaplanmıştır. Havuzun türbülans karakteristiğini incelemek için standart k-ε türbülans modeli kullanılmıştır. Bu model, türbülans ve akışkanlar dinamiği için en yaygın kullanılan ve doğrulanmış modeldir. Model, oldukça düşük hesaplama eforu ve yüksek sayısal kararlılığı nedeniyle endüstriyel uygulamalar için tercih edilmektedir. Bu modelin sayısal formülasyonu, akışın türbülans özelliklerini temsil eden iki taşıma denklemi içerir. İlk taşıma denklemi, türbülanstaki enerjii belirleyen türbülans kinetik enerjisi (Denklem (1)) k ile ilgilidir ve ikinci denklem, türbülansın ölçeğini belirleyen türbülans yitimi (Denklem (2)) ε ile ilgilidir.

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u k) - \nabla \cdot \left(\left(\eta + \rho C_u \frac{k^2}{\varepsilon} \right) \nabla k \right) = \frac{1}{2} \rho C_u \frac{k^2}{\varepsilon} (\nabla u + \nabla u^t)^2 - \rho \varepsilon \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho \varepsilon}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u \varepsilon) - \nabla \cdot \left(\left(\eta + \rho C_u \frac{k^2}{\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right) = \frac{1}{2} \rho C_{\varepsilon 1} k \frac{k^2}{\varepsilon} (\nabla u + \nabla u^t)^2 - \rho C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (2)$$

Denklem 1 ve 2 çözülerek, model havuzun hız dağılımı değerleri ve giriş ve çıkış arasındaki basınç kaybı bulunmuştur. Yukarıda da belirtildiği gibi akış hızının 0.1 m/s'nin altında kaldığı alanlar ölü bölge olarak kabul edilmiştir. Giriş hızı 0.3 m/s olarak alınmıştır.

Literatürde en uygun türbülans modeliyle ilgili farklı yaklaşımlar bulunmakta olup, doğru türbülans modelinin seçimi sonuçların güvenilirliği açısından önemli bir husustur (Prussi, vd., 2014). Reynolds ortalamalı Navier-Stokes (RANS) ve büyük girdap simülasyonu (LES) yöntemlerinin hibridizasyonu, ayrılmış türbülanslı akış simülasyonlarıyla etkin bir şekilde başa çıkmanın en umut verici yolu olarak görülmektedir (Heinz, 2020). Ancak bu model yüksek hesaplama kapasitesi ve eforu gerektirmektedir.

Yüzey pürüzlülüğü türbülans yapılarını ve hız profillerini önemli ölçüde etkiler ve bu durum türbülans modellerine özellikle duvar ve sınır tabakası ayrılması noktalarında bir kısıt olarak yansır. Pürüzlülük etkilerinin hassas bir şekilde modellenmesi, çeşitli mühendislik uygulamalarında güvenilir sayısal simülasyon sonuçları için önemlidir. Bu konuda bilinen türbülans modellerini güncelleyerek sonuçların güvenilirliğini artırmayı hedefleyen yaklaşımlar mevcuttur (Chen ve Patel, 1988. Patel ve Yoon, 1995; Durbin, vd., 2001; Ma ve Chen, 2024). Çalışmada kullanılan standart k-ε türbülans modelinin geniş bir uygulama alanı bulursa da (Zhang, vd., 2015; Chen, vd., 2016; Ranganathan, vd., 2017; Cheng, vd., 2018; Kusmayadi, vd., 2020a Kusmayadi, vd., 2020b) HAD modellemesinde kullanılan başka modeller de mevcuttur. Bunlar arasında özellikle k-ω modeli dönüş ve girdap alanlarını hesaplamadaki isabetiyle uygulama alanı bulmuştur (Xu, vd., 2015). Standart k-ε modeli ise yüksek Reynolds sayısında bile türbülanslı akış için kararlı ve geçerli sonuçlar verip, ayrıca duvar fonksiyonunun uygulanması nedeniyle karmaşık geometriler için makul çözümler sunmaktadır (Ali, vd., 2014).

Modelde kullanılan tesisin boyutları Tablo 1'de verilmiştir.

Buna göre, değişen hesaplama alanı boyutları için problem içi eleman sayıları değişmektedir. Havuzdaki akış, 2 boyutlu olarak hesaplanmıştır. İki boyutlu modellerin çeşitli kısıtların olmakla beraber, düşük hesaplama eforu sebebiyle alg havuzlarındaki akışın incelenmesinde kullanılmaktadır (Hadiyanto, vd., 2013).

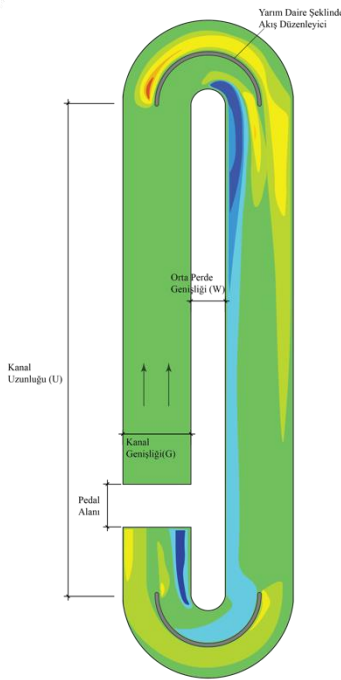
Problem, 4.5 GHz işlemci hızına sahip 4 çekirdekli bilgisayarda çözülmüştür. Her bir analizin çözümü, yaklaşık 15-20 dakika sürmüş olup bu değer eleman sayısına bağlı olarak değişmektedir.

2.3. Hidrolik güç hesabı

Pedalin enerji tüketimini temsil eden güç, pedaldan sonraki ve önceki noktalar arasındaki basınç farkının bir fonksiyonu olarak tanımlanmış olup, basınç farkı HAD modelinin çıktısı olarak, $k-\epsilon$ türbülans modelinin çözülmesinin bir sonucu olarak elde edilmiştir. Buna göre hidrolik güç tüketimi aşağıdaki denklemle hesaplanmıştır (Hadiyanto, vd., 2013);

$$Güç = \Delta P \cdot Q \quad (3)$$

Burada ΔP pedaldan önceki ve sonraki noktalar arasındaki basınç farkını, Q ise debiyi temsil etmektedir.



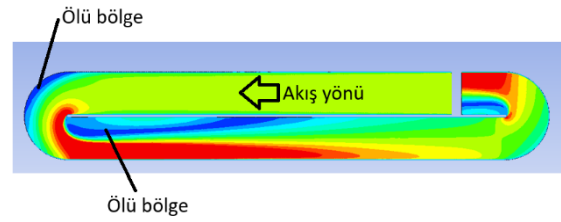
Şekil 1. Bir kanal tipi alg havuzunun temsili çizimi.

Çalışma kapsamında, en yüksek hidrolik güç tüketimine sahip tasarımın (Tablo 2, Model No 1) güç tüketimi 1 olarak alınmış, karşılaştırma amacıyla diğer senaryolarda hesaplanan güç değerleri buna göre normalize edilmiştir. Buna göre hidrolik güç tüketimi Model No 1'in yarısı olan bir tesisin güç tüketimi 0,5 olarak alınacaktır. İki boyutlu analiz sonuçlarının bu şekilde verilmesi daha uygun bulunmuştur.

3. Sonuçlar ve tartışma

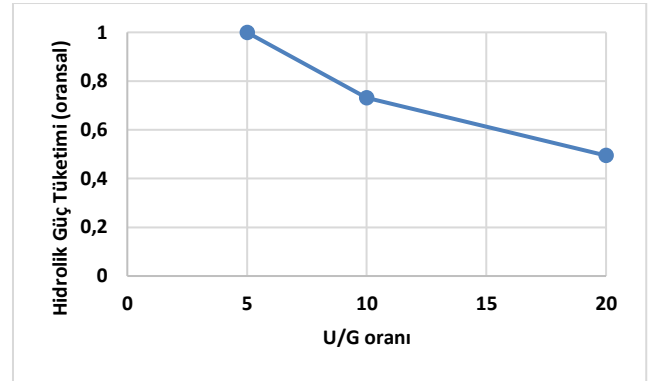
3.1 Farklı U/G oranlarının akışa ve güç tüketimine etkisi

Çalışma kapsamında yerleşim alanı 1 ha olan bir havuzun akış profili farklı U/G oranları için modellenmiştir. Buna göre U/G oranı arttıkça kanal uzunluğu artıp, kanal genişliği azalacaktır. Daha uzun bir kanal, suyun düz bölümler boyunca hareket ettirilmesiyle daha fazla enerji tüketilmesi anlamına gelir ve kanal uzunluğu arttıkça enerji tasarrufu göreceli olarak azalır. Buna karşın U/G oranı arttıkça hidrolik güç tüketiminin azaldığı gözlemlenmiştir. Bunun sebebi daha uzun kanalların gerektirdiği ilave güç tüketiminin, kanal genişliğinin düşürülmesiyle telafi edilmiş olmasıdır.



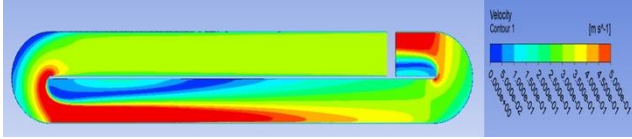
Şekil 2. U/G=5 için ölü bölgelerin ve akış yönünün gösterimi

Şekil 2'de U/G=5 için ölü bölgeler ve akış yönü gösterilmiştir. Buradaki mavi alan akış hızının 0.1 m/s'nin altında olduğu ölü bölgeleri göstermektedir. U/G oranı 5, 10 ve 20 olan havuzlarda beklenen hidrolik güç tüketiminin karşılaştırılması Şekil 3'te verilmiştir. Buna göre 1 ha alanı kaplayan bir havuz için U/G=5'e göre güç tüketimi U/G=10 için %27 ve U/G=20 için %51 oranında azalmıştır.



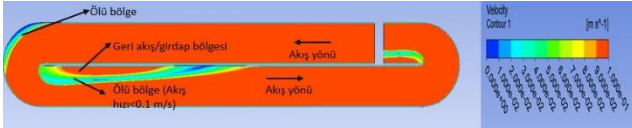
Şekil 3. Farklı U/G oranlarının hidrolik güç tüketimine etkisi.

Alg havuzlarında hidrolik güç tüketiminin önemli bir kısmı dirsek bölgelerinde meydana gelir. Bu bölgede akışkan, 180° döner. Buradan geçen akışın temel özelliği, akışkan üzerinde etkili olan santrifüj kuvvetinden kaynaklanan radyal bir basınç gradyanının varlığıdır (Sawanth, vd., 2019). Bu olgu nedeniyle, merkezdeki akışkan dış tarafa doğru hareket eder ve duvar boyunca iç tarafa doğru geri dönerek girdap oluşturur. Bu, basınç kayıplarında büyük bir artışa neden olan çift sarmal bir akış alanı yaratır ve böylece dirsekteki akış alanı bozulur. Bir dirsekte yaşanan bu basınç kayıpları, akış yönündeki bir değişiklikten kaynaklanan sürtünme ve momentum değişimlerinden kaynaklanır. Bu bölgede girdap ve ölü bölge oluşumu (Şekil 3, 4 ve 5) hücrelerin periyodik olarak güneş ışığı alma oranını düşürmekte ve havuzun faydalı hacminin düşmesine, aynı zamanda havuz içerisinde istenmeyen anoksik ortamlar oluşmasına sebep olmaktadır.



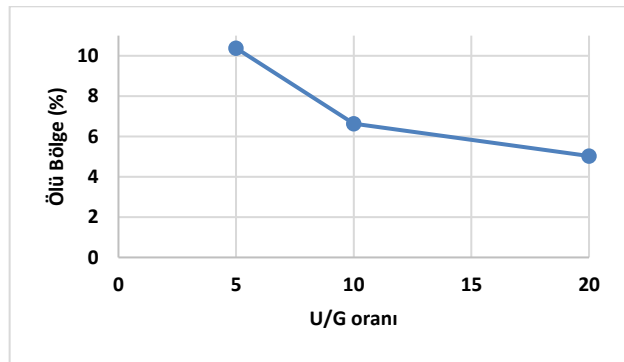
Şekil 4. U/G=5 için akış alanı.

Farklı U/G oranlarındaki akış hızı dağılımı ve ölü bölge oluşumu Şekil 4'te gösterilmiştir. Hızın eşit olmayan dağılımının düşük U/G oranlarında daha belirgin olduğu ve U/G oranını artırarak daha homojen bir hız dağılımının elde edilebileceği bilinmektedir (Sawanth, vd., 2019; Lima, vd., 2020). Bu sebeple dar ve uzun kanalların daha tercih edilebilir olduğu belirtilmiştir (Lima, vd., 2020). Buna karşın düşük U/G oranlarında düşük ve yüksek hız bölgeleri (Şekil 4) kanal boyunca daha belirgin bir şekilde devam etmekte ve kanal genişliği boyunca gözlemlenen hız değişimleri daha belirgin olmaktadır. Bu kanallarda, akışkanın dirsek, öncesi ve sonrası boyunca hareket etmesiyle birlikte merkezi duvarın uyguladığı sürüklenme kuvveti, hız büyüklüklerinin y bileşeninin (merkezi duvara dik) daha büyük olması nedeniyle daha önemlidir; bu da düşük akış hızlarına sahip bölgelerle hemen hemen aynı bölgeye (Şekil 4 ve 5) denk gelen daha büyük bir akış ayrımı bölgesiyle sonuçlanır (Lima, vd., 2020).



Şekil 5. U/G=5 için ölü bölgeler.

Sayısal modelin çıktısı olarak U/G oranı azaldıkça dirseklerde ve dirsek sonrası oluşan ölü bölgelerin arttığı görülmektedir. Bu bölümde akış hızı 0.1 m/s'nin altına düşmektedir ve ölü bölge oluşmaktadır. Akış düzenleyici içermeyen geleneksel tasarımda U/G oranı 5, 10 ve 20 olan havuzlar için ölü bölge oranları sırasıyla %10.38, 6.64 ve 5.03 olarak bulunmuştur (Şekil 6). Lima, vd., (2020) kanal tipi alg havuzları üzerine yaptıkları sayısal çalışmada, mevcut çalışmayla uyumlu olarak ölü bölgelerin dirsek sonrası orta bölme yakınlarında oluştuğunu ve havuz uzunluğu arttıkça bu bölgelerin kapladığı alanın toplam havuz alanına oranının düştüğünü belirtmişlerdir.



Şekil 6. Farklı U/G oranlarının ölü bölge oluşumuna etkisi.

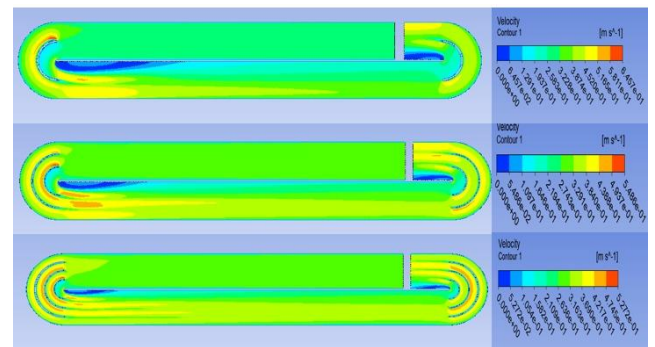
Ölü bölge oluşumu akış hızıyla doğrudan bağlantılıdır ve hızın artırılmasıyla azalması beklenmektedir. Sompech vd., (2012) pedal devrinin dakikada 55'e çıkarılmasıyla ölü bölgelerin tamamen giderilebileceğini belirtmişse de bu durum gerçek ölçekteki tesis işletme pratikleriyle uyuşmamakta, türbülansın artırılarak akışı iyileştirmenin enerji maliyetlerinde ciddi bir artışı beraberinde getirdiği bilinmektedir (Borowitzka ve Moheimani, 2013). Lima, vd.'nin (2020) bildirdiğine göre kanal uzunluğu arttıkça birim akışkan hacmi için güç sarfiyatı azalmaktadır. Ancak

bu çalışmada farklı uzunluklara sahip havuzların toplam hacimleriyle ilgili kıyaslama eksiktir. Ortiz, vd., (2022)'nin yaptığı HAD modelleme çalışmasında, mevcut çalışmayla uyumlu olarak dirsek sonrası akışın açık bir şekilde farklı akış hızlarına sahip iki alana bölündüğü görülmüş, orta bölme kenarında akış hızı 0.1 m/s'nin altına düşmüşken duvar kenarında 0.4 m/s'ye ulaştığı belirtilmiştir. Mevcut çalışmada dirsek sonrası duvar kenarı bölgesinde akış hızları 0.5 m/s'nin üstüne çıkmıştır. Bunun sebebi Ortiz, vd., (2022)'nin çalışmasında giriş hız değeri 0.15 m/s olarak alınırken mevcut çalışmada 0.3 m/s olarak belirlenmiştir.

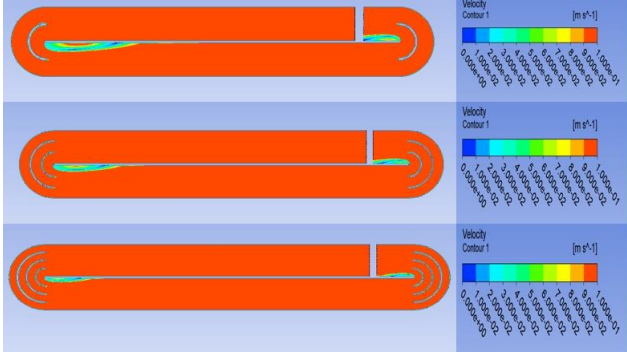
Kanal tipi alg havuzlarındaki hidrolik davranışın deneysel incelemesiyle ilgili literatürde kısıtlı da olsa çeşitli bilgiler vardır. Prussi, vd., (2014) yaptıkları HAD çalışmasını, havuzun belirli yerlerinde hız ölçümü yaparak doğrulamışlardır. Buna göre, kendi çalışmalarında ve mevcut çalışmada gözlemlenen dirsek sonrası akım ayrılma ve farklı hız bölgeleri deneysel olarak da belirgin olarak doğrulanmıştır. Buna göre U/G oranı 5 olan bir havuzda dirsek sonrasında orta duvar yakınlarında karmaşık girdap akışı gözlemlenmiş olup, kanal genişliği boyunca akış hızı orta duvara doğru gittikçe düşerek nihayet orta duvar yakınlarında ölü bölge oluşumu gözlemlenmiştir. Geri akım ve ölü bölge alanları mevcut çalışmayla uyumlu olsa da, akım ayrılma bölgesi sonrası ulaşılan maksimum hızlarda ufak farklılıklar olduğu gözlemlenmiştir. Bunun sebebinin farklı giriş hızları olduğu düşünülmektedir. Bunun yanında söz edilen çalışmada dirsek sonrası kanal boyunca akışın daha homojen bir hal aldığı da doğrulanmıştır.

3.2 Akış düzenleyicilerin akışa ve güç tüketimine etkisi

Daha önce de belirtildiği gibi, alg havuzlarında enerji kaybının çoğu dirsek bölgelerinde meydana gelir. Akış yönündeki keskin değişimler önemli bir basınç düşüşüne yol açar. Dirsek tasarımı sınır tabakası ayrılmasını azaltmak için değiştirilirse basınç düşüşü indirilebilir. Alg havuzu tasarımında en yaygın değişiklik, dirsek bölgelerine yarım daire şeklinde akış düzenleyiciler yerleştirilmesidir. Akış düzenleyiciler, alg havuzlarında birden fazla yere yerleştirilebilen basit, küçük ve pasif cihazlardır. Bu cihazlar, akış enerjisini ek torka dönüştürmek üzere tasarlanmıştır. Akış düzenleyiciler çalışmak için herhangi bir harici güce ihtiyaç duymazlar. Akış düzenleyicilerin varlığı nedeniyle hücrelerin çökmesi ve büyük girdapların oluşması ortadan kaldırılabilir ve bu da alg havuzlarında ölü bölgelerin azalmasıyla sonuçlanır (Şekil 7,8,9,12).

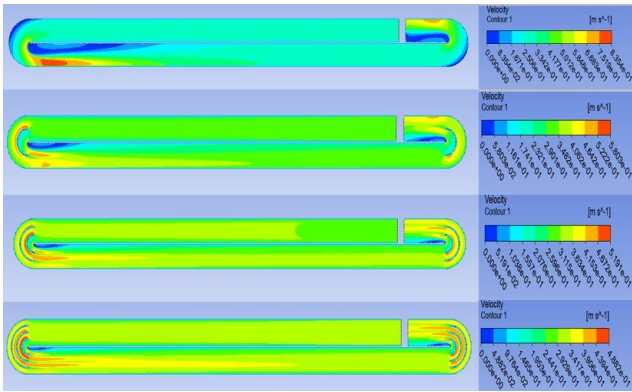


Şekil 7. U/G=5 için 1,2 ve 3 akış düzenleyici eklenmiş havuzun akış alanı.



Şekil 8. U/G=5 için 1,2 ve 3 akış düzenleyici eklenmiş havuzun ölü bölgeleri.

Sayısal model çıktısı olarak, akış düzenleyicilerin, sürtünmeye bağlı enerji kaybının artmasına sebep olmasına karşın, toplam güç tüketimini önemli derecede düşürdüğü gözlemlenmiştir.



Şekil 9. U/G=10 için 0,1,2 ve 3 akış düzenleyici eklenmiş havuzun akış alanı.

Bunun nedeni, fiziksel birer yapı olan bu akış düzenleyiciler nedeniyle oluşan sürtünme kayıplarının, ölü bölgelerin küçültülmesi veya tamamen ortadan kaldırılması sonucu azalan enerji kaybıyla fazlasıyla telafi edilmiş olmasıdır. Akışkanın ölü bir bölgedeki dolaşımı sürekli olarak enerji tüketimiyle sonuçlanmaktadır (Sompech vd., 2012).



Şekil 10. U/G=5 için akış düzenleyicilerin hidrolik güç tüketimine etkisi.

U/G=5 için akış düzenleyicilerin hidrolik güç tüketimine etkisi Şekil 10'da verilmiştir. Buna göre bir adet akış düzenleyicinin havuzlardaki hidrolik güç tüketimini önemli ölçüde azaltacağı görülmüştür. U/G=5 için 1, 2 ve 3 adet akış düzenleyicinin, hidrolik güç tüketimini, hiç akış düzenleyicinin olmadığı senaryoya göre sırasıyla %66, 77 ve 81 oranlarında azaltması beklenmektedir.



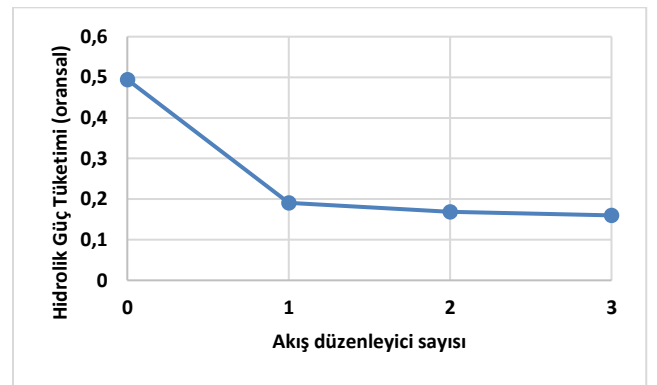
Şekil 11. U/G=10 için akış düzenleyicilerin hidrolik güç tüketimine etkisi.

U/G=10 için akış düzenleyicilerin hidrolik güç tüketimine olan oransal etkisi Şekil 11'de verilmiştir.



Şekil 12. U/G=10 için 0,1,2 ve 3 akış düzenleyici eklenmiş havuzun ölü bölgeleri.

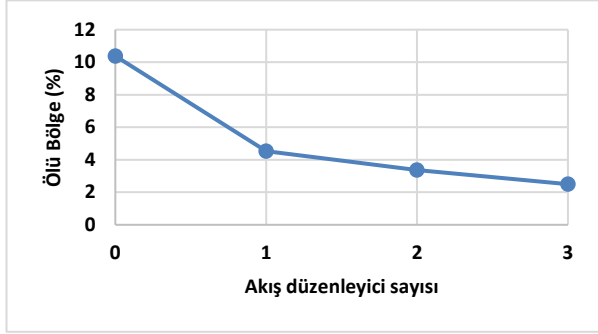
Hiç akış düzenleyicinin olmadığı senaryoda, U/G oranı 10'a yükseltildiğinde, hidrolik güç tüketimi daha önce de belirtildiği gibi yaklaşık %25 oranında azalmaktadır. U/G=10 için 1, 2 ve 3 adet akış düzenleyicinin, hidrolik güç tüketimini, U/G=5'te hiç akış düzenleyicinin olmadığı senaryoya göre sırasıyla %77, 82 ve 83 oranlarında azaltması beklenmektedir. Bu değerlerin U/G=10'da hiç akış düzenleyicinin olmadığı senaryoya göre sırasıyla %69, 76 ve 77 olması beklenmektedir.



Şekil 13. U/G=20 için akış düzenleyicilerin hidrolik güç tüketimine etkisi.

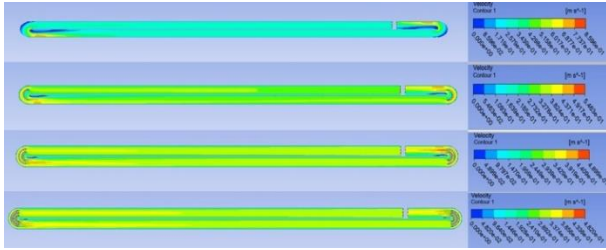
U/G=20 için akış düzenleyicilerin hidrolik güç tüketimine olan oransal etkisi Şekil 13'te verilmiştir. Hiç akış düzenleyicinin olmadığı senaryoda, U/G oranı 20'ye yükseltildiğinde, hidrolik güç tüketimi yaklaşık %50 oranında azalmaktadır. U/G=20 için 1, 2 ve 3 adet akış düzenleyicinin, hidrolik güç tüketimini, U/G=5'te hiç akış düzenleyicinin olmadığı senaryoya göre sırasıyla %81,83 ve 84 oranlarında azaltması beklenmektedir. Bu değerlerin U/G=20 için hiç akış düzenleyicinin olmadığı senaryoya göre sırasıyla %61, 66 ve 67 olması beklenmektedir. Görüldüğü gibi U/G oranı

ve akış düzenleyici sayısı ile hidrolik güç tüketimi arasında ters orantı vardır, ancak akış düzenleyiciler yoluyla güç tüketiminde sağlanan iyileşme, U/G oranının artmasıyla oransal olarak azalmaktadır.

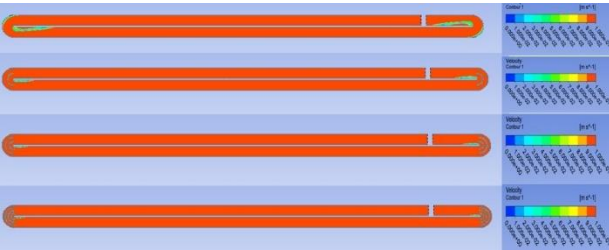


Şekil 14. U/G=5 için akış düzenleyicilerin ölü bölge oluşumuna etkisi.

U/G oranında olduğu gibi, akış düzenleyicilerin sayısı artırıldıkça ölü bölge oranı azalmaktadır (Şekil 15, 16). Bu, ilk olarak Mangelson ve Watters (1972) tarafından atık stabilizasyon havuzlarının veriminin artırılması için tavsiye edilmiştir. U/G=5, 10 ve 20 için 1, 2 ve 3 adet akış düzenleyici için ölü bölge oluşum oranları Şekil 14, 17 ve 18'de gösterilmiştir.



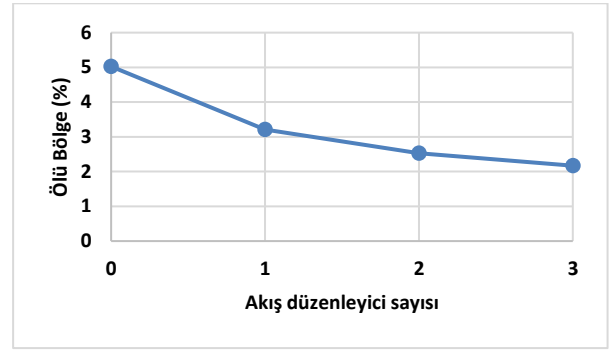
Şekil 15. U/G=20 için 0, 1, 2 ve 3 akış düzenleyici eklenmiş havuzun akış alanı.



Şekil 16. U/G=20 için 0, 1, 2 ve 3 akış düzenleyici eklenmiş havuzun ölü bölgeleri.



Şekil 17. U/G=10 için akış düzenleyicilerin ölü bölge oluşumuna etkisi.

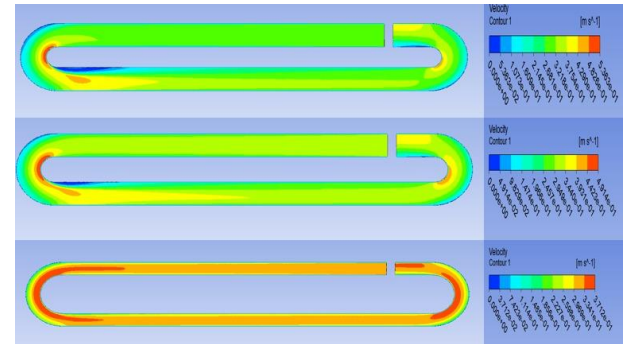


Şekil 18. U/G=20 için akış düzenleyicilerin ölü bölge oluşumuna etkisi.

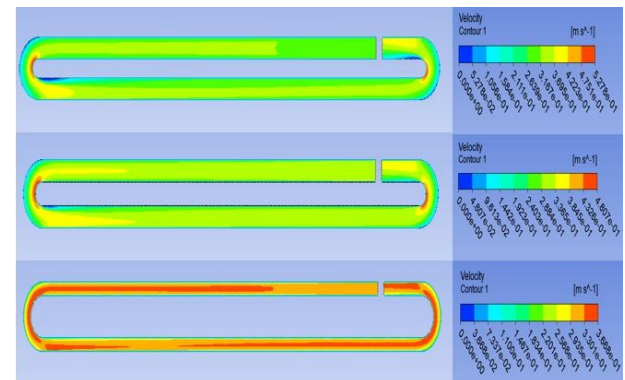
Buna göre U/G=5 için ölü bölge oranları 0, 1, 2 ve 3 akış düzenleyici için sırasıyla %10.38, 4.52, 3.36 ve 2.50 olarak bulunmuştur. U/G=10 ve 20 için ise 0, 1, 2 ve 3 adet akış düzenleyici için %6.64, 3.33, 2.61, 2.40 ve %5.50, 3.21, 2.53 ve 2.17 olarak bulunmuştur. Ortiz, vd., (2022) 1 ve 2 adet akış düzenleyicinin akış alanına olan etkisini sayısal olarak inceledikleri çalışmada akış düzenleyici sayısı arttıkça dirsek sonrası ölü bölgelerin önemli ölçüde azaldığını ancak tam olarak giderilemediğini belirtmişlerdir. Benzer durum mevcut çalışmada da gözlemlenmiş olup (Şekil 7) dirsek sonrası orta bölme kenarında akış hızının 0.1 m/s'den düşük olduğu girdap bölgesinin alanı, akış düzenleyicilerin sayısı ile paralel olarak azalmıştır.

3.3 Orta perdenin genişletilmesinin akışa ve güç tüketimine etkisi

Kanaldaki orta perdenin genişliğinin artırılmasıyla (Şekil 1), akış doğrudan 180° dolaştırılmaz ve önceki havuz tasarımına kıyasla kanalda daha düzgün bir hız alanı oluşur.

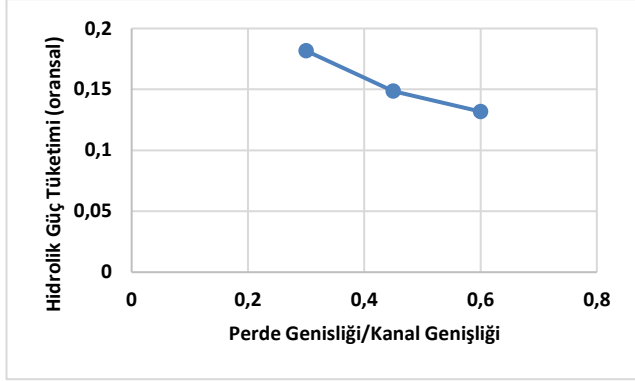


Şekil 19. U/G=5 için orta perde kalınlığının havuz genişliğinin %30,45 ve 60'ına kadar yükseltildiği durumdaki akış alanı.



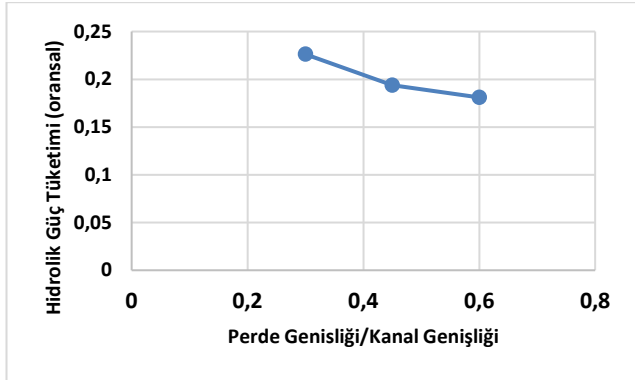
Şekil 20. U/G=10 için orta perde kalınlığının havuz genişliğinin %30,45 ve 60'ına kadar yükseltildiği durumdaki akış alanı.

Hidrolik özellikler iyileştirildiğinden güç tüketimi orijinal tasarımdan daha düşüktür (Şekil 21). Ayrıca akış eşit olarak dağıtılır ve kanaldaki ölü bölgeler neredeyse sıfıra indirilebilir (Şekil 19,20,24). Bu durum, sabit derinlik için orta duvarın genişliğinin artmasının ölü bölgelerin hacmini azalttığını belirten Mangelson ve Watters (1972) ve Hادیانتو, vd., (2013)'nin belirttikleriyle örtüşmektedir.

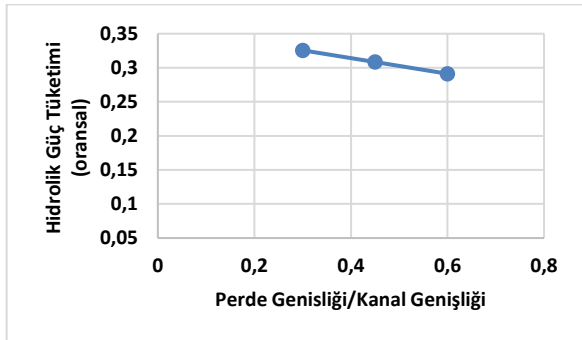


Şekil 21. U/G=5 için orta perde kalınlığının havuz genişliğinin %30,45 ve 60'ına kadar yükseltilmesinin hidrolik güç tüketimine etkisi.

Şekil 21'de U/G=5'te, perde kalınlığının kanal genişliğinin %30,45 ve 60'ını kapladığı durumlardaki hidrolik güç tüketiminin U/G=5'te perde kalınlığının ihmal edilebilir (<1m) olduğu duruma oranlanarak verilmiştir. Buna göre perde kalınlığını, kanal genişliğinin en az %30'unu kaplayacak şekilde artırmak hidrolik güç tüketimini %80'in üzerinde azaltmaktadır.



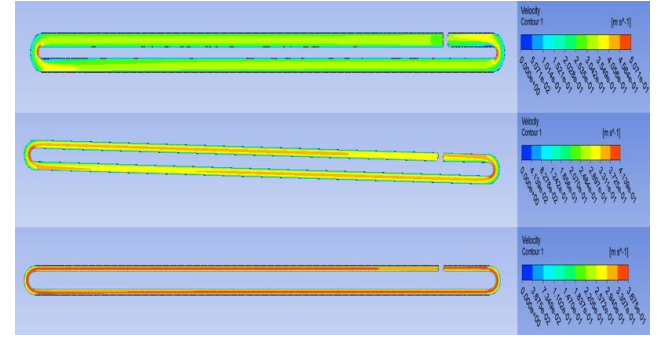
Şekil 22. U/G=10 için orta perde kalınlığının havuz genişliğinin %30,45 ve 60'ına kadar yükseltilmesinin hidrolik güç tüketimine etkisi.



Şekil 23. U/G=20 için orta perde kalınlığının havuz genişliğinin %30,45 ve 60'ına kadar yükseltilmesinin hidrolik güç tüketimine etkisi.

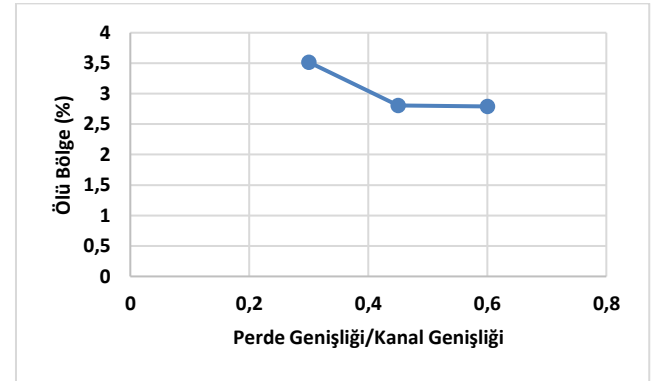
Şekil 22 ve 23'te U/G=10 ve 20 için orta perde genişliğinin artırılmasının hidrolik güç tüketimi üzerine etkisi gösterilmiştir. Buradaki en dikkat çekici sonuç, U/G oranının artmasıyla, güç tüketimindeki tasarrufun artmamasıdır. Akışı havuz çeperlerine yönlendirmek güç tüketimi üzerinde ciddi

bir tasarruf sağlamakta, ancak bu durumda U/G oranının artırılması, kanal uzunluğunun da artması kaynaklı olarak güç tüketiminin de artmasına sebep olmaktadır.

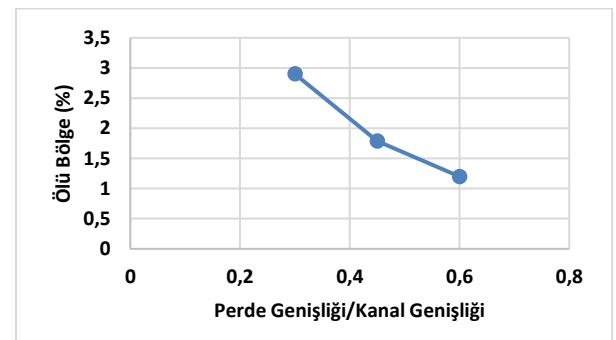


Şekil 24. U/G=20 için orta perde kalınlığının havuz genişliğinin %30,45 ve 60'ına kadar yükseltildiği durumdaki akış alanı.

Akışın orta perdeyi genişletmek yöntemiyle kanal çeperlerine yöneltilmesi ölü bölgelerin azaltılması anlamında da ciddi iyileştirmeleri beraberinde getirmektedir. Ortiz, vd., (2022)'nin bildirdiğine göre orta bölmenin genişletilmesiyle, mevcut çalışmada olduğu gibi kanal genişliği boyunca akış hızı homojen hale gelmektedir. Şekil 25'te görüldüğü gibi U/G=5 için orta perde kalınlığının, kanal genişliğinin %30,45 ve 60'ına çıkarılmasıyla havuz içi ölü bölge oranları %3,52, 2,81 ve 2,79 olmaktadır. Bunun akış düzenleyiciler yoluyla sağlanandan baha büyük bir iyileşme olduğu göze çarpmaktadır. Orta perde kalınlığının ihmal edilebilir (<1m) olduğu durumda bu değer, yukarıda belirtildiği gibi %10,38'dir.

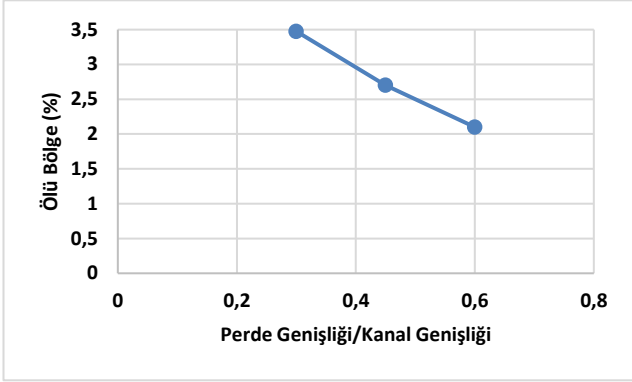


Şekil 25. U/G=5 için orta perde kalınlığının havuz genişliğinin %30,45 ve 60'ına kadar yükseltilmesinin ölü bölge oluşumuna etkisi.



Şekil 26. U/G=10 için orta perde kalınlığının havuz genişliğinin %30,45 ve 60'ına kadar yükseltilmesinin ölü bölge oluşumuna etkisi.

U/G=10 ve 20 için de orta perdenin kalınlaştırılmasının ölü bölgeleri %3,5 ila 1 arasına kadar indirebildiği görülmüştür (Şekil 26 ve 27). Ancak unutulmamalıdır ki bu durum havuz hacminin düşmesini de beraberinde getirecektir.



Şekil 27. U/G=20 için orta perde kalınlığının havuz genişliğinin %30,45 ve 60'ına kadar yükseltilmesinin ölü bölge oluşumuna etkisi.

Alg havuzlarında karışımın iyileştirilerek biyokütle üretim hızının artırılması konusunda yapılan çalışmalarda bu tür havuzların performansının belli ölçüde artırdığı belirtilmiştir (Zhang, vd., 2015; Cheng, vd., 2015; Chen, vd., 2016; Cheng, vd., 2018; Akca, vd., 2023). Bu çalışmalar daha ziyade dikey karışımın artırılmasına yönelmiş olsa da akım düzenleyicilerin hücrelerin maruz kaldığı ışığa olan etkisi konusunda çeşitli bilgiler mevcuttur. Chen, vd., (2016) yaptıkları çalışmada çeşitli sayılardaki akış düzenleyicinin hücrelerin maruz kaldığı ışık miktarını %33,8 ila %54,8 arasında artırdığını belirtmişlerdir. Bu noktada kritik olan husus çalışmanın yapıldığı havuzun geometrik özellikleridir. Chen, vd.'nin çalışmasında 2 m uzunluğunda ve 0,7 m genişliğinde olup U/G oranı 2,85 olan pilot ölçekli bir havuz kullanılmıştır. Böyle bir havuzda hücreler, ışık yönünde karışımı sağlayan pedaldan çok daha sık geçerler. Oysa ki gerçek ölçekli havuzlarda U/G oranları çok daha büyük olup, pedal kaynaklı karışımın etkisi çok daha azdır. Dolayısıyla pedalin havuzun hidrodinamik şartlarına olan etkisinin çok daha fazla olduğu pilot ve laboratuvar ölçeğinde yapılan çalışmalarda elde edilen biyolojik sonuçlar, gerçek ölçekteki şartları yansıtmaktan uzaktırlar. Bu çalışmalardan elde edilen sonuçlar üzerinden gerçek ölçekli alg tesislerinde çeşitli reaktör tasarımları için beklenen biyolojik verim artışının değerlendirilmesinin hatalı olacağı düşünülmektedir.

Çalışmada önerilen tasarım değişikliklerinden orta bölmenin genişliğinin artırılmasının pratikte uygulanması zordur. Bu yaklaşım kullanılan havuz hacmini azaltacağı gibi halihazırda işletilen tesislerin bu şekilde yeniden düzenlenmesini maliyetli olabilir. Buna karşın, paslanmaz çelik veya alüminyumdan imal edilmiş yarım daire şeklindeki akış düzenleyiciler görece daha az maliyet gerektirdikleri gibi kurulmuş olan tesislere sonradan ilave edilmeleri kolaydır. Burada önemli olan husus kullanılan malzemenin paslanma, korozyon vb. sebeplerden dolayı yıpranması ve daha da önemlisi havuzdaki canlı hayatına zarar vermesi noktasındadır. Kullanılacak malzemenin alg büyümesi için kullanılacak besiyeriyle hiçbir şekilde reaksiyona girmemesi gerekmektedir.

3.4 Güçlü yönler ve sınırlamalar

Kanal tipi mikroalg havuzlarının hidrolik karakterini anlamak için HAD modellemesi güvenilir bir yöntem olarak öne çıkmakta olup, bu konuda yapılmış pek çok çalışma mevcuttur. Bunların yanında HAD kodu kullanarak yapılan çalışmaların çeşitli sınırlamaları mevcuttur.

Çalışma kapsamındaki en büyük sınırlama olarak pedal hareketinin yüksek hesaplama eforu gerektirmesi sebebiyle modellenememiş olması gösterilebilir. Pedalla karışma,

akışın kanal genişliğinden ziyade, derinlik boyunca homojen olmamasına, akış hızının derinlikle birlikte azalmasına sebep olmaktadır (Akca, vd., 2024). İki boyutlu modelleme çalışmalarında bu durum ihmal edilmektedir. Literatürde pedal hareketinin modellenmesine odaklanmış çalışmalar bulunsada da alg havuzlarının geneline inceleyen çalışmalarda mevcut makalede kullanılan yöntem daha yaygın olarak görülmektedir. Aynı şekilde iki boyutlu modellerde dirseklerde meydana gelen dikey karışım, serbest su yüzey ve rüzgar kaynaklı dalga etkisi görülememektedir. Bununla birlikte mevcut modelleme yöntemi sayısal güvenilirliği dolayısıyla alg havuzlarının hidrolik davranışını anlamakta sıklıkla kullanılmaktadır.

4. Sonuç

Kanal tipi mikroalg havuzlarının ölü bölge ve hidrolik güç tüketimlerini analiz etmeyi amaçlayan mevcut çalışma kapsamında dirsek bölgelerine yarım dairesel akış düzenleyiciler koyulması ve kanalı ikiye bölen, alg kültürünün etrafında sirküle ettiği orta perdenin genişliğinin artırılması değerlendirilmiştir. Akışı modellemek için HAD kodu kullanılmıştır. Akış düzenleyici içermeyen geleneksel tasarımda U/G oranı 5, 10 ve 20 olan havuzlar için ölü bölge oranları sırasıyla %10,38, 6,64 ve 5,03 olarak bulunmuşken, bu değerler akış düzenleyiciler yoluyla yaklaşık %2'ye kadar düşürülebileceği bulunmuştur. Hidrolik güç tüketimi ise yaklaşık %80 ila 90 oranında azaltılabilmektedir. Tek bir akış düzenleyici, havuzların hidrolik karakterine ciddi anlamda etki ederken ikinci ve üçüncü akış düzenleyicilerin etkisi görece daha önemsizdir. Kanalı ikiye bölen orta perdenin genişliğinin artırılmasıyla ise ölü bölgeler neredeyse tamamıyla giderilebileceği gibi, hidrolik güç tüketiminin yaklaşık %80'in üstünde azaltılabileceği gözlemlenmiştir. Ancak bu durum, havuz hacminin düşmesini de beraberinde getirmektedir.

Tesis tasarımında nihai optimum kararı verebilmek için farklı tasarımlardaki yük kayıpları ve ölü bölge oranlarıyla birlikte, bütün bunların alg büyümesine olan etkisinin de bilinmesi gerekmektedir. U/G oranının artırılmasıyla havuzların hidrolik şartlarında iyileşme sağlanabileceği biliniyorsa da, daha büyük U/G oranı, -aynı tesis alanı için- kanal uzunluğunun artırılması, bu da alg hücrelerinin, karışımı sağlayan pedaldan daha uzun aralıklarla geçmesi anlamına gelmektedir. Pedal, alg havuzlarında, fotosentetik hücreler için hayati öneme sahip ışık yönünde karışımın -dikey karışım- sağlandığı tek yerdir ve U/G oranının artırılması yük kayıplarını ve ölü bölgeleri azaltsa da, tesislerin biyolojik performansına olumsuz anlamda etki edebilir.

Sonuç olarak, optimum tesis tasarımının belirlenmesi için daha fazla veriye, özellikle de gerçek ölçekte biyolojik sonuçlara ihtiyaç olsa da, HAD modellemesinin kanal tipi alg havuzlarının hidrolik şartlarının iyileştirilmesi için strateji geliştirilmesi noktasında önemli bir araç olduğu düşünülmektedir. Gelecek çalışmalarda iyileştirilmiş hidrolik şartların havuzların biyolojik performansına etkisi, büyük ölçek için belirlenmelidir.

5. Kısaltmalar

- ρ : Akışkanın yoğunluğu (kg/m^3)
- C_{e1} : Türbülans yitimi sabiti (1) (birimsiz)
- C_{e2} : Türbülans yitimi sabiti (2) (birimsiz)
- C_u : Türbülans model sabiti (birimsiz)
- u : Akışkanın hız vektörü (m/s)

k: Türbülans kinetik enerjisi (m^2/s^2)
 ϵ : Türbülans enerji yitimi (m^2/s^2)
 η : Dinamik viskozite (Pa.s)
 ∇ : Gradyan operatörü
t: zaman (s)

Makale araştırma ve yayın etiğine uygun olarak hazırlanmıştır.

6. Kaynaklar

- Akca, M. S., Ceylan-Perver, G., Duranay, A., Kinaci, O. K., & Inanc, B. (2023). Application of Vortex Induced Vibration Systems to Improve Vertical Mixing and Create Light/Dark Cycles for Enhanced Algal Biomass Productivity in Raceway Ponds. *Journal of Marine Science and Engineering*, 11(2), 245.
- Akca, M. S., Kinaci, O. K., & Inanc, B. (2024). Improving light availability and creating high-frequency light–dark cycles in raceway ponds through vortex-induced vibrations for microalgae cultivation: a fluid dynamic study. *Bioprocess and Biosystems Engineering*, 47(11), 1863-1874.
- Ali, H., Cheema, T. A., Yoon, H. S., Do, Y., & Park, C. W. (2015). Numerical prediction of algae cell mixing feature in raceway ponds using particle tracing methods. *Biotechnology and bioengineering*, 112(2), 297-307.
- Borowitzka, M. A. (1999). Commercial production of microalgae: ponds, tanks, tubes and fermenters. *Journal of biotechnology*, 70(1-3), 313-321.
- Borowitzka, M. A., & Moheimani, N. R. (Eds.). (2013). *Algae for biofuels and energy* (Vol. 5, pp. 133-152). Dordrecht: Springer.
- Chen, H., & Patel, V. C. (1988). Near-wall turbulence models for complex flows including separation. *AIAA journal*, 26(6), 641-648.
- Chen, Z., Zhang, X., Jiang, Z., Chen, X., He, H., & Zhang, X. (2016). Light/dark cycle of microalgae cells in raceway ponds: Effects of paddlewheel rotational speeds and baffles installation. *Bioresource technology*, 219, 387-391.
- Cheng, J., Yang, Z., Ye, Q., Zhou, J., & Cen, K. (2015). Enhanced flashing light effect with up-down chute baffles to improve microalgal growth in a raceway pond. *Bioresource technology*, 190, 29-35.
- Cheng, J., Guo, W., Cai, C., Ye, Q., & Zhou, J. (2018). Alternatively permuted conic baffles generate vortex flow field to improve microalgal productivity in a raceway pond. *Bioresource technology*, 249, 212-218.
- Craggs, R., Sutherland, D., & Campbell, H. (2012). Hectare-scale demonstration of high rate algal ponds for enhanced wastewater treatment and biofuel production. *Journal of Applied Phycology*, 24, 329-337.
- Durbin, P. A., Medic, G., Seo, J. M., Eaton, J. K., & Song, S. (2001). Rough wall modification of two-layer $k-\epsilon$.
- Ghasemi, Y., Rasoul-Amini, S., Naseri, A. T., Montazeri-Najafabady, N., Mobasher, M. A., & Dabbagh, F. (2012). Microalgae biofuel potentials. *Applied Biochemistry and Microbiology*, 48, 126-144.
- Hadiyanto, H., Elmore, S., Van Gerven, T., & Stankiewicz, A. (2013). Hydrodynamic evaluations in high rate algae pond (HRAP) design. *Chemical Engineering Journal*, 217, 231-239.
- Heinz, S. (2020). A review of hybrid RANS-LES methods for turbulent flows: Concepts and applications. *Progress in Aerospace Sciences*, 114, 100597.
- Kusmayadi, A., Suyono, E. A., Nagarajan, D., Chang, J. S., & Yen, H. W. (2020a). Application of computational fluid dynamics (CFD) on the raceway design for the cultivation of microalgae: a review. *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology*, 47(4-5), 373-382.
- Kusmayadi, A., Philippidis, G. P., & Yen, H. W. (2020b). Application of computational fluid dynamics to raceways combining paddlewheel and CO₂ spargers to enhance microalgae growth. *Journal of bioscience and bioengineering*, 129(1), 93-98.
- Liffman, K., Paterson, D. A., Liovic, P., & Bandopadhyay, P. (2013). Comparing the energy efficiency of different high rate algal raceway pond designs using computational fluid dynamics. *Chemical Engineering Research and Design*, 91(2), 221-226.
- Lima, A., Marinho, B., & Morais, T. (2021). Hydrodynamic analysis of flow in raceway ponds for algae cultivation under versatile conditions. *Aquaculture International*, 29, 19-35.
- Lundquist, T. J., Woertz, I. C., Quinn, N. W. T., & Benemann, J. R. (2010). A realistic technology and engineering assessment of algae biofuel production. *Energy Biosciences Institute*, 1.
- Ma, H., & Chen, H. C. (2024). Enhancing the two-layer k - ϵ turbulence model through rough wall modification. *Physics of Fluids*, 36(10).
- Mangelson K.A., G.Z. Watters, The treatment efficiency of waste stabilization ponds, *Journal of the Sanitary Engineering Division, American Society Civil Engineering* 98 (1972) 407–425.
- Mendoza, J. L., Granados, M. R., De Godos, I., Ación, F. G., Molina, E., Banks, C., & Heaven, S. (2013). Fluid-dynamic characterization of real-scale raceway reactors for microalgae production. *Biomass and Bioenergy*, 54, 267-275.
- Norsker, N. H., Barbosa, M. J., Vermuë, M. H., & Wijffels, R. H. (2011). Microalgal production—a close look at the economics. *Biotechnology advances*, 29(1), 24-27.
- Ortiz, A., Díez-Montero, R., García, J., Khalil, N., & Uggetti, E. (2022). Advanced biokinetic and hydrodynamic modelling to support and optimize the design of full-scale high rate algal ponds. *Computational and structural biotechnology journal*, 20, 386-398.
- Patel, V. C., & Yoon, J. Y. (1995). Application of turbulence models to separated flow over rough surfaces.
- Prussi, M., Buffi, M., Casini, D., Chiaramonti, D., Martelli, F., Carnevale, M., ... & Rodolfi, L. (2014). Experimental and

numerical investigations of mixing in raceway ponds for algae cultivation. *Biomass and bioenergy*, 67, 390-400.

Ranganathan, P., Amal, J. C., Savithri, S., & Haridas, A. (2017). Experimental and modelling of *Arthrospira platensis* cultivation in open raceway ponds. *Bioresource technology*, 242, 197-205.

Sawant, S. S., Gosavi, S. N., Khadamkar, H. P., Mathpati, C. S., Pandit, R., & Lali, A. M. (2019). Energy efficient design of high depth raceway pond using computational fluid dynamics. *Renewable Energy*, 133, 528-537.

Sompech, K., Chisti, Y., & Srinophakun, T. (2012). Design of raceway ponds for producing microalgae. *Biofuels*, 3(4), 387-397.

Sutherland, D. L., Park, J., Heubeck, S., Ralph, P. J., & Craggs, R. J. (2020). Size matters—Microalgae production and nutrient removal in wastewater treatment high rate algal ponds of three different sizes. *Algal Research*, 45, 101734.

Xu, B., Li, P., Waller, P., & Huesemann, M. (2015). Evaluation of flow mixing in an ARID-HV algal raceway using statistics of temporal and spatial distribution of fluid particles. *Algal Research*, 9, 27-39.

Zhang, Q., Xue, S., Yan, C., Wu, X., Wen, S., & Cong, W. (2015). Installation of flow deflectors and wing baffles to reduce dead zone and enhance flashing light effect in an open raceway pond. *Bioresource technology*, 198, 150-156.

Ayşegül ŞENGEL¹¹Oyak-Renault Otomobil Fabrikaları A.Ş., Ar-Ge, Nilüfer, Bursa, Türkiye. ORCID:0009-0004-1234-2443

Yazışma yazarı:

Ayşegül ŞENGEL,
aysegul.sengel@renault.com

Referans:

Sengel, A. (2024). Otomotiv Sektöründe Sürdürülebilirlik Stratejileri, *Çevre, İklim ve Sürdürülebilirlik*, 25(2), 87-96.Makale Gönderimi : 31 TEMMUZ 2024
Online Kabul : 29 ARALIK 2024
Online Basım : 31 ARALIK 2024

Özet Günümüzde otomotiv endüstrisi, dünya genelinde ve Türkiye'de hızla gelişen sektörlerden biridir. Bu gelişimle birlikte motorlu taşıtların kullanımının yaygınlaşması, çevre kirliliğinin artmasına ve çevreye olumsuz etkilerin ortaya çıkmasına neden olmaktadır. Motorlu taşıtların kullanımının yaygınlaşması sera gazlarının (CO₂ vb.) artmasına yol açarak hava kirliliğini ve iklim değişikliğini tetiklemektedir. Ancak, motorlu taşıt kullanımı çevre kirliliğini arttıran tek etken olmadığını belirtmek gerekir. Otomotiv endüstrisinde çevre kirliliğini arttıran diğer faktörler arasında motorlu taşıtların üretimi sırasında ve kullanım ömrünü tamamladıktan sonra ortaya çıkan tehlikeli ve tehlikesiz atıklar bulunmaktadır. Ayrıca, üretim sırasında doğal kaynaklardan biri olan suyun hızla tüketilmesi de çevreye zarar veren önemli unsurlardan biridir. Kullanılan motorlu taşıt sayısını azaltmak mümkün olmadığından, motorlu taşıtların çevreye verdiği olumsuz etkileri en aza indirmek ve çevre kirliliğini önlemek amacıyla otomotiv endüstrisinin gerekli önlemleri alması ve uygun stratejiler geliştirmesi gerekmektedir. Bu doğrultuda, otomotiv sektöründe faaliyet gösteren firmalar, sürdürülebilirlik planlarını hayata geçirmektedir. Sürdürülebilirlik planları kapsamında, çevre kirliliğini önlemek ve çevreye verilen zararı en aza indirmek için otomotiv endüstrisi, çevre dostu stratejilerini ekonomik ve ekolojik sürdürülebilirlik çerçevesinde değerlendirmektedir. Bu makalede, otomotiv endüstrisindeki üretici firmaların ekonomik sürdürülebilirliği sağlamak amacıyla geliştirdiği sürdürülebilir tedarik zinciri stratejileri incelenmiştir. Ekolojik sürdürülebilirlik üretim süreci, kullanım süreci ve ömrünü tamamlayan araçların geri dönüşümü olmak üzere üç aşamada ele alınmıştır. Bu aşamalarda, tüketilen doğal kaynaklar (özellikle su), yakıt kaynaklı sera gazı emisyonları ve ömrünü tamamlayan araçlardan kaynaklanan atıklar gibi çevresel etkiler ile bu etkileri azaltmaya yönelik stratejiler ele alınmıştır.

Anahtar Kelimeler: Otomotiv Sektörü, Ekonomik Sürdürülebilirlik, Ekolojik Sürdürülebilirlik, Otomotiv Sektöründe Sürdürülebilirlik Stratejileri

Economic and Ecological Sustainability in The Automotive Sector: Strategies and Methods

Abstract Today, the automotive industry is one of the rapidly growing sectors globally and in Turkey. Along with this development, the widespread use of motor vehicles has led to an increase in environmental pollution and the emergence of negative environmental impacts. The widespread use of motor vehicles leads to an increase in greenhouse gases (such as CO₂), which triggers air pollution and climate change. However, it should be noted that the use of motor vehicles is not the only factor contributing to environmental pollution. Other factors contributing to environmental pollution in the automotive industry include hazardous and non-hazardous waste generated during the production of motor vehicles and after they have completed their lifespan. Additionally, the rapid consumption of water, one of the natural resources used during production, is another significant environmental concern. Since reducing the number of motor vehicles in use is not feasible, the automotive industry must take necessary measures and develop appropriate strategies to minimize the negative environmental impacts of motor vehicles and prevent environmental pollution. In this regard, companies operating in the automotive sector are implementing sustainability plans. As part of these sustainability plans, the automotive industry evaluates its environmentally friendly strategies within the framework of economic and ecological sustainability to prevent environmental pollution and minimize environmental damage. This article examines the sustainable supply chain strategies developed by automotive manufacturers to ensure economic sustainability. Ecological sustainability is addressed in three stages: the production process, the usage process, and the recycling of end-of-life vehicles. In these stages, environmental impacts such as consumed natural resources (especially water), fuel-related greenhouse gas emissions, and waste generated from end-of-life vehicles, as well as strategies to reduce these impacts, are discussed.

Keywords: Automotive Sector, Economical Sustainability, Ecological Sustainability, Sustainability Strategies in The Automotive Sector

1. Giriş

1987 yılında Birleşmiş Milletler Brundtland Komisyonu, sürdürülebilirliği "gelecek nesillerin kendi ihtiyaçlarını karşılama yeteneklerinden ödün vermeden mevcut ihtiyaçları karşılamak" olarak tanımlamıştır (United Nations).

Sürdürülebilir bir gelecek için çevreyi koruma adına gerekli önlemleri almamız gerekmektedir. Gelişen dünyada, çevreye zarar veren birçok etken bulunmakta olup bu etkenlerin başında hızla büyüyen otomotiv endüstrisi gelmektedir. Otomotiv kullanımı, son on yılda hızla artmaktadır. Örneğin, Türkiye'de 1990 yılında 3.750.678 otomobil bulunurken, 2019 yılında bu sayı 23.156.975'e yükselmiştir ve bu durum, yaklaşık 30 yılda otomobil sayısında 6 katlık bir artış olduğunu göstermektedir (Tören ve Mollahasanoglu, 2022). Otomotiv kullanımındaki bu hızlı artışın çevreye olumsuz etkileri bulunmaktadır. Ancak, otomotiv endüstrisinin çevreye olan zararları yalnızca motorlu taşıtların sayısındaki artışla sınırlı değildir. Aynı zamanda, motorlu taşıtların üretim süreçleri, kullanım aşamaları ve kullanım ömürlerini tamamladıktan sonraki durumları da çevre üzerinde olumsuz etkiler yaratmaktadır. Bu durumda, çevreye verilen zararı azaltmak ve çevreyi korumak adına otomotiv endüstrisine önemli sorumluluklar düşmektedir. Bu sorumlulukların yerine getirilmesi amacıyla, otomotiv endüstrisi çeşitli sürdürülebilirlik çalışmaları yürütmektedir.

Sürdürülebilirlik kavramı, otomotiv endüstrisinde çevreye olan olumsuz etkileri azaltmak amacıyla iki temel kısımda, ekolojik ve ekonomik sürdürülebilirlik olarak ele alınmaktadır. Bu makalede, ekolojik ve ekonomik sürdürülebilirliğin ne anlama geldiği açıklanmakta ve otomotiv sektöründeki üretici firmaların bu alanlarda çevreye olan olumsuz etkileri en aza indirmek için geliştirdikleri stratejiler incelenmektedir. Ayrıca, Türkiye'deki otomotiv üretici firmalarının tercih ettiği sürdürülebilirlik stratejileri örneklerle açıklanmakta ve bu stratejilerin sonuçları değerlendirilmektedir.

Otomotiv sektöründe ekonomik sürdürülebilirlik, genel anlamda firmaların finansal kaynaklarını verimli bir şekilde kullanılması olarak tanımlanabilir. Ekonomik sürdürülebilirliğin çevreyi koruma amacıyla otomotiv sektöründe sağlanabilmesi için sürdürülebilirlik tedarik zinciri gibi çeşitli uygulamalar bulunmaktadır. Sürdürülebilir tedarik zinciri; sürdürülebilir tedarik, sürdürülebilir dağıtım, sürdürülebilir üretim ve tersine lojistik olmak üzere dört temel uygulamadan oluşmaktadır. Sürdürülebilir tedarik kapsamında, otomotiv üreticileri üretim süreçlerinde yeniden kullanılabilir ve geri dönüştürülebilir malzemeler, parçalar ya da ürünler tercih etmektedir. Sürdürülebilir üretim sağlamak için firmalar, minimum atık ve kirlilik oluşturmayı hedefleyen çalışmalar yürütmektedir. Sürdürülebilir dağıtım, sürdürülebilir ulaşım ve depolama gibi unsurları içermektedir. Örneğin, otomotiv üreticileri ihtiyaç duydukları malzemeleri ya da parçaları üretim tesislerine yakın bölgelerden tedarik ederek kara yolunda daha kısa mesafeler kat etmeyi sağlamaktadırlar. Bu sayede motorlu taşıtlardan kaynaklanan sera gazı salınımı azalır. Tersine lojistik kapsamında ise otomotiv sektöründe ürünlerin yeniden kullanımı teşvik edilmektedir. Bu uygulama, firmaların lojistik maliyetlerini düşürürken aynı zamanda malzemelerin ya da parçaların yeniden kullanılabilir olmasını

sağlayarak atık miktarını azaltır. Böylece çevre kirliliğini önlemekte ve çevrenin korunmasına katkı sağlamaktadır.

Örneğin, Orijinal Ürün Üreticisi 1 (OÜÜ 1), sıfırdan üretim yerine yeniden üretimi destekleyen firmalardan biridir. Bu yaklaşımı sayesinde, yılda 7.104 parçanın yeniden üretimini gerçekleştirmiştir ve sera gazı emisyonunun azalmasına katkı sağlamıştır (OÜÜ 1, 2022). Ayrıca, yeniden üretim yoluyla toplam 39,7 milyon TL tasarruf elde etmiştir (OÜÜ 1, 2022). Otomotiv sektöründe çalışmalara ve stratejilere odaklanılan bir diğer alan ekolojik sürdürülebilirliktir. Ekolojik sürdürülebilirliğin otomotiv endüstrisinde sağlanabilmesi için üç temel aşamada çalışmalar ve geliştirmeler yapılması gerekmektedir. Bu üç aşama; üretim sırası, üretim sonrası ve ömrünü tamamlamış araçlar olarak ele alınmaktadır. Araç üretimi sırasında otomotiv endüstrisinde doğal kaynaklar (su, elektrik vb.) yoğun bir şekilde kullanılmaktadır. Bu durum, doğal kaynakların hızla tükenmesine yol açmaktadır. Bu makale, araç üretimi sırasında tüketilen su miktarına ve su tüketimini azaltmak için otomotiv firmalarının uyguladığı yöntemlere odaklanmaktadır. Örneğin, otomotiv üretici firmalarından biri olan OÜÜ 1'in Fabrika 1'inde araç başına tüketilen temiz su miktarı 2,4 m³/araç, Fabrika 2'de bu miktar 1,8 m³/araçtır. Temiz su kaynaklarının tüketimini azaltmak amacıyla OÜÜ 1, Fabrika 1 ve Fabrika 2'de soğutma kuleleri yöntemini, ayrıca Fabrika 2'de ters osmoz yöntemini kullanmaktadır. Bu yöntemler sayesinde, OÜÜ 1'in 2030 yılına kadar araç başına temiz su kullanımını Fabrika 1'de 2,4 m³/araçtan 1,44 m³/araca, Fabrika 2'de ise 1,8 m³/araçtan 1,36 m³/araca düşürmesi hedeflemektedir. Ayrıca, her iki fabrikada uygulanan atıksu geri kazanım sistemi sayesinde atık suların yeniden kullanılabilir hale getirilmesi sağlanmaktadır (OÜÜ 1, 2022).

Üretim sonrası, yani kullanım aşamasında, iklim değişikliği nedeniyle çevreye zarar veren en güncel sorun motor yakıt tiplerinden kaynaklanan CO₂ emisyonundaki artıştır. OÜÜ 2 ve OÜÜ 3 gibi firmalar, CO₂ emisyonu sıfır olan elektrikli araçlar ile emisyonu sıfıra yakın olan hibrid araçlar geliştirmektedir. Ekolojik sürdürülebilirliğin üçüncü ve son aşaması, ömrünü tamamlamış araçlardır. Çevre ve Orman Bakanlığı tarafından 30 Aralık 2009 tarihinde yayımlanan "Ömrünü Tamamlamış Araçların (ÖTA) Kontrolü Yönetmeliği," kapsamlı bir süreç öngörmektedir. Yönetmelik, bu araçların ve parçalarının yeniden kullanımı, geri dönüşümü ve toplama noktaları, geçici depolama alanları ve işleme tesisleri içeren bir çerçeve sunmaktadır (Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, 2022). Örneğin, OÜÜ 1 ve OÜÜ 2, ÖTA'ları teslim aldıkları özel yerler oluşturmuş ve bu araçlardan çıkan atıkları bertaraf ederek, geri dönüşüm süreçlerini başlatmıştır.

Otomotiv endüstrisi, hızla gelişen bir sektör olmakla birlikte çevreye çeşitli zararlar vermektedir. Bu olumsuz etkileri azaltmak ve çevreyi korumak amacıyla otomotiv endüstrisi, ekonomik ve ekolojik sürdürülebilirlik stratejileri geliştirmektedir. Bu makalede, otomotiv endüstrisinde ekonomik ve ekolojik sürdürülebilirliğin tanımı yapılmış ve bu amaçla geliştirilen stratejiler ele alınmıştır. Ayrıca, bu sürdürülebilirlik stratejilerinin Türkiye'deki otomotiv üretici firmaları tarafından nasıl uygulandığı incelenmiştir. Otomotiv üreticilerinin bu stratejileri hayata geçirerek çevreye verdikleri zararları ne ölçüde azaltabildikleri, örneklerle açıklanmıştır.

2. Veri ve Çalışma Alanı

2.1 Otomotiv sektöründe sürdürülebilirlik nedir?

Otomotiv sektörü, dünyanın en büyük ve en etkili sektörlerinden biridir. Otomobil ve otomobil parçalarının

tasarımı, geliştirilmesi, üretimi, satışı ve pazarlamasıyla ilgilenen geniş bir şirket yelpazesini kapsar. Bu sektör, dünya ekonomisine önemli katkılar sağlar ve gelir açısından en önemli sektörlerden biridir.

Otomotiv endüstrisi, Avrupa'da Almanya ve Fransa'nın öncülüğünde ortaya çıkmış, ardından Amerika Birleşik Devletleri'nde (ABD) gelişip güçlenmiştir. Türkiye'de otomotiv sanayisi, ilk olarak 1954 yılında askeri amaçlı cip ve kamyon üretimi için kurulan Türk Willys Overland Ltd. ile başlamıştır. 1968 ve 1969 yıllarında Bursa Organize Sanayi Bölgesi'nde, her biri yılda 20.000 adet kapasiteli OÜÜ şirketleri kurulmuş ve 1971 yılında üretime başlamışlardır (Katip, Karaer ve Özençin, 2014).

Otomobiller, yaşam döngüleri boyunca çevreyi çeşitli şekillerde etkiler. Bir otomobilin kullanıma hazır hale gelmesi için önce plastik, kauçuk, cam, çelik ve geri dönüştürülmesi veya bertaraf edilmesi zor ve maliyetli olan birçok başka malzeme tüketilir. Öte yandan, yakıt tüketimi, hava kalitesini olumsuz etkileyen ve küresel ısınmayı kötüleştiren hava kirliliğine yol açar. Otomotiv endüstrisinin ekonomik ve çevresel etkileri göz önünde bulundurulduğunda, bu sektörün etkin bir şekilde yönetimi, toplumun refahını sağlamak için hayati hale gelmiştir. Bu endişeler nedeniyle, otomotiv şirketleri, sürdürülebilirlik önlemlerini operasyonlarına entegre etmelerini sağlayan belirli uygulamaları hayata geçirmeye başlamıştır (Masoumi, Kazemi, ve Abdul-Rashid, 2019).



Şekil 1. Tedarik zincirinin genel yapısı.

2.3.2. Tedarik zinciri yönetimi nedir?

Tedarik Zinciri Yönetimi, tedarikçileri, üreticileri, depoları ve müşterileri verimli bir şekilde entegre etmek için kullanılan bir dizi yaklaşımdır. Bu yönetim, ürünlerin doğru miktarlarda, doğru yerlere ve doğru zamanda üretilip dağıtılmasını sağlarken, maliyetleri en aza indirmeyi hedefler (Çağlayan ve Acar, 2018).

2.3.3. Sürdürülebilir tedarik zinciri yönetimi nedir?

Sürdürülebilir tedarik zinciri yönetimi, ekonomik, çevresel ve sosyal faktörlerin yanı sıra işletmeler arası sistemlerin entegrasyonunu; malzeme, bilgi ve sermaye akışını paydaşların ihtiyaçlarına uyumlu şekilde etkin ve verimli bir şekilde yönetmek olarak tanımlanabilir (Çağlayan ve Acar, 2021).

Tedarik zincirinin sürdürülebilir olabilmesi için altı temel prensibe dayanması gerekir. Bu prensipler; Azaltma, Yeniden Kullanım, Geri Dönüşüm, Enerji ve Kaynakların Geri Kazanılması, Yeniden Tasarım ve Yeniden Üretim şeklindedir. Gedik (2021), literatürde yaygın olarak kullanılan bu tanımları çalışmasında ele almış ve detaylı bir şekilde açıklamıştır. Bu tanımlar şu şekildedir:

- a) "**Azaltma:** Atık ve çevresel etkiyi azaltmak için kaynak ve malzeme kullanımını mümkün olduğunca en aza indirilmesi,"
- b) "**Yeniden Kullanım:** Ürünleri veya malzemeleri, atılmadan önce birden fazla kez kullanarak yaşam döngülerinin uzatılması,"

2.2 Ekonomik sürdürülebilirlik nedir?

Ekonomik sürdürülebilirlik, gelecek nesillerin ihtiyaçlarını karşılamak için gerekli olan sınırlı kaynakların korunmasını sağlamak amacıyla gerekli düzenleyici ilkeler olarak ortaya çıkar. Bu, insan toplumları için istenen bir geleceği öngören bir süreçtir; mevcut koşullar ve kaynak kullanımı, doğal biyotik sistemlerin bütünlüğünü, kararlılığını ve güzelliğini tehlikeye atmadan insan ihtiyaçlarını karşılamaya devam eder (Mumcu ve Bakoglu, 2022).

İşletmelerin finansal performansı, çevresel performans tarafından çeşitli şekillerde etkilenir. Çevre yönetimi kapsamında hem tehlikeli hem de tehlikesiz atıkların en aza indirilmesi, doğal kaynakların daha iyi kullanılması, daha yüksek verimlilik ve işletme maliyetlerinin düşürülmesi ile sonuçlanır (Gedik, 2021).

2.3 Ekonomik sürdürülebilirlik ve sürdürülebilir tedarik zinciri

2.3.1 Tedarik zinciri nedir?

Tedarik zinciri genellikle, ham maddelerin nihai ürünlere dönüştürüldüğü ve ardından müşterilere teslim edildiği bütünleşmiş bir üretim süreci olarak tanımlanır (Çağlayan ve Acar, 2018). Tedarik zincirinin genel yapısı Şekil 1' de gösterilmiştir.

- c) "**Geri Dönüşüm:** Yeni ürünlere dönüştürülebilir veya üretim süreçlerinde ham madde olarak kullanılabilir malzemeleri ayrılması ve işlenmesi."
- d) "**Enerji ve Kaynakların Kurtarılması:** Yeniden kullanılmayan veya geri dönüştürülemeyen atık malzemelerden enerji veya diğer değerli kaynakların çıkarılması,"
- e) "**Yeniden Tasarım:** Ürünlerin ve ambalajların çevre dostu olmasını ve geri dönüştürülmesini veya yeniden kullanılmasını kolaylaştıracak şekilde tasarımının gözden geçirilmesi,"
- f) "**Yeniden Üretim:** Kullanılmış ürünleri onarılarak veya yeniden inşa edilerek yeni gibi bir duruma getirilmesi; bu sayede kullanım ömürlerinin uzatılması ve yeni malzemelere olan ihtiyacın azaltılmasıdır."

2.3.4. Sürdürülebilir tedarik zinciri uygulamaları nelerdir?

Sürdürülebilir tedarik zinciri yönetimi uygulamaları dört ana gruba ayrılır: 'Sürdürülebilir Tedarik', 'Sürdürülebilir Dağıtım', 'Sürdürülebilir Üretim' ve 'Tersine Lojistik'. Bunlar;

- a) "**Sürdürülebilir Tedarik:** Çevresel açıdan uyumlu ürünlerin satın alınmasını sağlayan bir satın alma yaklaşımıdır. Bu, yeniden kullanılabilirlik, geri dönüşüm ve toksik olmayan malzemeler gibi istenen ekolojik özelliklerle uyumlu ürünlerin temin edilmesini içerir. Sürdürülebilir tedarik, uygun kaynaklardan hammadde teminini ve tehlikeli maddelerin azaltılmasını hedefleyen atık azaltma uygulamalarını da kapsar (Gedik, 2021)."

- b) **“Sürdürülebilir Dağıtım:** Sürdürülebilir dağıtım, diğer adıyla yeşil dağıtım, firmaların çevreyi gözeterek geliştirdiği ve uyguladığı stratejilerdir. Bu stratejilerde firmalar, taşımada kullanılan araçların yakıt tüketimi, dağıtım kanallarının üretim merkezine uzaklığı ve trafik yoğunluğu gibi faktörleri dikkate alır. Amaç, bu faktörlere en kolay, en ekonomik ve en çevreci çözümleri bulmaktır (Baykal ve Alaoglu, 2023).”
- c) **“Sürdürülebilir Üretim:** Sürdürülebilir üretim, tüm üretim faaliyetlerinin çevre faktörleri dikkate alınarak ve çevreye gerekli duyarlılık gösterilerek gerçekleştirilmesidir. Sürdürülebilir üretimde kullanılan ürünler, geri toplandıktan sonra çeşitli işlemlerden geçirilip pazarda tekrar kullanılabilir hale getirilmesidir (Turhan, Kartum ve Özdemir, 2018). “
- d) **“Tersine Lojistik:** Dağıtım planlaması açısından, kullanılmış ürünün son kullanıcıdan üreticiye doğru fiziksel nakliyesini içerir. Sonraki adım, geri dönmüş ürünün üretici tarafından yeniden kullanılabilir ürün haline dönüştürülmesidir (Karaçay, 2005).”

2.3.5. Sürdürülebilir tedarik zinciri neden önemlidir?

Günümüzün başarılı işletmeleri, tedarik zinciri sağlam temeller üzerine oturtmak için alıcı-tedarikçi ilişkilerine büyük önem vermektedir. Uzun vadede rakiplerinin önüne geçebilmek ve güçlü bir alıcı-tedarikçi ilişkisi kurmak amacıyla sürdürülebilir politikalar izlemektedirler. Sürdürülebilir tedarik zinciri, paydaşların ve müşterilerin ihtiyaçlarını karşılarken çevresel ve ekonomik sürdürülebilirliği gözetir. Aynı zamanda, sermaye, malzeme ve bilgi akışının tedarik zinciri boyunca kesintisiz sürmesini sağlar. Ekonomik sürdürülebilirliği sağlamak için sürdürülebilir tedarik zincirinin temel amacı, faaliyetleri optimize ederek karı maksimize etmektir. Çevresel sürdürülebilirlik açısından ise kaynak kullanımını en aza indirmek ve atık üretimini azaltmaktır (Altuntaş ve Türker, 2012).

Örneğin, otomotiv sektöründe sürdürülebilir tedarik zinciri uygulamaları kritik bir öneme sahiptir. Sürdürülebilir üretim kapsamında, motorlu taşıt üretiminde kullanılan malzemelerin geri dönüştürülebilir ya da yeniden kullanılabilir olmasına özen gösterilmelidir. Aksi takdirde, bu malzemelerin sürekli olarak yeniden tedarik edilmesi gerekecektir. Bu durum, ekonomik sürdürülebilirlik açısından değerlendirildiğinde, üretici firmanın taşımacılık ve lojistik maliyetlerini artırır ve genel ekonomik yükü büyütür. Sürdürülebilir dağıtım açısından ise, malzemelerin sürekli tedariki kara taşımacılığının artmasına, dolayısıyla CO₂ salınımının yükselmesine yol açar. Çevresel sürdürülebilirlik açısından bakıldığında, artan CO₂ salınımı hava kirliliğini artırırken, parçaların ambalajlarından kaynaklanan atıklar da çevresel kirliliği tetikler. Sürdürülebilir bir tedarik zincirinin otomotiv üretim şirketlerine sağladığı katkıları şu şekilde özetleyebiliriz:

- a) **“Maliyetlerin Azaltılması:** Geri dönüşüm, yeniden kullanım için yeniden tasarım, yeniden üretim ve ambalaj atıklarının azaltılması sayesinde maliyetlerin düşürülmesi,
- b) **“Artan Ekonomik Performans:** Çevresel satın alma ve sürdürülebilir ambalajlama yoluyla ekonomik performansın artırılması,
- c) **“Sağlık ve Güvenlik Maliyetlerinde Azalma:** Daha güvenli depolama, taşıma ve üretim süreçlerinin sağlanması sayesinde sağlık ve güvenlik maliyetlerinin azaltılmasıdır (Gedik, 2021).”

2.3.6. Otomotiv endüstrisinde üretici firmanın ekonomik sürdürülebilirlik stratejisi nedir?

a) OÜ 1

OÜ 1 Sürdürülebilirlik Raporu'na (2022) göre, ReCube projesi, geri dönüşüm, yeniden kullanım ve azaltma prensiplerini temel alarak Sürdürülebilirlik Temelli Tasarım ilkesini benimsemektedir. Bu proje, OÜ 1'in sürdürülebilirlik yaklaşımını tüm Ar-Ge faaliyetlerine entegre etmeye devam etmektedir. OÜ 1, ürünleri yeniden üretim yöntemleriyle yenilemeyi, ekonomik ömürlerini uzatmayı ve kaynakların yanı sıra enerjinin korunmasını sağlamayı hedeflemektedir. Sıfırdan üretim yerine yeniden üretim uygulamalarını tercih ederek, sera gazı (GHG) emisyonlarını önemli ölçüde azaltabilmektedir. Ayrıca, yeniden üretim yöntemleriyle daha az atık oluşturarak çevre kirliliğini azaltmayı amaçlamaktadır. Bu yaklaşım, OÜ 1'in net sıfır hedefi doğrultusunda, tedarikçilerin ve üreticilerin dögüsel ekonomiye katılımını teşvik ederken, kullanıcılar daha maliyet etkin ve çevre dostu ürünlerin sunulmasına da katkıda bulunmaktadır (OÜ 1, 2022).

OÜ 1'in Sürdürülebilirlik Raporu'na (2022) göre, yolcu ve ticari araçlarda kullanılan 21 farklı parçanın emisyon tasarrufları, yeniden üretim yöntemi kullanılarak hesaplanmıştır. OÜ 1, sıfırdan üretim yerine yeniden üretim yöntemini tercih ederek sera gazı emisyonunu ciddi ölçüde azaltmaktadır. Yılda 7.104 parçanın yeniden üretim işlemlerini gerçekleştiren OÜ 1, yaklaşık 41 ton sera gazı emisyonunun azalmasını sağlamıştır. Ayrıca, 2022 yılında yeniden üretim yoluyla toplam 39,7 milyon TL tasarruf elde edilmiştir. 2022 yılında yapılan diğer sürdürülebilirlik çalışmaları arasında; radyo/ekran taşıyıcı braketterinde %65 geri dönüştürülmüş plastik kullanımı, kamyon bileşenlerinde biyopolimerlerin kullanımı ve ömrünü tamamlamış araç atıklarından elde edilen geri dönüştürülmüş plastik hammaddelerinin kamyon bileşenlerinde kullanımı gibi önemli adımlar yer almaktadır (OÜ 1, 2022).

2.4. Ekolojik sürdürülebilirlik nedir?

Ekolojik sürdürülebilirlik, işletmelerin çevreye zarar vermeden veya en az seviyede zarar verecek şekilde faaliyet göstermesini ve çevrenin, gelecek nesiller göz önünde bulundurularak korunmasını ifade eder. Ekolojik sürdürülebilirlik için doğal kaynak tüketiminin en aza indirilmesi, üretim girdilerinin ve tüketim malzemelerinin yenilenebilir kaynaklardan sağlanması, atıkların geri dönüşüm oranının artırılması, enerji kaynaklarının korunması ve yenilebilir enerji sistemlerinin tercih edilmesi gibi koşullar sağlanmalıdır (Güner, 2020).

2.5. Otomotiv sektöründe ekolojik sürdürülebilirlik nedir?

Günümüzde işletmelerdeki üretim faaliyetlerinin çevresel etkileri, yaşam döngüsü perspektifinden değerlendirilmektedir. Bu değerlendirme, üretim öncesi, üretim süreci, tüketim öncesi ve tüketim sonrası aşamaları dikkate alınarak yapılmaktadır. Otomotiv endüstrisinde oluşan belirli katı, sıvı ve gaz atıklar nedeniyle, dünya genelindeki otomobil üreticileri, daha az yakıt tüketen, daha az veya hiç emisyon yaymayan, tamamen geri dönüştürülebilir ve tehlikeli maddeler içermeyen araçlar üretmeye çalışmaktadır. Bu rekabet, araçların yaşam döngüleri

boyunca daha çevre dostu hale getirilmesi hedefiyle yönlendirilmektedir (Katip, vd., 2014).

2.5.1. Üretim sırasında ekolojik sürdürülebilirlik

2.5.1.1. Kaynak tüketimi

Otomotiv endüstrisinde, üretim sırasında çeşitli doğal kaynaklar tüketilmektedir. Tüketilen doğal kaynaklardan biri sudur. Küresel otomotiv endüstrisi, çeşitli üretim süreçleri için önemli miktarda su tüketen bir sektördür. Bazı tahminlere göre, tek bir otomobil üretmek için 150 bin litreden fazla su kullanılmaktadır (Öztopçu, 2024).

2.5.1.2. Otomotiv sektöründe doğal kaynak tüketimini azaltma stratejileri

Günümüzde, otomotiv sektöründe üretim sırasında su, üreticiler tarafından yoğun bir şekilde kullanılmakta ve bu da su tüketimini artırmaktadır. Bu nedenle, otomotiv endüstrisi, ekolojik sürdürülebilirliği sağlamak ve su kaynaklarını koruyarak gelecek nesillere daha iyi bir yaşam bırakmak amacıyla su tüketimini azaltmayı öncelikli hedeflerinden biri haline getirmiştir. 2021-2022 Türkiye Otomotiv Ana Sanayi Sürdürülebilirlik Raporu'nda belirtildiği üzere, Türkiye'deki otomotiv üretim şirketleri, üretim sırasındaki su tüketimini azaltmak için çeşitli yöntemler uygulamaktadır. Otomotiv şirketlerinin su tüketimini azaltmak için tercih ettikleri yöntemler şunlardır:

- a) **“Ters Ozmos Yöntemi:** Kirletici parametrelerin basınçlı bir şekilde membranların mikroskobik gözeneklerinden geçmesi sağlanarak arıtımı gerçekleştirilir. Su molekülleri membran gözeneklerinden geçerken, kirletici parametreler bu gözeneklerden geçemezler (Naharçı, 2007).”
- b) **“Kapalı Çevrim Soğutma Kuleleri:** Kapalı çevrim soğutma kuleleri, diğer adıyla kapalı devre soğutma kuleleri, fabrikalar, santraller gibi yerlerde kullanılır. Bu sistemler, temel olarak bir ısı değişim mekanizmasıdır. Sistemdeki fazla ısının dış ortama atılması sağlanır. Su, kapalı bir boru sistemi içinde muhafaza edilir. Böylece su, dış ortamla temas etmediği için hem kirlenmesi önlenir hem de fazla ısı atıldığından suyun

buharlaşması engellenir. Bu sayede hem buharlaşma hem de kirlenme önleildiğinden daha az su harcanır.”

- c) **“Atık Su Arıtımı:** Atıksu arıtımı, çeşitli kullanımlar sonucu oluşan atıksuların deşarj edildikleri alıcı ortamın fiziksel, kimyasal, bakteriyolojik ve ekolojik özelliklerini değiştirmeyecek hale getirmek için uygulanan fiziksel kimyasal ve biyolojik proseslerin birini ya da birkaçını kapsamaktadır (Tesisat, 2024).”
- d) **“Yağmur Suyu Hasadı:** Yağmur sularının yarısı buharlaşır, diğer yarısı ırmaklara ya da yeraltı sularına karışır. Bu yöntem, yağış sularının uygun mevsimlerde toplanıp, gereksinim duyulduğu zamanlarda kullanılmasıdır (Tanık, 2017).”

2.5.1.3. Otomotiv sektöründe su tüketimini azaltmaya yönelik stratejiler

2021 yılında, Otomotiv Sanayii Derneği ve Türkiye'nin ilk Otomotiv Ana Sanayi Sürdürülebilirlik Raporu yayımlandı. Sunulan raporda, Otomotiv Sanayii Derneği'ne üye olan otomotiv şirketleri, su kaynaklarının kullanımında su tasarrufu ve geri kazanım projelerine öncelik vermektedir. Su verimliliği; yatırımlar, iyileştirme faaliyetleri ve boya atölyelerinde ileri teknolojilerin kullanımıyla artırılmakta, ayrıca suyun yeniden kullanımı için projeler geliştirilmektedir (OSD, 2023).

OSD üyesi şirketlerden OÜÜ 1, OÜÜ 2 ve OÜÜ 3'ün araç üretimi sırasında kullandıkları su miktarları, sürdürülebilirlik raporlarında yıllık bazda sunulmuştur. Bu raporlarda, su tasarrufu stratejileri paylaşılmış, elde edilen su tasarrufu oranları ve gelecekteki hedefleri belirtilmiştir.

a) OÜÜ 1

OÜÜ 1, 2021 ve 2022 yıllarına ait Sürdürülebilirlik Raporlarına göre, su tüketimini azaltmak amacıyla Fabrika 1 ve Fabrika 2'de “ters ozmos”, “kapalı çevrim soğutma kuleleri” ve “atık su geri kazanım sistemleri” gibi su yönetim stratejilerini uygulamaktadır.

OÜÜ 1, temiz su kaynağı olarak yeraltı suları ve şebeke suyunu kullanmaktadır. 2022 Sürdürülebilirlik Raporu'na göre, Fabrika 1'de araç başına temiz su kullanımını 2,4 m³/araç iken, Fabrika 2'de ise bu oran 1,8 m³/araçtır. OÜÜ 1' in 2018-2022 yıllarında Türkiye'de araç üretimi sırasında kullandığı temiz su miktarları, yeraltı suyu ve şebeke suyu olmak üzere Tablo 1'de gösterilmiştir.

Tablo 1. OÜÜ 1'in Yıllara Göre Su Kullanım Miktarı (m³)

Su Çekimi (m ³)	2018	2019	2020	2021	2022
Yeraltı suyu miktarı	1.159.612	1.097.981	991.667	1.063.294	1.181.669
Şehir Suyu miktarı	12.545	11.053	6.917	6.595	7.597
Toplam	1.172.157	1.109.034	998.584	1.069.889	1.189.266

OÜÜ 1, ters ozmos gibi ileri su arıtma yöntemleri kullanarak endüstriyel ve evsel atık suları geri kazanmakta, kapalı çevrim soğutma kuleleri ile suyun yeniden kullanımını sağlamaktadır. Bu yöntemler sayesinde, endüstriyel ve evsel atıksuların geri kazanılarak suyun tekrar kullanılması, araç üretimi sırasında kullanılan temiz su miktarını azaltmaktadır. OÜÜ 1, araç üretimi sırasında temiz su tüketimini azaltmak amacıyla, Fabrika 1'de soğutma kuleleri, Fabrika 2'de ters ozmos, Fabrika 3'te ise kapalı çevrim soğutma kuleleri kullanmaktadır (OÜÜ 1, 2022).

OÜÜ 1, Atıksu Geri Kazanım Sistemi ile mevcut arıtma prosesi çıkış suyu, evsel atık sular ve ters yıkama sularını geri kazanarak, bu suları üretim prosesinde yeniden kullanmayı sağlamaktadır. Bu sayede, çekilen su miktarını yaklaşık %40 oranında azaltmayı hedeflemektedir (OÜÜ 1,

2022). Tablo 2'de OÜÜ 1'in 2020-2022 yıllarında Türkiye'deki geri kazanılan su miktarları verilmiştir.

Tablo 2. OÜÜ 1'in Yıllara Göre Geri Kazanılan Su Miktarı (m³).

Geri Kazanılan Su (m ³)	2020	2021	2022
Geri Kazanılan Su Miktarı	113,399	85,395	102,721

Ayrıca, Atıksu Geri Kazanım Sistemi ile 2030 yılına kadar Fabrika 1'de araç başına temiz su kullanımını 2,4 m³'ten 1,44 m³'e, Fabrika 2'de ise 1,8 m³'ten 1,36 m³'e düşürmeyi hedeflemektedir. Böylece, 2030 itibarıyla araç başına çekilen temiz su miktarını %40 oranında azaltmış olacaktır (OÜÜ 1, 2022).

2.5.2. Üretim sonrasında ekolojik sürdürülebilirlik

2.5.2.1. CO₂ emisyonu

Otomotiv endüstrisinin çevresel etkileri yalnızca üretim aşamasıyla sınırlı değildir. Araçlar, üretimden sonra kullanım aşamasında da çevreye olumsuz etkilerde bulunmaktadır. Motorlu taşıtların fosil yakıt kullanımı, CO₂ salınımını artırır ve hava kirliliğinin artmasına neden olur. Türkiye'deki CO₂

emiyonlarının %42'si sanayiden, %20'si ise ulaşımdan kaynaklanmaktadır (Katip, vd., 2014). Ayrıca, motorlu taşıtların toplam hava kirliliğine katkı oranı ABD'de %40, Almanya'da %47 ve İstanbul'da yapılan bir çalışmada %72 olarak belirlenmiştir (Katip, vd., 2014). Tablo 3'te, Türkiye'de 1990-2019 yılları arasında motorlu taşıt sayıları ve CO₂ emisyon değerleri 5 yıllık periyotlar halinde sunulmuştur (Tören ve Mollahasanoglu, 2022).

Tablo 3.Yıllara Göre Türkiye'de Trafikte Bulunan Motorlu Taşıt Sayısı ve CO₂ Emisyonu.

Yıl	Motorlu Araç Sayısı	CO ₂ Emisyonu (milyon ton)
1990	3750678	151,5
1995	5922859	180,9
2000	8320449	229,8
2005	11145826	264,2
2010	15095603	314,4
2015	19994472	381,3
2019	23156975	399,3

Tablo 3'te gösterildiği üzere, ülkemizde ve dünya genelinde motorlu taşıt kullanımı her geçen gün artmaktadır ve bu kullanımı azaltmak zor olabilir. Motorlu taşıtların kullanımı kaynaklı CO₂ salınımı da sürekli artmaktadır. Artan CO₂ salınımı, hem hava kirliliğinin artmasına hem de iklim değişikliğine neden olmaktadır. Bu nedenle, otomotiv endüstrisi ekolojik sürdürülebilirlik çerçevesinde çevreyi korumak için CO₂ emisyonlarını azaltmaya yönelik çeşitli stratejiler geliştirmek zorundadır. Çevre ve hava kirliliğine neden olan zararlı gazları azaltmak için uygulanabilir alternatif yöntemlerden biri, elektrikli ve hibrit araçların yaygın olarak benimsenmesidir (Tören ve Mollahasanoglu, 2022).

a) **“Elektrikli araçlar:** İçten yanmalı motorları yoktur ve elektrik enerjisi ile çalışmaktadırlar. Emisyon olmadığı için çevreye zararları da yoktur. Yakıt maliyetleri düşüktür (Kılınç, 2022).”

b) **“Hibrit Araçlar:** Hibrit elektrikli araçlar ise içten yanmalı motor ile birbirinden bağımsız çalışan elektrik motoru ile harici enerji kaynağından şarj olabilen batarya depolama sistemi içermektedir. Bu araçlar sürüş esnasında; enerji verimliliğini dikkate alarak sadece elektrikli motoru, sadece içten yanmalı motoru veya her ikisini birlikte kullanabilir. Böylece, yakıt tüketimi ve ekonomik olarak avantaj sağlanır. Hatta bazı araçlarda, rejeneratif fren aracılığıyla elektrik üretilerek batarya şarj edilebilmektedir. Ayrıca, hibrit araçların, çok düşük sera gazı salınımı ile çevre dostu araçlardır (Tören ve Mollahasanoglu, 2022).”

Elektrikli ve hibrit araçlar için CO₂ emisyon değerleri Tablo 4'te gösterilmiştir (Tören ve Mollahasanoglu, 2022). Tablo 4'teki verilere göre, en düşük CO₂ emisyonuna sahip olan üç araç tipi elektrikli, hibrid ve plug-in hibridir.

Tablo 4. Motorlu Taşıtların Yakıt Tiplerine Göre CO₂ Emisyon Miktarları

Yakıt Tipi	CO ₂ Emisyon Miktarı (g/km)
Benzin	174,31
Dizel	168,43
LPG	198,28
Hibrid	119,52
Plug-in Hibrid	71,00
Elektrik	0

2.5.2.2. Otomotiv sektöründe CO₂ emisyonu azaltma stratejileri

a) OÜÜ 2

OÜÜ 2'nin erişilebilir düşük karbonlu araçlar üretme vizyonu, 1997 yılında ilk seri üretilen hibrit elektrikli aracın tanıtımıyla başladı. OÜÜ 2 ürün yelpazelerine plug-in hibrit elektrikli araçlar ve daha fazla bataryalı elektrikli araç (BEV) ekledi. Bugüne kadar, dünya çapında 27 milyondan fazla elektrikli araç ve Avrupa'da beş milyondan fazla elektrikli araç satarak 176 milyon tondan fazla CO₂ azaltımına katkıda bulunmuştur (OÜÜ 2 Europe, 2024).

b) OÜÜ 3

Otomotiv üreticilerinden biri olan OÜÜ 3, motorlu taşıtlarının kullanımından kaynaklanan CO₂ emisyonunu azaltmak için stratejiler geliştirmektedir. OÜÜ 3, bu amaçla hem elektrikli ve hibrit araçlara geçişi teşvik etmekte hem de elektrikli araç portföyünü tamamlamak için düşük emisyonlu motorlar (E-

TECH Hibrid ve gaz motorları) geliştirmektedir.

OÜÜ 3 tarafından özel olarak geliştirilen E-TECH Hibrid, hibrit motorun yakıt tüketimini, eşdeğer bir içten yanmalı motora göre %40 oranında azaltmaktadır. E-TECH Plug-in Hibrid versiyonu ise sıfır emisyonlu mobilite çözümü sunmaktadır. Ayrıca OÜÜ 3, benzinle karşılaştırıldığında daha az CO₂ üreten doğal gaz (NGV) ve sıvılaştırılmış petrol gazı (LPG) gibi alternatif yakıtlar kullanan gazla çalışan araçlar da sunmaktadır. Bu araçların emisyonları, bazı ülkelerde atıkların dönüştürülmesi için yeni karbonsuzlaştırma yöntemleri uygulandığında %30'dan %100'e kadar daha fazla azaltılabilmektedir. OÜÜ 3, CO₂ emisyonlarını azaltmak amacıyla çeşitli modeller sunmakta ve hibrit ile plug-in hibrit teknolojilerine de yer vermektedir (OÜÜ 3, 2021).

2.5.3. Kullanım ömrünü tamamlayan araçlar ve ekolojik sürdürülebilirlik

2.5.3.1. Ömrünü tamamlamış araç (ÖTA) nedir?

Kullanım ömrünün sonuna gelmiş veya bir kaza sonucu ciddi hasar görmüş, onarılamaz veya güvenli kullanımı mümkün olmayan araçları ifade eder (TÜDAM, 2022).

Çevre ve Orman Bakanlığı tarafından 30 Aralık 2009 tarihinde Resmî Gazete No. 27448'de yayımlanan "Ömrünü Tamamlamış Araçların Kontrolü Yönetmeliği," Ocak 2011 itibarıyla yürürlüğe girmiştir. Bu yönetmelik, üç tekerlekli araçlar hariç olmak üzere otomobiller, hafif ticari araçlar, motosikletler ve motorlu bisikletleri kapsamaktadır. Yönetmelik, bu kategorilerdeki ömrünü tamamlamış araçlar (ÖTA) ile bunların bileşenlerine, parçalarına ve malzemelerine uygulanır. ÖTA ve parçalarının yeniden kullanımı, geri dönüşümü ve geri kazanımı yoluyla bertaraf edilecek atık miktarını azaltmayı amaçlayan yönetmelik, ÖTA toplama noktalarını, geçici depolama alanlarını ve işleme tesislerini içeren bir süreç öngörmektedir (OÜÜ 3, 2017).

2.5.3.2. ÖTA Sürecinde Ekolojik Sürdürülebilirlik ve Geri Kazanım Yöntemleri

Otomotiv sektöründe ekolojik sürdürülebilirliğin son aşaması, kullanım ömrünü tamamlayan araçların yönetimidir. Bu araçların parça ve malzemelerinin yeniden kullanımı, geri dönüşümü ve geri kazanımı hem ekonomik hem de ekolojik sürdürülebilirlik açısından önemli bir faktördür. Türkiye Çevre ve Şehircilik Bakanlığı tarafından yayınlanan bir rapora göre, ömrünü tamamlamış bir aracın %85'inin yeniden kullanılabilir, geri kazanılabilir ve geri dönüştürülebilir parça ve malzemelerden oluştuğu bilinmektedir (Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, 2022).

Üreticiler geri dönüştürülebilir veya yeniden kullanılabilir malzeme ya da parça kullanarak sürekli olarak üretim için parça ve malzeme tedarik etme gereksinimini ortadan kaldıracaktır. Bu sayede, sürekli malzeme veya parça tedarik edilmesine gerek kalmaz ve ekstra maliyet oluşmaz. Bu durum da finansal kazanç sağlar. Örneğin, kullanım ömrünü tamamlamış araçlardaki parçaların veya malzemelerin geri dönüştürülebilir ya da yeniden kullanılabilir olmasının ekonomik etkisi açıkça görülmektedir. Ömrünü tamamlamış araçların parçaları genellikle kurşun, kadmiyum, hegzavalent krom ve civa gibi tehlikeli maddeler içerir. Bu malzeme veya parçaların sökülme, parçalama, yakma ya da kimyasal işleme sırasında kurşun, kadmiyum ve civa gibi toksik metaller salınabilir. Bu toksik maddeler, çevre kirliliğine ve sağlık sorunlarına yol açar (Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, 2022). Ömrünü tamamlamış araçların ekolojik etkisi, tehlikeli atıkların çevreye verdiği zarardır. Bu nedenle, otomotiv firmaları, tehlikeli atıkların çevreye etkisini azaltmak amacıyla atık yönetimi ve geri dönüşüm süreçleri geliştirmiştir.

Bir araç, yaklaşık %75 oranında demirli ve demirsiz metallerden oluşur. Kalan %25'lik kısmı ise lastikler, sıvılar ve diğer malzemelerden meydana gelir. Araçlar, kullanım ömürlerini tamamladığında veya hurdaya çıkarıldığında cam, metal, plastik, kumaş ve kauçuk gibi çeşitli atıkları barındırırlar. Ayrıca, kullanılmış yağ, antifriz, yağlayıcılar, benzin veya dizel gibi sıvılar da içerirler. Bir aracın parçalarını ve bileşenlerini anlamak, onun güvenli ve verimli bir şekilde geri kazanılabilmesi için kritik öneme sahiptir. Araçların doğru şekilde işlenmesi, geri kazanım değerini en

üst düzeye çıkarır (U.S. Environmental Protection Agency, 2020).

Amerika Birleşik Devletleri Çevre Koruma Ajansı'na [EPA], (U.S. Environmental Protection Agency 2020) göre, kullanım ömrünü tamamlamış bir aracın geri kazanım süreci 6 aşamada gruplandırılabilir. Bu aşamalar aşağıdaki gibidir:

1. **“Ömrünü tamamlamış aracın kabulü ve depolanması:** Aracı kabul ederken, araçta herhangi bir sızıntı olup olmadığı kontrol edilir. Depolama süresinin uzamaması ve çevre kirliliğinin en aza indirilmesi için en kısa sürede parçalama işlemine başlanmalıdır.”
2. **“Tehlikeli Maddelerin Çıkarılması:** Yakıt depoları, şanzıman, radyatör ve direksiyon güç üniteleri gibi tehlikeli sıvılarla (antifriz, fren sıvısı, motor yağı vb.) birlikte sıvı sızıntısı olan tüm parçaların boşaltılmalıdır.”
3. **“Kullanılabilir veya Geri Dönüştürülebilir Parçalar İçin Araçların Sökülmesi:** Tüm tehlikeli bileşenler çıkarıldıktan sonra, kullanılabilir veya geri dönüştürülebilir tüm parçaları belirlenir ve çıkarılır. Kullanım ömrünü tamamlamış araçtan, birçok motor bileşeni ve gövde parçası kurtarılabilir, yenilenebilir ve otomobil tamir atölyelerine ya da araç restorasyon projeleri yürüten kişilere satılabilir. “
4. **“Araç Gövdelerinin Depolanması:** Tehlikeli maddeler ve kullanılabilir ya da geri dönüştürülebilir parçalar tamamen çıkarıldıktan sonra, hurdaya çıkarılan araçlara genellikle "enkaz" denir. Depolama işlemi, araçtan tüm tehlikeli maddeler ve yeniden kullanılabilir veya geri dönüştürülebilir parçalar çıkarıldıktan sonra yapılmalıdır. Herhangi bir döküntü ve sızıntı varsa temizlenmelidir. Bu aşamalar tamamlandıktan sonra araç enkazı depolanmalıdır.”
5. **“Tehlikeli Sıvı ve Maddelerin Depolanması:** Tehlikeli sıvılar ve diğer tehlikeli maddeler, sızdırmaz kaplarda depolanmalı ve uygun şekilde ayrılmalıdır. Kaplar dolduğunda, tehlikeli maddeler uygun bir tehlikeli atık bertaraf tesisine gönderilmelidir. Hurdaya çıkarılan araçlardaki tehlikeli maddeler ve sıvılar kesinlikle çevreye bırakılmamalı veya belediye atık sahalarına gönderilmemelidir.”
6. **“Araç Gövdelerinin Ezilmesi:** Ezme işlemi, enkazın düzleştirilmesi veya dikdörtgen bir küp şeklinde sıkıştırılması anlamına gelir. Tüm kullanılabilir parçalar ve tehlikeli maddeler çıkarıldıktan sonra, araç enkazı nakliye için hacmini azaltmak amacıyla ezilir. Ezme işlemleri sonucunda ortaya çıkan tüm sıvılar toplanmalı ve tehlikeli atık olarak bertaraf edilmelidir. Ezme işlemi tamamlandıktan sonra kalıntılar atık sahasına gönderilmelidir (U.S. Environmental Protection Agency, 2020).”

2.5.3.3. Otomotiv Sektöründe Atık Yönetimi ve Geri Dönüşüm Stratejileri

a) OÜÜ 1

OÜÜ 1'in, ömrünü tamamlamış araçlar (ÖTA) için geri alım tesisleri bulunmaktadır. Bu tesisler için Beker Recycle firması ile iş birliği yapılmaktadır. Beker Recycle, yönetmelik hükümleri çerçevesinde, ÖTA'lar ile ilgili olarak toplama, sökme, parçalama, işleme, yeniden kullanım, geri kazanım ve geri dönüşüm işlemlerini, ilgili yasal mevzuatta belirlenen oran ve usullerle gerçekleştirmeyi kabul ve taahhüt etmektedir (OÜÜ 1, 2024).

Kullanım ömrünü tamamlamış araçlardan kaynaklanan atık maddelerin ayrıştırılması ve tehlikeli maddelerin bertaraf edilmesi, çevreye olumsuz etkileri önlemek için büyük önem

taşı ve bu konuda otomotiv sektörüne önemli sorumluluklar düşmektedir. Bu amaçla, otomotiv üretici firmalarının atık yönetimi uygulamaları bulunmaktadır.

OÜÜ 1'in atık yönetimi kapsamında, atıkların kaynağında azaltılması, kaynakların daha verimli kullanılması ve döngüsel ekonomi çerçevesinde atıkların yeniden kullanılması için çalışmalar yürütülmektedir. Ayrıca, alternatif hammadde kullanımları araştırılmakta ve düzenli depolama sahasına giden atıkların azaltılması hedeflenmektedir (OÜÜ 1, 2022).

Tablo 5. OÜÜ 1'in Toplam Atık Miktarı (Ton) ve Araç Başına Düşen Atık Miktarı(kg).

Atık Miktarı	2020	2021	2022
Geri Kazanılan Tehlikeli Atık (Ton)	6,966.3	8,786.188	9,678.689
Araç Başına Geri Kazanılan Tehlikeli Atık (kg)	21.2	25.3	20.8
Geri Kazanılan Tehlikesiz Atık (Ton)	77,733.3	87,756.07	91,593.812
Araç Başına Geri Kazanılan Tehlikesiz Atık (kg)	236	252	196
Bertaraf Edilen Tehlikeli Atık (Ton)	49.3	32.48	24.193
Araç Başına Bertaraf Edilen Tehlikeli Atık (kg)	0.15	0.0933	0.0519
Bertaraf Edilen Tehlikesiz Atık (Ton)	127.2	0	0.097
Araç Başına Bertaraf Edilen Tehlikesiz Atık (kg)	0.387	0	0.000208

Ek olarak, atık yönetimi kapsamında firmanın, 2030 yılına kadar düzenli depolama tesislerine gönderilen atıkların sıfırlanmasını ve fabrikalarında üretilen araçlardaki plastik kullanımında geri dönüştürülmüş ve yenilenebilir plastik oranını %30'a çıkarmayı hedeflediği belirtilmiştir.

a) OÜÜ 2

OÜÜ 2, atık yönetimi konusunda çalışmalar yürüten otomotiv üreticilerinden biridir. Ömrünü tamamlamış araçlar için OÜÜ 2'nin Türkiye genelinde ÖTA teslim noktaları bulunmaktadır (OÜÜ 2 Türkiye, 2024).

OÜÜ 2, 2050 Çevre Vizyon Planı kapsamında, süreçlerde oluşan atıkları en aza indirmeyi hedeflemektedir. Bu doğrultuda "Azaltma", "Yeniden Kullanım" ve "Geri Dönüşüm" prensiplerini uygulayarak, 2007'den bu yana sıfır

Örneğin, 2022 yılında OÜÜ 1, atıkların yeniden kullanılması kapsamında radyo/ekran taşıyıcı braketlerde %65 geri dönüştürülmüş plastik kullanmış ve ömrünü tamamlamış araçlardan elde edilen geri dönüştürülmüş plastik ham maddeyi kamyon bileşenlerinde kullanmıştır (OÜÜ 1,2022). OÜÜ 1 firmasında, 2020 yılında 327.936 adet, 2021 yılında 348.029 adet ve 2022 yılında ise 465.855 adet motorlu taşıt üretilmiştir (OÜÜ 1 Faaliyet Raporu 2020, 2021, 2022). Atık yönetimi kapsamında, 2020-2022 yılları arasında bertaraf edilen, geri dönüştürülen toplam ve araç başına düşen tehlikeli ve tehlikesiz atık miktarları aşağıdaki Tablo 5'te gösterilmiştir.

doğrudan çöp atığı hedefine ulaşmıştır (OÜÜ 2, 2021). OÜÜ 2'nin 2021 Sürdürülebilirlik Raporu'na göre, atık azaltma ve geri dönüşüm süreçleri için gerekli çalışmaları yaparak 2026 yılı sonuna kadar toplam atık miktarını %14 oranında azaltmayı hedeflemektedir. Ayrıca, hammadde girdisi olarak dönüştürülen atık miktarını ve üretilen ürünlerin geri kazanımını değerlendirerek, atık yönetimini sürdürülebilir bir şekilde yürütmektedir (OÜÜ 2, 2021). 2019-2021 yıllarına ait hammadde girdisi olarak dönüştürülen atık miktarı ve üretilen ürünlerin geri kazanımlarına ilişkin veriler Tablo 6'da gösterilmektedir.

OÜÜ 2'nin yıl bazında üretim kapasitesine dair net veriler bulunmamakla birlikte, yıllık ortalama üretim kapasitesi 280.000 adet motorlu taşıttır. 2019-2021 yıllarına ait toplam tehlikeli ve tehlikesiz atık miktarları ile araç başına düşen ortalama değerler Tablo 7'de sunulmaktadır (OÜÜ 2, 2021).

Tablo 6. OÜÜ 2'nin Atık Yönetimi: Geri Dönüştürülen Atık ve Geri Kazanım Miktarları.

Hammadde Girdisi Olarak Dönüştürülen Atık Miktarı (kg)	2019	2020	2021
Plastik Atık Geri Dönüşümü	128.424	87.680	129.562
Üretilen ürünlerin geri kazanımı/döngüsellik (Set)	2019	2020	2021
Koltuk ve Kapı Seti	248.976	225.255	222.347

Tablo 7. OÜÜ 2'nin Toplam Atık Miktarı ve Araç Başına Düşen Ortalama Atık Miktarı (kg).

Atık Miktarı (kg)	2019	2020	2021
Tehlikeli Atık (kg)	293.251	246.165	262.817
Araç Başına Düşen Ortalama Tehlikeli Atık (kg/araç)	1,05	0,88	0,94
Tehlikeli Olmayan Atık (kg)	2.716.820	2.098.410	2.088.252
Araç Başına Düşen Ortalama Tehlikeli Olmayan Atık (kg/araç)	9,7	7,49	7,45

3. Sonuç ve Öneriler

Ekonomik sürdürülebilirlik, tüketimi en aza indirerek çevreye verilen zararı önlemeyi amaçlamaktadır. Bu doğrultuda, otomotiv sektöründeki sürdürülebilir tedarik zinciri yöntemleri incelenmiş; bu yöntemlerin tanımı, uygulamaları ve sonuçlarının önemi vurgulanmıştır. Makalede ele alınan sürdürülebilir tedarik zinciri uygulamalarının, motorlu taşıt üreten firmalar için hem ekolojik hem de ekonomik sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmada önemli bir kilometre taşı olduğunu görülmektedir. Sürdürülebilir tedarik, dağıtım, üretim ve tersine lojistikten oluşan temel uygulamalar, üretici firmaların üretim

süreçlerini daha çevre dostu hale getirirken uzun vadede ekonomik sürdürülebilirlik sağlamaktadır. Örneğin, OÜÜ 1 gibi firmaların geri dönüştürülebilir malzeme kullanımı ve sıfırdan üretim yerine yeniden üretim yöntemlerini benimsemesi, ekonomik açıdan önemli tasarruflar elde etmelerine olanak tanımaktadır.

Ayrıca, sürdürülebilir tedarik zinciri uygulamaları, firmalar için yalnızca çevresel sorumluluklarını yerine getirmekle kalmayıp, aynı zamanda rekabet avantajı sağlama açısından da önemli bir unsur olarak öne çıkmaktadır. Yeniden kullanım ve geri dönüşüm gibi yöntemlerin tercih edilmesi, maliyetlerin azalmasını ve dolayısıyla ekonomik

performansın artmasını sağlamaktadır. Güvenli depolama ve taşıma gibi uygulamalar ise sağlık ve güvenlik faaliyetlerinin maliyetlerini düşürmeye katkıda bulunmaktadır.

Gelecek araştırmalarda, sürdürülebilir tedarik zinciri uygulamalarının uzun vadeli etkilerine ve geniş kapsamlı uygulamalara odaklanılabilir. Ayrıca, bu yöntemi teşvik eden yenilikçi teknolojilerin ve düzenlenmelerin detaylı bir şekilde incelenebilir.

Otomotiv endüstrisinde doğal kaynak tüketimini azaltma yöntemleri, ekolojik sürdürülebilirlik hedeflerinin gerçekleştirilmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Su tüketimi, bu hedeflerin merkezinde yer almakta ve otomotiv üretici firmaları için ekolojik açıdan öncelikli bir konu haline gelmiştir. Tercih edilen yöntemler arasında ters ozmos, kapalı çevrim soğutma kuleleri ve atık su geri kazanımı yer almakta olup, bu yöntemler suyun daha verimli kullanılmasını sağlamakta ve doğal kaynakların korunmasına katkıda bulunmaktadır.

İlerideki çalışmalarda, su tüketimini önlemeye yönelik yeni malzeme ve teknolojilerin araştırılması önem arz etmektedir. Bu bağlamda, su kullanılmayan ya da daha az suya ihtiyaç duyan üretim süreçleri üzerine odaklanılabilir.

Otomotiv sektörünün çevresel etkilerini yalnızca üretim aşamasıyla sınırlamak doğru değildir; araçların kullanım sürecinde de çevreye olumsuz etkiler ortaya çıkmaktadır. Motorlu taşıtların yakıt tiplerinden kaynaklı artan CO₂ emisyonu, hava kalitesini olumsuz yönde etkileyerek çevresel sorunların artmasına yol açmaktadır. Türkiye'deki CO₂ emisyonunun büyük bir bölümü sanayi ve ulaşım kaynaklıdır. Bu durum göz önünde bulundurulduğunda, otomotiv sektörünün bu konuda üstlenmesi gereken sorumluluklar daha net bir şekilde anlaşılmaktadır.

Otomotiv endüstrisi, ekolojik sürdürülebilirlik hedefleri doğrultusunda CO₂ emisyonunu azaltmak için stratejiler geliştirmek zorundadır. Bu stratejiler arasında en etkili yöntemlerden biri, otomotiv üretici firmalarının elektrikli ve hibrit araçlara odaklanmasıdır. OÜÜ 2 ve OÜÜ 3 gibi önde gelen otomotiv üreticilerinin elektrikli ve hibrit araç üretimi konusundaki başarılı çalışmaları, CO₂ emisyonunu azaltmaya yönelik önemli örnekler sunmaktadır. OÜÜ 3'ün geliştirdiği düşük emisyonlu motorlar ve alternatif yakıt kullanımıyla sağlanan CO₂ emisyonu düşüşü, otomotiv sektöründe ekolojik sürdürülebilirlik hedefleri açısından kritik bir rol oynamaktadır. Bunun yanı sıra, OÜÜ 2'nin 27 milyondan fazla elektrikli araç satışı sayesinde elde edilen CO₂ emisyon azalımı, sektörün bu alandaki potansiyelini ortaya koymaktadır.

Gelecek araştırmalarda, elektrikli ve hibrit araçların şarj altyapısı üzerindeki etkileri ile maliyet gereksinimleri üzerine odaklanılabilir. Ayrıca, bu araçların kullanımını teşvik eden politikaların geliştirilmesi ve tüketicilerin elektrikli ve hibrit araçlar konusunda bilinçlendirilmesi de önemli bir konu olarak ele alınabilir.

Ekolojik sürdürülebilirliğin sağlanabilmesi için otomotiv sektörünün dikkate alması gereken son aşama, kullanım ömrünü tamamlamış araçlar (ÖTA) yönetimi ve geri dönüşüm süreçleridir. ÖTA'ların çevreye olan olumsuz etkileri, doğru yöntemlerin uygulanmasıyla en aza indirilmektedir. Bu doğrultuda, Türkiye'de yürürlükte olan 'Ömrünü Tamamlamış Araçların Kontrolü Yönetmeliği' ile ÖTA süreçlerinin sistematik bir şekilde ilerlemesi sağlanmaktadır. Yönetmelik, ömrünü tamamlamış araçların

parçaları ve malzemeleri için yeniden kullanım ve geri dönüşüm süreçlerini teşvik etmektedir.

Araştırmalar, kullanım ömrünü tamamlamış araçların %85'inin geri dönüştürülebilir ve yeniden kullanılabilir parça veya malzemelerden oluştuğunu ortaya koymaktadır. Bu durum, otomotiv sektöründeki üretici firmalara hem ekonomik kazanç sağlamakta hem de çevreye verilen zararı azaltmaktadır. Ayrıca, ÖTA'lardan kaynaklanan tehlikeli atıkların doğru bir şekilde bertaraf edilmesi, çevre kirliliğinin önlenmesi ve insan sağlığının korunması açısından büyük önem taşımaktadır.

Gelecek araştırmalarda, ÖTA'ların neden olduğu tehlikeli atıkların güvenli bir şekilde bertaraf edilmesine yönelik yeni yöntemlerin geliştirilmesi üzerine odaklanılabilir. Bu yöntemlerin hem çevreye hem insan sağlığına zarar vermemesi, ekolojik sürdürülebilirlik için kritik bir öneme sahiptir. ÖTA'lardan kaynaklanan atık miktarını azaltmak için otomotiv firmalarının atık yönetimi süreçlerini iyileştirmesi ve daha sürdürülebilir uygulamalar geliştirmesi üzerinde çalışılabilir.

Makale araştırma ve yayın etiğine uygun olarak hazırlanmıştır.

4. Kaynaklar

- Altuntaş, C., & Türker, D. (2012). Sürdürülebilir tedarik zincirleri: sürdürülebilirlik raporlarının içerik analizi. *Dokuz Eylül Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 14(3), 39-64.
- Baykal, B., & Alaoglu, H. (2023). Green marketing and green consumer perceptions. In *Conference: International IZMIR Congress on Humanities and Social Sciences* (pp. 47-53).
- Çağlayan, V (2018, September) and Acar, Ö. E. (2018). Sürdürülebilir tedarik zinciri uygulamalarının işletme performansına Etkisi: Otomotiv sektörü uygulaması. *Business and Organization Research (International Conference)*. p.786
- Çağlayan, V. (2021) and Acar, Ö.E (2021). Sürdürülebilir tedarik zinciri uygulamaları ve dış kaynak kullanımının işletme performansına etkisi: Otomotiv sektöründe bir araştırma. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 18, 410. DOI:10.33437/ksusbd.613616
- Gedik, Y. (2021). Sürdürülebilirlik tedarik zinciri yönetimi ve sürdürülebilirliğin tedarik zinciri üzerindeki etkileri: Kavramsal bir değerlendirme. *Uluslararası Yönetim İktisat ve İşletme Dergisi*, 17, 840-845. <http://dx.doi.org/10.17130/ijmeh.780246>
- Güner, U. (2020). *Çevresel sürdürülebilirlik (E-kitap)* (Sürüm 1.0.1). Trakya Üniversitesi Fen Fakültesi. https://books.google.at/books?id=q9rNDwAAQBAJ&printsec=frontcover&hl=tr&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false
- İnc. Türkiye. Öztopçu, K. (2024, Nisan). 2025'e kadar dünya nüfusunun üçte ikisi su sıkıntısı çeken ülkelerde yaşayacak. Peki otomotiv sektörü bununla nasıl mücadele ediyor? <https://incturkiye.com/makaleler/suyun->

- [surdurulebilirliginin-onemi-ve-gelecegimiz](https://webdosya.csb.gov.tr/db/tucev/icerikler/omrunu-tamamlam-s-araclar-20220419124418.pdf).Erişim Tarihi: 31.07.2024
- Karaçay, A. G. (2005). Tersine Lojistik: Kavram ve İşleyiş. *Çukurova Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 14(1), 317-332.
- Katip A. & Karaer F. & Özengin N. (2014). Otomotiv sektörünün çevresel açıdan değerlendirilmesi. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 19, 52,55.
- Kılıncı, T. (2022, Eylül 29-30). Elektrikli araçlar ve şarj istasyonlarında yangın güvenliği. *Uluslararası Katılımlı Yangın Sempozyumu*, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi.
- Masoumi S.M. & Kazemi N. & Abdul-Rashid S. H. (2019). Sustainable supply chain management in the automotive industry: A process-oriented review. *Sustainability*, 11, doi:10.3390/su11143945
- Mumcu, A. Y. (2022) and Bakoglu, R. (2022). Otomotiv sektöründe kurumsal sürdürülebilirlik uygulamalarının eşbenzeşmesi üzerine bir Araştırma: BMW, Toyota, Ford
- Naharcı, B. (2007). Ters ozmos yöntemi ile içme suyu elde edilmesinin araştırılması (Yüksek Lisans Tezi). T.C. Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa.
- OSD (2023). Türkiye Otomotiv Ana Sanayi Sürdürülebilirlik Raporu 2021-2022. https://www.osd.org.tr/saved-files/PDF/2023/04/04/OSD_SR-2021-2022.pdf Erişim tarihi: 03.07.2024
- OÜÜ 1 (2022). 2022 Sürdürülebilirlik Raporu. [OÜÜ 1 2022 Sürdürülebilirlik Raporu](https://www.ouu1.org.tr/sustainability-report-2022)Erişim tarihi: 01.07.2024
- OÜÜ 1 (2024). *Ömrünü Tamamlamış Araçlar*. [OÜÜ 1 2024 Ömrünü Tamamlamış Araçlar](https://www.ouu1.org.tr/omrunu-tamamlamis-araclar)Erişim tarihi: 21.07.2024
- OÜÜ 1. (2020). 2020 Faaliyet Raporu. [OÜÜ 1 2020 Faaliyet Raporu](https://www.ouu1.org.tr/2020-activity-report) Erişim tarihi: 22.10.2024
- OÜÜ 1. (2021). 2021 Faaliyet Raporu. [OÜÜ 1 2021 Faaliyet Raporu](https://www.ouu1.org.tr/2021-activity-report) Erişim tarihi: 22.10.2024
- OÜÜ 1. (2022). 2022 Faaliyet Raporu. [OÜÜ 1 2022 Faaliyet Raporu](https://www.ouu1.org.tr/2022-activity-report) Erişim tarihi: 22.10.2024
- OÜÜ 2 (2021). OÜÜ 2 2021 Sürdürülebilirlik Raporu. [OÜÜ 2 2021 Sürdürülebilirlik Raporu](https://www.ouu2.org.tr/2021-sustainability-report) Erişim tarihi: 04.07.2024
- OÜÜ 2 Europe (2024). *Electrification*. [OÜÜ 2 Europe Electrification](https://www.ouu2.org/europe-electrification)Erişim tarihi: 20.07.2024
- OÜÜ 2 Türkiye (2024). *Ömrünü Tamamlamış Araçlar*. [OÜÜ 2 Ömrünü Tamamlamış Araçlar](https://www.ouu2.org/omrunu-tamamlamis-araclar) Erişim tarihi: 12.09.2024
- OÜÜ 3 (2017). *Çevre: Ömrünü Tamamlamış Araçlar*. [OÜÜ 3 Ömrünü Tamamlamış Araçlar](https://www.ouu3.org/3-omrunu-tamamlamis-araclar) Erişim tarihi: 21.07.2024
- OÜÜ 3 (2021). Climate Report: On The Road to Carbon Neutrality. [OÜÜ 3 Climate Report](https://www.ouu3.org/climate-report)
- T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı (2022). *Ömrünü Tamamlamış Araçlar (ÖTA)*.
- <https://webdosya.csb.gov.tr/db/tucev/icerikler/omrunu-tamamlam-s-araclar-20220419124418.pdf> Erişim tarihi: 21.07.2024
- Tanık A. (2017). Yağmur Suyu Toplama, Biriktirme ve Geri Kullanımı, *Su Kaynakları ve Kentler Konferansı*, 25-27 Ekim 2017, Kahramanmaraş, s.2-10.
- Tesisat Mühendisliği Dergisi. (2024). *Tesisat Mühendisliği* (Sayı 4). TMMOB Makina Mühendisleri Odası. <https://www.mmo.org.tr/tesisat-muhendisligi-dergisi/tesisat-muhendisligi-4> Erişim Tarihi: 23.09.2024.
- Tören, M. (2022) and Mollahasanoğlu, H. (2022). Elektrikli ve hibrit araçlardaki elektrik motorlarının incelenmesi ve CO₂ emisyonunda meydana getireceği değişimin tahmini: Türkiye örnekleme. *El-Cezeri Journal of Science and Engineering*, 3,1083,1090.
- TÜDAM (2022). *Ömrünü Tamamlamış Araç Nedir? ÖTA İşleme Nasıl Yapılır?* <https://tudam.org.tr/tr/blog/36/omrunu-tamamlamis-araclar-ota-nedir-ota-isleme-nasil-yapilir.html> Erişim tarihi: 21.07.2024
- Turhan, E., Kartum, G., & Özdemir, Y. (2018). Sürdürülebilir Üretim ve İşletme Uygulamaları. *Bucak İşletme Fakültesi Dergisi*, 1(1), 1-15.
- U.S. Environmental Protection Agency (2020). *Processing End-of-Life Vehicles: A Guide for Environmental Protection, Safety and Profit in the United States-Mexico Border Area*. https://www.epa.gov/sites/default/files/2020/10/documents/eol_vehicle_guide_final_english.pdf Erişim tarihi: 12.09.2024
- United Nations. Sustainability. <https://www.un.org/en/academic-impact/sustainability>. Erişim tarihi: 13.06.2024

ARAŞTIRMA MAKALESİ

Türkiye’de Yeraltı Suyu Kullanımları ve Tahsislerinin Sürdürülebilirlik Anlayışı ile Değerlendirilmesi: Yeşilirmak Havzası Örneği

Yazışma yazarı:
Selim ARMUT,
selimarmut05@gmail.com

Selim ARMUT¹

¹Amasya Merzifon Belediyesi, Merzifon, Amasya, Türkiye. ORCID:0000-0001-6506-8960

Referans:

Armut, S. (2024). Türkiye’de Yeraltı Suyu Kullanımları ve Tahsislerinin Sürdürülebilirlik Anlayışı ile Değerlendirilmesi: Yeşilirmak Havzası Örneği, *Çevre, İklim ve Sürdürülebilirlik*, 25(2) 97–110.

Makale Gönderimi: 15 EKİM 2024
Online Kabul : 30 ARALIK 2024
Online Basım : 31 ARALIK 2024

Özet Yeraltı su kaynakları içme kullanma, tarımsal, endüstriyel gibi kullanımlarda değerlendirilmektedir. Ancak kaynağın sürdürülebilir tahsisinde bazı hususların dikkate alınmasını gerektirmektedir. Çalışmada yeraltı su kaynağı üzerinde baskı oluşturan sorunlara değinilerek, Türkiye’de yeraltı suyu kullanımları ve tahsislerinin Yeşilirmak Havzası özelinde değerlendirilip sorunlar ve çözüm önerileri geliştirilmiştir. Türkiye’de havza bazında tüm yeraltı su kullanımlarının miktar ve kalite yönünden izlenmesi, tahsislerin yeraltı suyunun sürdürülebilir yönetimi esas alınarak dinamik bir şekilde yapılması gerektiği; koruma tedbirlerinin maliyetlerinin karşılanmasında ücretlendirme veya vergi uygulaması getirilerek, gelirlerin bu amaç dışında kullanılmamasını düzenleyici önlemlerin alınması gereği açıkça görülmektedir. Sürdürülebilir yeraltı suyu yönetimine ilişkin düzenlemelerin, yerüstü su kaynakları yönetimine ilişkin düzenlemelerle birlikte havza bazında su kullanım durumları gözetilerek bütüncül bir anlayışla ele alınarak yapılması gerekmektedir.

Anahtar Kelimeler: entegre yeraltı suyu yönetimi, yeraltı sularının kullanımı, yeraltı suyu tahsisleri, maliyet geri kazanımı

Evaluation of Groundwater Uses and Allocations in Türkiye within a Sustainability Approach: The case of Yeşilirmak Basin

Abstract Groundwater resources are used for drinking, agricultural and industrial purposes. However, the sustainable allocation of the quantity and quality of this resource requires some issues to be taken into consideration in its management. In this study, the problems that cause pressure on the groundwater resource are addressed, and its uses and allocations in Türkiye are evaluated on the basis of the Yeşilirmak Basin, and problems and solution suggestions are developed. It is clearly seen that all groundwater uses on a basin scale in Türkiye should be monitored in terms of quantity and quality, allocations should be made dynamically based on the sustainable management of groundwater, and that regulatory measures should be taken to ensure that revenues are not used for any other purpose by introducing a fee or tax application to cover the costs of groundwater protection measures. Regulations regarding sustainable groundwater management should be made by considering water usages on a basin scale together with regulations regarding surface water management, and water management should be handled within a holistic approach.

Keywords: integrated groundwater management, groundwater use, groundwater allocations, cost recovery

1. Giriş

Suyun içme ve kullanma, tarım, enerji, sanayi gibi alanlarda vazgeçilmez bir kaynak olması, miktar bakımından kısıtlı oluşu ve kullanın alanlarına göre kalite standartlarının sağlanması gerekliliği yönetiminde dikkate alınması gereken hususlar arasındadır. Suyu olan talebin nüfus artışıyla artmasının yanı sıra, iklim değişikliği etkisi ile yağış rejimlerinin değişerek suyun arz yönünü etkilemesi su kaynaklarının sürdürülebilir yönetiminin sağlanmasında önemli bir zorluktur. Ayrıca kirlilik unsurları su kaynaklarını olumsuz yönde etkilemekte ve buna karşılık önlemler alınmasını gerektirmektedir.

Yeraltı su kaynaklarının Türkiye için önemine bakıldığında 2022 yılında su kaynaklarından çekilen 19,2 milyar m³ suyun %22,1'inin yeraltı su kaynaklarından temin edildiği görülmektedir. Bu miktarın %21,1'i yüzeysel kaynaklardan, %56,8'i ise denizlerden çekilmiştir. Denizlerden çekilen suyun %94'ü soğutma amaçlıdır. Bu sular belediyeler, köyler, imalat sanayi işyerleri, termik santraller, Organize Sanayi Bölgeleri (OSB) ve maden işletmeleri tarafından çekilmiştir. Görüldüğü gibi 2022 yılında çekilen toplam %43, 2'lik kısma denk gelen tatlısuyun %22,1 gibi önemli bir kısmı yeraltı su kaynaklarından sağlanmıştır (TÜİK 2024). Yeraltı suyu çekiminin uzun yıllar boyunca ve geniş alanlarda yeniden beslenmeyi aştığı durumlarda, su tablası seviyesindeki düşüş doğal yeraltı suyu deşarjını etkiler ve bu da yeraltı suyuna bağlı akarsular, sulak alanlar ve ekosistemler üzerinde zararlı etkilere neden olabilir (Wada vd. 2010). Ayrıca, azalan yeraltı suyu seviyeleri kuyu verimini düşürebilir ve pompalama maliyetlerini artırabilir, hatta büyük ölçekte arazi çökmesine de yol açabilir. Yeraltı su kaynaklarının kirlenmesi durumunda da miktarı açısından yeterli olsa da kullanım alanları bağlamında belirli kalite nitelikleri arandığından kullanılmaz hale gelmektedir. Yeraltı suyunun aşırı kullanımı ve kirliliğinin etkileri uzun süre fark edilemeyebilir. Bu hususlar yeraltı sularının korunması ve yönetiminde önem arz etmektedir.

Bu çalışmada öncelikle entegre yeraltı su yönetimi kavramı ve çerçevesi açıklanmıştır. Dünyada ve Türkiye'de yeraltı suyu yönetimi incelenmiştir. Türkiye'de yeraltı suyu kaynaklarının kullanımına ilişkin veriler Türkiye İstatistik Kurumu, Su Yönetimi Genel Müdürlüğü'nün havza bazlı çalışmaları, Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü çalışmaları ve Amasya, Çorum ve Samsun Çevre ve Şehircilik İl Müdürlüklerine ait 2022 yılı Çevre Planları ve Merzifon Belediyesi su yönetim sisteminden elde edilmiştir. Yeşilirmak Havzası su kullanım durumları ve yeraltı suyu kullanımına ilişkin veriler değerlendirilmiştir. Çalışmanın amacı, yeraltı su yönetiminde sürdürülebilirliğin sağlanması için kalite ve miktar göz önüne alınarak sorunların ve çözüm yollarının ortaya konulmasıdır.

2. Yeraltı Suyu Yönetimi Sorunlarının İncelenmesi

2.1 Yeraltı suyu kaynağına ilişkin sorunlar

Yeraltı suyu insan yaşamının sürdürülmesi için önemli bir su kaynağıdır. Verimli pompaların kullanılmaya başlanması ve kırsal alanlarda elektrik altyapısındaki gelişmelerle kentsel, tarımsal ve endüstriyel alanlarda yeraltı suyu kullanımı artmakta ve buna bağlı olarak yeraltı suyu kaynakları üzerinde yerel, bölgesel ve sınıraşan sorunlar ortaya çıkabilmektedir. Yeraltı suyu kaynağına ilişkin temel sorunlar yeraltı suyunun tükenmesi, yeraltı suyu kalitesinin bozulması, su- enerji ilişkisine bağlı sorunlar ve sınır ötesi su çatışmalarıdır. Tükenme yeraltı suyu seviyelerindeki düşüşler, taban akışında veya bağlı yerüstü su kütlelerindeki seviyelerdeki

düşüşler ve su kalitesindeki bozulma ile ölçülmektedir. Su kalitesi, akifer tuzlanması, deniz suyu girişim riski ve çökme sorunları hesaba katıldığında tükenme, kaynağın toplam veya kullanılabilir hacminde azalmaya neden olan fiziksel bir süreçtir. Bu nedenle tükenme, kaynağın mevcut ve gelecekteki kullanımı için olumsuz olduğu fark edilen veya algılanan sonuçlara yol açmaktadır. Tuzlanma gibi tükenmelerin sonuçları da önemli olabilmektedir. Bozulmuş bir akiferi doğal durumuna geri döndürmek genellikle zaman ve kaynak açısından pahalı olmaktadır. Ayrıca, çökme gibi bazı etkiler geri döndürülemez olabilmektedir (Tzampoglou vd. 2023). Yeraltı suyu tükenmesinin potansiyel sosyal ve ekonomik sonuçları ciddidir. Akifer tükenmesi yoğun nüfuslu ve ekonomik olarak üretken bölgelerde yoğunlaşmaktadır. Gıda güvenliğinin sağlanması, ekonomik büyümenin ve çevre kalitesinin sürdürülmesi açısından etkileri önemlidir.

Yeraltı suyu kalitesinin bozulması toprak ve akifer tuzlanması, kimyasallardan ve mikroorganizmalardan kaynaklanan kirlenme nedeniyle gerçekleşmektedir. Tuzlanma, toprak ve suyun suda çözünen tuz içeriğiyle ilgili bir özelliktir. Çoğunlukla sodyum klorür içerir, ve sülfatlar, karbonatlar ve magnezyum da bulunabilir. Tuzlu toprak, bitki büyümesini ve ürün üretimini olumsuz yönde etkileyecek yeterli çözünür tuz içeren topraktır. Arazilerde yapılan aşırı sulama yetersiz drenaj nedeniyle toprakta tuzlanmaya neden olmaktadır. Tuzlu suyun tatlı suyla karışması, birçok kıyı bölgesinde akifer tuzlanmasına neden olmaktadır. Kıyı akiferleri, yüksek nüfus yoğunlukları ve deniz seviyesi yükselmesi nedeniyle yeraltı suyu çıkarılmasına karşı daha savunmasızdır (Ferguson ve Gleeson, 2012). Deniz suyu girişimi akiferlerin hidrolojik dengesini bozduğu dünya çapındaki büyük kıyı sulama bölgelerinde yeraltı suyu kalitesini etkilediği bilinmektedir. Avustralya'daki Queensland, ABD'deki Florida, İspanya'da Güney Atlantik kıyı şeridi ve Lübnan gibi kıyı bölgeleri, tuzlu suyun kıyı akiferlerine sızdığı en dikkat çekici vakalar arasında yer almaktadır (Barlow ve Reichard, 2010). Sulama suyunda bulunan gübre ve pestisit artıkları ile tuzlar önemli tarımsal kirleticilerdir. Aşırı sulama, suyu bitkilerin kök bölgesinden alttaki yeraltı suyuna yönlendirerek, uygulanan gübreleri, pestisitleri, azot bileşiklerini, fosforu, potasyumu ve kimyasal bileşikleri taşımaktadır. Bu kirleticilerin yaygın alansal kapsamı nedeniyle, bunlara genellikle "noktasal olmayan kaynaklı" kirleticiler denir. Endüstriyel kimyasalların kazara dökülmesi ve sızması da yeraltı suyu kirliliğine neden olabilmektedir. Arsenik ve nitrat, ciddi halk sağlığı etkilerine sahip iki büyük kirleticidir. Yeraltı suyunda doğal olarak bulunan yüksek arsenik konsantrasyonları birçok ülkede önemli bir halk sağlığı endişesi olarak kabul edilmiştir. Nitrat kontaminasyonu ise gelişmiş ve gelişmekte olan ülkelerde yaygındır. Ticari gübrelerin veya hayvan atıklarının aşırı uygulanması ve belediye ve hayvan atıklarının yetersiz atık bertarafı bu sorunla ilişkilendirilmiştir. Yeraltı suyunun mikrobiyal kirlenmesi ise kanalizasyon atıklarının salınmasına karşı akiferlerin yetersiz korunmasından kaynaklanabilmektedir. Yeraltı suyunun kirlenmesi, doğal yeraltı suyu besleme alanlarına yakın kentsel çöplükler, kırsal alandaki yerinde sanitasyon tesisleri, sızdırmalı fosseptikler, kanalizasyonlar ve çiftlik hayvanlarının atıkları gibi birçok yolla meydana gelebilmektedir (Hou vd. 2022).

Su enerji üretiminde kullanılırken, suyun iletimi ve artırılması için enerji gerekmektedir. Enerji gereksinimi suyun yeraltından kaldırılması gereken mesafeye artarken ve pompa verimliliğiyle azalmaktadır. Azalan su seviyeleri, pompa verimliliğinin artmasıyla telafi edilemediği sürece yeraltı suyu pompalaması için enerji gereksinimlerini artıracaktır. Hindistan'da pompalama için artan enerji talebi, yeraltı suyu çıkarma amacıyla elektrik enerjisine yönelik hükümet sübvansiyonları nedeniyle daha da kötüleşmiştir (Badiani vd. 2012).

Sınır ötesi su çatışmaları genellikle yüzeysel sularda görülmektedir. Yeraltı suyu akışının tanımlanmasındaki belirsizliği, yeraltı suyu ile yüzey suyu arasındaki hidrolik bağlantının belirsizliği ve artan su kullanım ihtiyaçlarıyla birlikte sınır ötesi yeraltı suyu kaynakları üzerinde ciddi bir çatışmanın kaçınılmaz olduğu görülmektedir (Golovina ve Karennik 2021). Su kaynağının bir ülkede olduğu ancak suyun ana talebinin başka bir ülkede olduğu 480 sınır ötesi akifer bulunmaktadır ve bunların %8'inin insan tüketimi tarafından strese girdiği belirlenmiştir. Bu sınır ötesi akiferlerin çoğunun Arap Yarımadası, ABD-Meksika sınırı ve Hindistan ve Pakistan'da bulunmaktadır (Wada ve Heinrich 2013). Ceylanpınar akiferi Türkiye ile Suriye arasındaki sınırı kaplar ve beslemesi Türk kaynak sularında, deşarjının çoğu ise Suriye'deki Ras al-Ain kaynaklarında gerçekleşir (Oeztan ve Axelrod 2011).

2.2 Yeraltı suyu ve toplumsal etkileşime ilişkin sorunlar

Su altyapıları ve arazi kullanımındaki değişiklikler hidrojeolojik süreçleri önemli ölçüde değiştirmiştir. Buna bağlı olarak yeraltı suyunu ve ekosistemleri etkilemiştir.

Kentsel, endüstriyel ve tarımsal kullanımlar için yeraltı suyu çıkarma altyapılarının geliştirilmesi yeraltı suyu kullanımını artırmıştır. Artan yeraltı suyu çekimi yeraltı suyu seviyelerinde daha büyük mevsimsel ve yıllık dalgalanmalara neden olmuştur ve bağımlı ekosistemleri ve yeraltı suyu kalitesini etkilemiştir. Tarımda özel sondaj kuyularının gelişimi, belediyelerin yüzeysel su tesislerindeki açığı kapatmak için yeraltı suyuna yönelmeleri, endüstriyel tesislerin suyunu kendi kendilerine tedarik edebilmeleri ve kuru iklimlerde sel, heyelan, deprem veya büyük ölçekli kirlenme gibi nedenlerden dolayı tedarik güvenliğinde yeraltı suyuna yönelmeleri yeraltı suyu çekimini artırmıştır.

Sulama ve drenajın gelişimi yeraltı suyunu etkileyen önemli bir faktör olmuştur. Uzun mesafelerde yüzey kaynaklarından su taşıyan büyük ölçekli yerçekimi sulama yapılarının inşası, kanallarda ve çiftlik düzeyinde oluşan su kayıpları yoluyla yeraltı suyu dolumunu artırabilmektedir. Böylece yeni yüzey ekosistemlerinin gelişimi, su basması ve artan tuzlanma sorunları ortaya çıkabilmektedir. Yüzeysel su kaynaklarının kıtlığı ile birlikte yağmurlama ve damla sulama gibi daha verimli yüzeysel sulama yöntemlerinin teşviki salma sulamanın yerini almaktadır. Sulamanın verimliliği artarken sulama kayıpları ve sığ akiferlerin dolumu azalmaktadır.

Yapay besleme, evlerde çatılardan toplanan yağmur suyunun yeniden sızdırılması gibi daha küçük ölçeklerde de gerçekleştirilebilmektedir. Merkezi olmayan yapay besleme planlarının teşviki genellikle kentsel gelişim planlaması ve politikasının bir özelliği olmaktadır. Suyu duyarlı kentsel tasarım kavramı ivme kazanmaktadır (Hussey ve Kay 2015). Yeraltı suyu kaynağını iyileştirmeye yönelik EYSY, yeraltı suyu ve kentsel gelişim politikalarının entegrasyonundan açıkça etkilenmektedir.

Yeraltı suyu döngüsü, arazi kullanım değişiklikleri tarafından önemli ölçüde değiştirilebilmektedir. Arazi kullanımı, yerel akifer dolumunu ve bir noktada veya dağınık kaynaktan üretilen kirlenmelerin miktarını etkilemektedir. Kentsel alanlardaki nüfus yoğunlaşması, tarım arazilerinin ve/veya doğal arazilerin büyük oranda konut, ulaşım, ticari veya endüstriyel arazi kullanımına dönüştürülmesine yol açmaktadır; bu da genellikle geniş alanlardaki yeraltı suyu dolumunun azalmasına neden olmaktadır. Kentleşmenin ikinci önemli etkisi yeraltı suyu kalitesi üzerindedir (Damaneh vd. 2018). Ekonomik, endüstriyel ve ticari gelişim yeni potansiyel kirlenme kaynakları ortaya çıkarmaktadır. Kirlenmiş topraklar daha dağınık bir kirlenme kaynağı oluşturur. Kanalizasyon

sistemlerinden sızıntı da önemli olabilir. Yağmur suyu, geçirimsiz yüzeylerden ve patojenik bakteri ve virüslerden önemli kirlilik yükleri taşıyabilmektedir. (Hunt vd. 2010).

Yeraltı suyu, enerji politikasındaki değişikliklerden de önemli ölçüde etkilenebilmektedir. Enerji fiyatlandırması beklenmeyen etkilere yol açabilmektedir. Çiftçilerin elektrik sübvansiyonlardan yararlanmasıyla aşırı yeraltı suyu kullanımına neden olabilmektedir. (Shah 2014). Enerji-su bağlantısı aracılığıyla, yeraltı suyu politikası yenilenebilir enerji geliştirme politikalarıyla da çatışabilmektedir. Güney İspanya'da, termo-güneş enerjisi santrallerinin geliştirilmesi, yeraltı suyu haklarının tarımdan enerji sektörüne aktarılmasına ve yoğunlaşmasına neden olmuş ve yeni yeraltı suyu yönetimi sorunları doğurmuştur (Berbel vd. 2013).

2.3 İklim değişikliğinin yeraltı suları üzerindeki etkilerine ilişkin sorunlar

Küresel iklim değişikliği ile birlikte yağışlar sıklık, yoğunluk ve süre bakımından değişmektedir. Bu durum dünyanın çeşitli bölgelerinde yeraltı suyu dolum oranlarını farklı etkileyecektir. Yağışın arttığı bölgelerde yeraltı suyu seviyesi artabilirken, yağışın azaldığı ve buharlaşmanın arttığı bölgelerde yeraltı su seviyelerindeki düşümün hızlanması muhtemel olacaktır. Geleneksel iklim ve bitki örtüsü bölgelerinin kayması, ormanların tür kompozisyonunda değişikliklere, yükselen kar çizgilerine ve daha sık orman yangınlarına neden olacaktır. İklim değişikliği sel sıklığını ve yoğunluğunu, erozyonu ve baraj siltasyonunu etkileyebilmektedir. Yeraltı suyu yeniden beslemesi üzerindeki ortaya çıkan etkiler, sırasıyla yeraltı suyu deşarjının oranlarını ve hacimlerini, akarsu taban akışını ve pompalama için yeraltı suyunun mevcudiyetini etkileyecektir (Klove vd. 2014).

Yeraltı suyu kalitesi üzerinde iklim değişikliğinin etkileri bulunmaktadır. Kentleşmeden kaynaklanan ısı adası etkisi ve yeraltı sıcaklıkları üzerindeki küresel ısınmanın birleşimi, yeraltı biyojeokimyasal reaksiyonlardaki değişiklikler nedeniyle yeraltı suyu kalitesi üzerinde etkilere sahiptir (Taylor vd. 2013). İklim değişikliği ve artan kentleşme yönündeki küresel eğilim de taşkın kırılganlığını artırabilir (Huang vd. 2015). Kentsel alanlardaki taşkınlar, petrol, çözücüler ve kanalizasyon gibi yaygın kentsel kirlenmelerin yeraltı suyuna yüklenmesini artırabilir.

3.Sürdürülebilirlik Anlayışı ile Yeraltı Suyu Yönetimi

3.1 Entegre yeraltı suyu yönetimi kavramı ve çerçevesi

Entegre Yeraltı Suyu Yönetimi (EYSY), yeraltı suyu ve ilgili kaynakların koordineli yönetimini (yüzey suyuyla birleşik yönetim dahil) teşvik eden, yeraltı suyu dışındaki politika etkileşimlerini de hesaba katan, mekân ve zaman içinde dengeli ekonomik, sosyal refah ve ekosistem sonuçları elde etmeyi amaçlayan yapılandırılmış bir süreçtir. Bu hedefe ulaşmak için EYSY şunları yapmalıdır: (i) en önemli yolların belirlenmesi; (ii) bu yolları bütünsel yönetim hedefleri doğrultusunda kontrol etmek için politika seçeneklerinin göz önünde bulundurulması ve (iii) sonuçların ve belirsizliklerin değerlendirilmesi. Tüm paydaşların görüşlerinin dahil edilmesini ve anlaşmazlıkların dikkate alınmasını sağlamak için yeraltı suyuyla ilgili konuların bütünsel bir şekilde ele alınması da gerekmektedir (Jakeman vd. 2016).

Yeraltı suyu yönetimi, yeraltı suyu kaynaklarının ve akifer sistemlerinin kontrolünü, korunmasını ve sosyal açıdan sürdürülebilir kullanımını sağlamak için sorumlu kolektif eylemin teşvik edilmesini içermektedir. Bu, yasal ve düzenleyici çerçeve, sürdürülebilirlik zorluklarına ilişkin

paylaşılan bilgi ve farkındalık, etkili kurumlar ve toplumun hedefleriyle uyumlu politikalar, planlar, finansman ve teşvik yapıları ile kolaylaştırılmaktadır (GEF vd. 2015). Yeraltı suyu yönetişiminin de beş tür aracı içeren politika yaklaşımı bulunmaktadır (Jakeman vd. 2016):

- Devlet müdahalesi yoluyla hedef grubun davranışını iyileştirme amaçlayan düzenleyici standartlar, lisanslar ve yönetim bölgeleri gibi komuta ve kontrol araçları,
- Olası eylemlerin maliyet ve faydalarını göz önüne alarak hedef bir duruma ulaşmak için vergiler, sübvansiyonlar veya su piyasaları gibi ekonomik araçlar,
- Ekonomik olmayan motivasyonları (fedakârlık, karşılıklılık, güven, gelecek nesillere yönelik kaygılar) artırılarak, yeraltı suyu kullanıcıları arasındaki işbirliği davranışlarını güçlendirmeyi amaçlayan işbirliği anlaşmaları,
- Bireylerin bilgilerini, tutumlarını ve/veya motivasyonlarını ve karar vermelerini etkilemeyi amaçlayan bilgileri (örneğin bireysel su tüketimiyle ilgili) dağıtmak için iletişim ve yayılma araçları,
- Yönetilen akifer beslemesini başlatmak gibi yeraltı suyu yönetimini iyileştirmeyi amaçlayan kamu sektörü yatırımlarını tanımlayan altyapı araçları/yatırımları.

EYSY, dört temel müdahale gerektirir. Dört alandaki eylemler bir araya getirildiğinde, yeraltı suyu kaynaklarının sürdürülebilir bir şekilde yönetilmesinde uzun bir yol kat edilecektir. (Pitcock vd. 2015):

1. Bilgi: Yeraltı suyu kaynakları ve çevre, enerji, gıda ve evsel su gibi önemli kullanımlar hakkında uyumlu bilgileri kamuya açık hale getirmek entegre karar almayı kolaylaştırmaktadır.
2. Teknoloji: Kuru soğutmalı termik santraller ve daha verimli sulama ekipmanları iklim değişikliğinin azaltılmasını ve adaptasyonunu kolaylaştırırken daha az yeraltı suyu kullanabilecek birçok teknoloji bulunmaktadır.
3. Pazar teşvikleri: Sınır ve ticaret su piyasaları kurmak, (Grafton vd. 2011).
4. Yönetişimi yeniden şekillendirmek: Su ve iklim politikası gibi sektörler arasında kararları sistematik olarak entegre etmek

3.2 Yeraltı suyu yönetiminde maliyet geri kazanım durumunun incelenmesi

Su Çerçeve Direktifi (SÇD), su talebinde değişiklik oluşturmak ve su kirliliğini azaltmak için ekonomik araçların (vergiler, tarifeler ve genel ücretler dahil) kullanımını teşvik etmektedir. Su hizmetlerini yüzey veya yeraltı suyunun çekilmesi, tutulması, depolanması, arıtılması, dağıtımı ve atık suyun toplanması ve atık su arıtma tesisleri ile arıtılarak alıcı ortama deşarj edilmesi olarak tanımlanmaktadır. Ulusal su politikaları en az sanayi, haneler ve tarım olarak ayrıştırılmış farklı su kullanımlarında su hizmetlerinin maliyetlerinin geri kazanılmasına yeterli katkıyı sağlamalıdır. Böylece su kaynaklarının daha verimli ve sürdürülebilir bir şekilde kullanılmasını amaçlayan çevresel ve kaynak maliyetlerini de dâhil etmelidir (Berbel, 2020). Su kıtlığı ve kullanıcı grupları arasında su dağıtımında buna karşılık gelen verimsizlikler (vazgeçilen fırsatların maliyetleri) kaynak maliyetleri olarak adlandırılır. Çevresel maliyetler ise sadece su sisteminin kimyasal ve / veya ekolojik durumunun bir sonucu olarak bir su sistemine (su kütlesi veya nehir havzası) verilen fiziksel çevresel hasarın toplam ekonomik maliyetini (refah kaybı) ifade etmektedir. Ancak SÇD onaylanmasından uzun yıllar geçmesine rağmen çevresel ve kaynak maliyetlerinin değerlendirilmesi ve geri kazanılması AB içerisinde uyumlu şekilde uygulanamamaktadır (EC 2015).

Bazı Avrupa ülkeleri bu finansal olmayan maliyetleri kısmen içselleştirmek için bir araç olarak bir "eko vergi" önermiştir. Portekiz su çekimine vergi getirirken, İtalya hacimsel vergilendirme uygulamaya söz vermiştir. Hollanda ve Almanya sırasıyla 2008 ve 2011 yıllarında bu tür vergileri kaldırmıştır. Su kirleticileri ile ilgili olarak, Fransa, Belçika ve Danimarka gibi ülkeler pestisitlere vergi getirmiştir (Berbel vd 2019).

Hollanda 'da toplam su arzını %70'ini oluşturan yeraltı suları kaynağını korumak için 1995'te yeraltı suyu vergisi uygulamaya konmuştur. Standart vergi oranı 0,20 €/m³ olup, su şirketlerine uygulanmıştır. Tarım dışındaki küçük kullanıcılarda da muafiyetlerin olması bu vergiye sadece su şirketlerinin tabi olması, gelirlerin amacıyla kullanılmayıp genel bütçeye aktarılması, yeraltı suyu yönetiminde verimliliği şüpheye düşürmesi 2012 yılında bu verginin kalkmasına neden olmuştur. Bunun yanında 1986'dan beri yeraltı suyu kullanıcıları yeraltı suyu kalitesini izleme ve kontrol etme maliyetlerini karşılamak için il yeraltı suyu ücreti (provincial groundwater fee) ödemektedir. Bu ücretler yalnızca büyük kullanıcılar (şehirler, endüstriler ve nüfus kümelenmeleri) tarafından ödenmektedir. Tutarı ise ortalama olarak 0,03 euro/m³ tutarındadır (Schuerhoff vd. 2013).

Danimarka yeraltı suyu kalitesini garanti altına almak için ulusal hidrojeoloji hizmeti, gözetim ve kontrol hizmetlerinin maliyetlerini yalnızca kentsel kullanıcılar tarafından ödenen bir vergiyle karşılamaktadır. Tarımsal kullanımlar muaf tutulmuştur (GEUS, 2010). Çekme ücreti, 1994 Yeşil Vergi Reformu tarafından getirilmiştir. Çıkarma ücreti 0,55 €/m³ olarak sabitlenmiştir. Ücret, çiftçilerin katma değer vergisi gelirlerinden düşülebilmektedir, ancak yine de tarımsal sulamada yeraltı suyu tüketimi üzerinde bir etkisi olduğu düşünülmektedir. Ayrıca, dağıtım şebekesi üzerinden su kayıplarını azaltmayı amaçlayan su hizmetleri vergisi de vardır (yaklaşık m³ su başına 1 euro) ve bu, yeraltı suyu tüketiminin yaklaşık %5'ini oluşturmaktadır (Danmarks Statistik 2015).

Almanya'da belediye su kullanımına ilişkin tarifeye su çekme vergisi ve atık su vergisi gibi özel eyalet vergileri uygulamaktadır. Bu eyalet vergilerini ilgili federal eyaletlerine ödenmektedir. Bu vergiler yalnızca ev ve endüstriyel sektörler için geçerlidir. Tarımsal kullanımlar, herhangi bir yüzey ve yeraltı suyunun su çekimiyle ilgili bu belediye/eyalet ücretlerinden herhangi birini ödemekten tamamen muafır (BMUB 2016).

Fransa'da su çekiminin kökenine (yeraltı suyu veya yüzey suyu), kullanımlara (sulama, soğutma gibi), ve bölgelere (aşırı çekim nedeniyle kıt kaynaklara sahip alanlarda ek ücretler) dayalı farklılaştırılmış bir vergilendirme sistemine dayanmaktadır. Ulusal Parlamento, kaynak sıkıntısı çeken bölgeler için normal bölgelere kıyasla daha yüksek bir vergilendirme ile (ulusal düzeyde) maksimum tavanlar belirlemektedir. Sulama için vergi tavanı yaklaşık 0,072 euro/m³'tür. Bununla birlikte, her nehir havzasında uygulanan nihai vergi oranı Su Ajansı (veya Nehir Havza Ajansı) tarafından belirlenmektedir.

Portekiz'de 2008'de uygulanan ve tüm su hizmetlerine uygulanan vergi yeraltı suyunu da kapsamaktadır. Elde edilen gelir Ulusal Çevre Fonu'na ve Portekiz Çevre Ajansı tarafından kullanılmaktadır. Estonya, Finlandiya, İsveç su çekim vergisi uygulamakta, ancak tarımsal sulama genellikle muafır. Sadece Birleşik Krallık tarımsal sulama çekimlerine vergi uygulamaktadır. Birkaç doğu ülkesi (örneğin Macaristan, Romanya) sulama sektörüne vergilendirme planları uygulamaktadır (ARCADIS 2012).

3.3 Yeraltı suyu tahsis politikalarına yönelik örnekler

Avustralya'da Murray-Darling Havzası Otoritesi'nin havza için entegre bir yüzey ve yeraltı suyu planı Avustralya Parlamentosu tarafından 26 Kasım 2012'de kabul edilmiştir. Plan, yeraltı suyu kaynakları için sürdürülebilirliği hedeflemektedir, ancak yüzey suyu yeraltı suyu bağlantısını yeterince tanımlamadığı ve yeraltı suyu çekiminin çevresel etkilerini hesaba katmadığı için eleştirilmiştir (Nelson 2012). Murray-Darling Havzası'nda su tahsisine esneklik üç şekilde getirilir. İlk olarak, su, hak sahiplerine su mevcudiyetine bağlı olarak yıllık bazda tahsis edilir. İkinci olarak, yüzey suyu ve yeraltı suyu hak sahiplerinin su haklarını daha sonraki kullanım için devretme kapasiteleri sınırlıdır. Üçüncüsü, yüzey suyu ve yeraltı suyu ticareti, eğer satın alınabilecek su varsa, su kullanıcılarına kurak dönemlerde tahsislerdeki açıkları kapatmak için ek su satın alma potansiyeli de dâhil olmak üzere bazı ekstra esneklikler sağlamaktadır (Ross 2012).

Avrupa Su Çerçeve Direktifi (WFD), Avrupa'daki her türlü suyun kalitesinin entegre yönetimi için ortak bir çerçeve sağlayan yasal olarak bağlayıcı bir politikadır. WFD'nin temel hedefleri, su kalitesini ve su ekosistemlerini korumak, geliştirmek ve sürdürülebilir su kullanımını teşvik etmektir. WFD beş temel unsur içermektedir: nehir havzası planlarına dayalı nehir havzası yönetimi, emisyon sınır değerlerini çevre kalite standartlarına bağlayan birleşik bir kirlilik kontrolü yaklaşımı, "iyi su durumu" tanımı, su için tam maliyet geri kazanımı ilkesi ve politika yapımında kamu katılımının artırılması. İyi su durumu, yüzey suyu için ekolojik duruma ve yeraltı suyu için nicel duruma, yani ekolojik hedeflere ulaşılmasıyla bağlantılı yeraltı suyu seviyelerine odaklanmayı içermektedir (Wijnen vd. 2012).

AB'de su kullanma hakkı genellikle kamu otoriteleri tarafından lisanslar ve izinler aracılığıyla verilir. Su tahsisi farklı otoriteler ve kurullar tarafından farklı seviyelerde gerçekleştirilir. Yeraltı suyunu pompalama yetkisi genellikle çekilen su miktarına ve/veya pompalama kapasitesine atıfta bulunan izinler aracılığıyla verilmektedir. İzinler farklı eyaletlerde farklı süreler için verilir. Fransa, Almanya ve İngiltere dâhil olmak üzere bazı eyaletlerde izinler verilirken çevresel etkiler dikkate alınır. Ulusal otoriteler, su kıtlığı veya kuraklık dönemlerinde su çekimlerini kısıtlama yetkisine sahiptir. Hollanda, İspanya ve Fransa gibi bazı ülkeler, kısıtlamaları su kullanıcılarının hiyerarşisine göre belirlemektedir. Öncelik belirli sektörler veya bazen sektörler içinde belirli ürünler için verilebilmektedir (EC 2012).

Avrupa'da yeraltı suyu yönetimi genellikle ulusal otoriteler tarafından koordine edilmektedir. Bazen üye devletler düzeyinde yoğunlaşmış, bazen de bölgesel ve yerel düzeylere dağıtılmıştır. Danimarka gibi birçok küçük devlette yukarıdan aşağıya bir yaklaşıma sahipken, büyük devletlerde çok düzeyli yönetim kurumları bulunmaktadır. Danimarka'da Çevre Bakanı, nehir havzası yönetim planlarından sorumludur. Hollanda'da ise yetkili makam Ulaştırma, Su Yönetimi ve Kamu Hizmetleri Bakanı'dır. Hollanda'da bölgesel su otoriteleri ve su kurulları, WFD'yi uygulamada güçlü bir role sahiptir. Nehir havzası otoriteleri, az sayıda üye devlette öncü bir role sahiptir. Fransa, WFD tasarlanmadan önce bir nehir havzası yaklaşımı benimsemiş ve WFD'yi uygulamak için nehir havzası ve alt havza planlarının mevcut yapısını uyarlamıştır (Lieberink vd. 2011).

ABD'de eyalet hükümetleri yeraltı suyu yönetiminden sorumludur. Eyaletler arası anlaşmaların olduğu, federal mahkemelerin veya Yüksek Mahkeme'nin anlaşmalardan sorumlu olduğu sınır ötesi akiferler durumu dışında ulusal bir hesap verebilirlik mekanizması yoktur. Yeraltı suyu, su

kullanıcıları, su mahkemeleri ve idari otoritelerden oluşan bir ağ tarafından yönetilmektedir. Yeraltı suyu yönetimi düzenlemeleri hesap verebilirdir ve yerel düzeyde meşru olarak algılanır, ancak daha geniş bir düzeyde demokratik olarak hesap verebilir veya kullanıma hakları olarak algılanmayabilir. Yeraltı suyu mevcudiyeti ve kullanımı hakkında birçok bilgi boşluğu vardır ve yeraltı suyu bilgileri ve verilerinin koordinasyonunun etkinliğini iyileştirmeye ihtiyaç vardır. Yeraltı suyu kullanımına ilişkin düzenli bir ulusal inceleme veya izleme bulunmamaktadır. ABD Jeoloji Araştırması (USGS), yeraltı suyu değerlendirmelerini içeren bir Ulusal Su Kalitesi Değerlendirme Programı uygulamıştır. USGS, bölgesel olarak geniş 62 akifer belirlemiş ve bunların yaklaşık üçte birinin değerlendirilmesini yürütmektedir, ancak akifer değerlendirmesi ve izlemesi eyaletler tarafından yürütülmekte ve programların kalitesi oldukça değişken olmaktadır (Maupin vd. 2014).

Çevre Ajansı, İngiltere'de nehir akışı ölçüm noktaları ve yeraltı suyu seviyesi izleme sondaj kuyularından oluşan kapsamlı bir ağ ve yaygın ekolojik izleme kurmuştur. Havza bazında su çekme için ne kadar suyun güvenilir bir şekilde mevcut olduğunu belirlemek için bir Kaynak Değerlendirme Metodolojisi kullanılmaktadır. Su çekme için hâlihazırda tahsis edilen su hacmini ve çevrenin ne kadar ihtiyaç duyduğunu hesaba katarak, daha fazla su çekme için potansiyel olarak ne kadar suyun mevcut olduğunu belirleyebilmektedir. Ayrıca, sürdürülemez su çekmenin nerede gerçekleştiğini ve sorunu ele almak için çözümleri de belirleyebilmektedir. Bu bilgiler, İngiltere'deki her su çekmesini kapsayan Havza Çekim Yönetim Stratejilerinde (CAMS) yayınlanmıştır (Environment Agency 2016).

CAMS'yi oluşturan ayrıntılı Soyutlama Lisanslama Stratejileri (ALS), yeraltı suyu mevcudiyetini ve nehir akışlarını entegre etmektedir. Böylece yeraltı suyu çekmenin yüzey suyu özellikleri üzerindeki etkileri değerlendirmenin önemli bir parçası olmaktadır. Çevresel Akış Göstergesi (EFI), nehir akışlarının sağlıklı bir ekolojiyi desteklemek için yeterli olup olmadığını değerlendirmek için kullanılmaktadır. EFI'ler tüm akış aralığındaki çekme için mevcut hacmi kontrol etmektedir. Amaç sadece düşük akışları korumak değil, akış değişkenliğini sürdürmektir. Nehrin ekolojisi akış veya seviyedeki değişikliklere ne kadar duyarlıysa, çekme koşulları o kadar kısıtlayıcı olmaktadır (Barker 2016).

Fransa'da hükümet, su kullanıcılarının kendi aralarında sabit bir su çekme limiti tahsis etme görevini üstlenmelerine olanak sağlamak için yeni bir kurum, Organismes Uniques de Gestion Collective (OUGC'ler) veya tek kolektif yönetim organları kurmuştur. OUGC'ler, OUGC'lerin görevlerini yerine getirenler ile bunlardan faydalanması beklenenler (sulamacılar) arasındaki çatışmalı ilişkiler ve bazı paydaşların etkisini sınırlayan karar alma prosedürleri nedeniyle güçlü tartışmalara yol açmıştır. Çiftçiler bireysel, kalıcı su haklarının kolektif bir kota ile değiştirilmesine özellikle tepki göstermiştir. Ayrıca, yaptırım ve OUGC'ler ile çiftçiler arasındaki yargısal ilişki de dahil olmak üzere mevzuattaki temel hususlarla ilgili netlik eksikliği, kolektif yönetim modeline yönelik desteğin daha da azalmasına yol açmıştır.

Danimarka, zamana bağlı hakları, çevresel ihtiyaçları hesaba katan toplam su çekimine bir üst sınır, ekonomik araçlar (hacimsel su ve atık su tarifeleri, vergiler ve yeraltı suyu çekim ücreti) ve iyi gelişmiş bir izleme ağını birleştiren kapsamlı bir tahsis rejimine örnek teşkil etmiştir. Yeraltı suyu kalitesini korumak için uygulanan önlemler yeraltı suyunun Danimarka'daki içme suyunun neredeyse tamamını sağlaması nedeniyle özellikle önemli olmuştur.

Meksika'da, kontrolsüz pompalamadan kaynaklanan yeraltı suyu tükenmesi, önemli miktarda arazi çökmesine, kentsel ve

Çevre, İklim ve Sürdürülebilirlik

kırsal su temini maliyetlerinin artmasına ve yeraltı suyu kalitesinin bozulmasına neden olmuştur. Pompalama üzerinde daha fazla kontrol sağlama girişimleri, zayıf uygulamaya nedeniyle engellenmiştir. Çevresel akışları belirlemek için 2012 standardının kabulü, çevre için suyun güvence altına alınması yönünde olumlu bir adım olmuştur, ancak ulusal mevzuattaki belirsizlik ve tutarsızlık, standardın başarılı bir şekilde uygulanmasına yönelik zorluklar oluşturmuştur.

İspanya'da, Yukarı Guadiana Havzası'ndaki sulu tarım, yeraltı suyu çekiminde keskin bir artışa ve su tablasında büyük bir düşüşe neden olmasına rağmen, dikkate değer sosyoekonomik gelişmeyi teşvik etmiştir. Bu ciddi düşüş havzadaki birkaç sulak alanı olumsuz etkilemiştir. Bunlar arasında çevredeki nüfusa değerli ekosistem hizmetleri (balıkçılık, yengeç avcılığı, meyve bahçeleri) sağlayan Ramsar sahası olan ünlü Tablas de Daimiel Milli Parkı da bulunmaktadır. İspanyol yetkililer, onlarca yıldır yeraltı suyunu özel mülkten kamu mali olarak yönetilen bir kaynağa kaydırmak için politikalar ve yasal değişiklikler uygulamıştır ve pompalama kotaları oluşturmuştur. İzleme ve uygulama bir zorluk olsa da, bu çabalar aşırı soyutlanmış bir durumdan soyutlama üzerinde daha fazla kontrole doğru ilerlemeye yardımcı olmuş ve akiferin kademeli olarak iyileşmesine katkıda bulunmuştur.

Hindistan'da su çekimlerindeki sürdürülemez artış, artan elektrik tüketimi ve mali açık tek tarifinin dezavantajı olmuştur. Yeraltı suyu seviyeleri düştükçe, kuyu sahipleri daha büyük pompalara yatırım yaparak mevcut sorunları daha da kötüleştirmiştir. Elektrik tedarik saat süresi sınırlanmaya başlanmıştır. Ancak, bu durum aynı sistem üzerinden tarımsal ve evsel elektrik sağlandığı için ev kullanıcıları için elektrik tedarikini de etkilemiştir. 2003-2006 yıllarında uygulamaya konulan Jyotigram planı tarımsal kullanım için elektrik arzını, ticari ve konut kullanımı için olandan ayırmayı içeriyordu. Tarım dışı sektörlere haftada yedi gün 24 saat tam voltajlı, ölçülü elektrik tedariki sağlanırken, çiftçilere tahmin edilebilir zamanlarda günde 8 saat tam voltajlı tedarik sağlandı. Çiftçilere sağlanan elektrik tedariki yüksek oranda sübvansiyonlu kalırken, tarım dışı kullanım için tedarik ölçülü tüketime göre ücretlendirildi. . Bu, işgücünü daha verimli kullanmak, suyu korumak ve pompa bakım maliyetlerinden tasarruf etmek için sulama programlarını sürdürmelerine olanak tanımıştır. Ayrıca, tarımsal verimde herhangi bir azalma gözlemlenmemiştir. Gujarat'ın kuzeyindeki yeraltı suyu seviyeleri, planın başlatılmasından önceki yılda üç metrelik düşüşe kıyasla son yıllarda yılda ortalama dört metre yükselmiştir (Grönwall 2014).

2002 yılı itibarıyla Çin Su Yasası, yeraltı suyunun kullanım, satış ve ücretlendirme hakkı da dahil olmak üzere tüm yeraltı suyu kaynaklarının hükümete ait olduğunu belirtmiştir. Ancak uygulamada akiferlerin üzerinde yer alan köylerin kaynakları kullanma hakkı fiili olarak bulunmaktadır. Dolayısıyla yeraltı suyu hakları, arazi mülkiyeti veya tarihi kullanım haklarıyla değil, esas olarak kuyu mülkiyetiyle ilgili olmuştur. Bakanlık düzeyinde yeraltı suyu yönetimine ayrılan kaynaklar, yüzey suyu yönetimi ve taşkın kontrolüne ayrılan kaynaklara göre oldukça küçüktür. Ayrıca, yetki sınırlarını kapsayan akiferler için tek bir yönetim otoritesi yoktur. Çeşitli bölgelere yayılan akiferlerdeki kullanıcıların koordinasyonu sınırlıdır ve hükümet düzenlemelerinin uygulanmasını zayıflatır. Yeraltı suyu yönetimi ve yönetimi öncelikle köy düzeyinde gerçekleştirilmiştir. (Wang vd. 2014). 1980'lerdeki ekonomik ve kırsal reformlar, başta tarım olmak üzere bir dizi sektörde büyümeyi hızlandırmayı amaçlamıştır. Bazı köyler önemli ekonomik zorluklarla karşılaştı ve kolektif kuyuların kurulması ve bakımı da dahil olmak üzere artık tarıma yatırım yapamıyordu. Yeraltı suyu seviyesindeki düşüş, çalışan kuyu sayısında ek bir düşüşe neden oldu. Dahası, hükümet

düzenlemeleri özel faaliyetler üzerindeki kısıtlamaları giderek gevşetti ve bireylere kendi çiftliklerine yatırım yapma özgürlüğünün genişletilmesine izin verdi. Arazinin gelir ve kontrol hakları kolektiften bireysel haneye kaydırıldı. Ekonomik reformlar ve özel mülkiyete ait kuyuların ortaya çıkışı, gayri resmi yeraltı suyu pazarlarının kurulmasını kolaylaştırdı ve teşvik etti. Çin'de yeraltı suyu kuyularının özelleştirilmesi kayıt dışı su ticaretine yol açtı. Kuzey Çin'deki yeraltı suyu pazarları, suyun kullanıcılar arasında yeniden tahsis edilmesi için bir araç oluşturmuştur. Yeraltı suyu pazarları, kendi kuyularını kurma imkânı olmayan çiftçilerin yeraltı suyuna erişiminin artmasına olanak tanımıştır. Artan yeraltı suyu kıtlığı, yeraltı suyu piyasası faaliyetinin artmasına ve aynı zamanda su kaynaklarının daha verimli kullanılmasına yol açma eğilimindedir. Çin'de elektrik tarifeleri ölçülü tüketime göre belirlendiğinden, yeraltı suyunun pompalandığı derinlik bir kuyunun işletme maliyetini belirlemektedir. Pompalama maliyetleri daha yüksek olduğunda, su satıcıları ve alıcılar, en azından kendi özel kullanımları açısından, yeraltı suyu tüketimini optimize etme eğilimindedir. Gayri resmi piyasanın fiyat değişikliklerine tepkisi nedeniyle, bazı gözlemciler hükümetin resmi bir yeraltı suyu fiyatlandırma mekanizması oluşturması gerektiğini, bu mekanizmanın arz maliyetlerinin tamamının geri kazanılmasına olanak tanınması ve kaynak kıtlığını yansıtacak şekilde fiyat sinyali güçlendirmesi gerektiğini ileri sürmüştür (Wang vd. 2016).

4. Türkiye'de Yeraltı Suyu Yönetimi

4.1 Türkiye'de yeraltı sularının yasal açıdan incelenmesi

1982 Anayasası'nda yeraltı suları ile ilişkilendirilebilecek 168. maddesinde tabii servetler ve kaynakların devlet hüküm ve tasarrufu altında olduğu bunların aranması ve işletilmesi hakkının devlet hakkı olduğu ve devletin bu hakkı belirli bir süre için gerçek ve tüzel kişilere devredebileceği belirtilmiştir. Medeni Kanun'un 756. Maddesine göre yeraltı suları kamu yararına ait sular olup, arza malik olmak onun altındaki yeraltı sularına malik olmak sonucunu doğurmamaktadır. Arazi maliklerinin yeraltı sularından nasıl ve ne şekilde yararlanacağına ilişkin özel kanun hükümleri bulunmaktadır. Yeraltı sularının mülkiyeti 167 sayılı Yeraltı Suları Hakkındaki Kanun'da belirtilmiştir. Buna göre yeraltı suları devletin hüküm ve tasarrufu altında olup, bu suların araştırılması, korunması ve tescili bu kanun hükümlerine tabi olmaktadır.

Medeni Kanun'un 760. Maddesinde ise özel mülkiyete tabi arazide bulunan kuyulardan komşuların ve diğer kişilerin su içme, su alma, hayvan sulama ve benzer yollarla yararlanmalarının özel hükümlere tabi olduğu, özel kanun yoksa yerel âdetin uygulanacağı belirtilmiştir.

DSİ Genel Müdürlüğü tarafından sınırları ve yapısal özellikleri belirlenen yeraltı suyu sahaları yeraltı suyu işletme alanları olarak ilan edilmektedir. Kuyu açan kimse kendi faydalı ihtiyacı kadar suyu kullanmaya yetkilidir. Faydalı ihtiyaç DSİ tarafından belirlenmektedir. Kuyu açılması için öncelikle arama belgesi, arama belgesine istinaden kuyu açtıran kimse arazisinde su bulunması ardından kullanma belgesi almak zorundadır. Kullanma belgesinde bir yıl içerisinde çekilebilecek su miktarı belirtilmektedir. Çekilecek yeraltı suyu miktarını tespit edecek ölçüm sistemi kurulmadan kullanma belgesi verilemeyeceği 167 sayılı Yeraltı Suları Hakkında Kanun'da ifade edilmiştir.

DSİ Yeraltı suyu Ölçüm Sistemleri Yönetmeliğinde 25.02.2011 tarihinden önce yeraltı suyu temini amacıyla kuyu, galeri, tünel benzerleri için kullanma belgesi alanların iki yıl içerisinde ölçüm sistemini kuracakları ifade edilmiştir. 12.10.2013 tarihli DSİ Yeraltı suyu Ölçüm Sistemleri Yönetmeliğinin yürürlüğe girmesiyle önceki yönetmelik

yürürlükten kalkmıştır. Ancak 6427 sayılı Yeraltı Suları Hakkında Kanun ile Kamulaştırma Kanununda Değişiklik Yapılması Hakkındaki Kanunla, Yeraltı Suları Hakkındaki Kanunun 10. maddesine "...Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü'nün bağlı olduğu Bakanlıkça tespit edilen hususlara ilişkin uygulama usul ve esasları ile ölçüm sistemine dair hususların yönetmelikle belirleneceği, su ölçüm sisteminin kurulmasına dair sürenin Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü'nün bağlı olduğu Bakanlığın kararıyla uzatılabileceği" ifadesi eklenmiştir. Aynı Kanun'un Geçici 3. maddesi ile yeraltı suyu temini amacıyla açılan kuyu, galeri ve benzerleri için kullanma belgesi olarak sanayi amaçlı kullanılanlar bir yıl içerisinde ölçüm sistemini kurmadığı takdirde belgelerinin iptal edilerek kuyularının kapatılacağı, zirai ve içme kullanma amaçlı kullanılanların ise bir yıl içerisinde ölçüm sistemini kuramayanların bu sürede talep etmeleri halinde üç yıl içerisinde Devlet Su İşleri Müdürlüğü tarafından kurulacağı veya kaldırulacağı belirtilmiştir. DSİ Genel Müdürlüğü Jeoteknik Hizmetler ve Yeraltı Suları Daire Başkanlığı tarafından yayınlanan Ölçüm Sistemleri Takılmasına Yönelik Süre Uzatımı İlanına göre ölçüm sistemi takılmasına yönelik süreler sanayi amaçlı kullanılan kuyu, galeri, tünel ve benzerlerine 03.04.2022; zirai, içme ve kullanma suyu amaçlı açılan ve ölçüm sistemi kurma zorunluluğu dâhilinde bulunan kuyu, galeri, tünel ve benzerlerine 03.04.2022 tarihine kadar uzatılmıştır.

Yeraltı Suları Kanunu'nun uygulamasını göstermek için 1961 yılında Yeraltı Suları Tüzüğü yayımlanmıştır. Yeraltı suları işletme sınırları ve karakteristikleri DSİ tarafından belirlenmektedir. Yeraltı suları ile ilgili yapılacak tüm işlemlerin izin, kontrol, belgelendirilmesi DSİ tarafından yapılmaktadır. Yeraltı suyu deposu tükenmeden, emniyetli sınır içerisinde kuyulardan çekilecek emniyetli su miktarı azaltılıp çoğaltılabilmektedir. Tüzükte arazi ve kuyu sahiplerinin belgelerinde bildirilen emniyetli su miktarından fazla su çekemeyecekleri ifade edilmiştir. Yeraltı suyu ve tesislerinin korunması da bu Tüzükte hüküm altına alınmıştır. Yer üstü suyunun veya kullanmaya elverişli olmayan pis ve bozuk kaliteli suların kuyu ve kaynağa karışmaması, kuyu içerisindeki kötü kaliteli suyun iyi kaliteli su tabakalarına karışmaması, yeraltı suyunun boşa akıtılmaması, toprak vasıflarına uygun sulama yapılması ve tuzluluğa neden olunmaması için her türlü tedbirin alınması, projelerde gösterilmesi, uygulanması teknik yönetmelikte belirtilen esaslara göre yapılması tüzükte belirtilmiştir. Koruyucu tedbirlerin alınmasından belge sahibi sorumlu tutulmuştur.

Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği 31.12.2004 tarihinde yürürlüğe girmiş olup yeraltı ve yerüstü su kaynaklarının potansiyelinin korunması, kirlenmesinin önlenmesini sürdürülebilir kalkınma hedefleriyle uyumlu olarak gerçekleştirmek için gerekli hukuki ve teknik esasları belirlemektedir. Su kalitesinin korunmasına ilişkin planlama esaslarını, atık suların deşarj ilkelerini, deşarj izin esaslarını, atık su altyapısı esaslarını, izleme ve denetleme esaslarını düzenlemektedir. Her türlü düzenli depolama faaliyetleri için yeraltı sularında yapılacak kirlilik izleme çalışmaları referans ve gözlem kuyularında bu yönetmeliğin ekinde yer alan parametreler çerçevesinde yürütülmektedir. Faaliyetleri sonucunda yeraltı sularında kirlenmeye sebep olan faaliyet sahibi neden olduğu kirliliği ortadan kaldırmak, yeraltı suyu kalitesini faaliyete başlamadan önceki haline getirmek ve bununla ilgili tüm masrafları karşılamakla sorumlu tutulmuştur.

Yeraltı Sularının Kirlenmeye ve Bozulmaya Karşı Korunması Hakkında Yönetmelik 07.04.2012 tarihinde yürürlüğe girmiştir. Yönetmelik iyi durumda olan yeraltı sularının mevcut durumunun korunması, yeraltı sularının kirlenmesinin ve bozulmasının önlenmesi ve bu suların iyileştirilmesi için gerekli esasları belirtmektedir. Yeraltı sularına kalitesi ne olursa olsun atık su deşarjı yasaklanmıştır. Yeraltı suyu

kalitesinde kirlilik etkileri DSİ ve Su Yönetimi Genel Müdürlüğü (SYGM) tarafından çalışma grupları aracılığıyla değerlendirilmektedir. Yeraltı suyu iyi kimyasal durumu kalite standartları ve eşik değerler SYGM tarafından belirlenmektedir. Yönetmeliğe göre yeraltı suyu kullanımlarında beslenme ve çekim dengesi korunması, su kullanımında tahsis miktarının aşılması esastır. Yeraltı sularının miktarının ve kimyasal kalite durumunun korunması, kirliliğinin önlenmesi için bütün yeraltı su kütlelerinde uyulması gereken asgari şartlar SYGM koordinasyonunda tedbirler programı hazırlanmaktadır. Yeraltı sularının kalitesine ilişkin denetimler Çevre ve Şehircilik Bakanlığı ve miktara ilişkin hususlardaki denetimlerde DSİ yetkili kılınmıştır.

Yüzeysel Sular ve Yeraltı Sularının İzlenmesine Dair Yönetmelik 11.02.2014 tarihinde yürürlüğe girerek, bütün yüzey ve yeraltı sularının miktar, kalite ve hidromorfolojik özelliklerinin ortaya konması, ekosistem bütünlüğü dikkate alınarak izlenmesi, izleme standardın sağlanması, izleme yapan kurum ve kuruluşlar arasındaki koordinasyonun sağlanması amaçlanmıştır. Yeraltı suyu kütlelerinin kimyasal durum ve miktarının değerlendirilmesi, insan faaliyetleri sonucunda kirlilik artış durumlarının tespiti amacıyla DSİ tarafından yeraltı suyu izleme ağı oluşturularak, Ulusal İzleme Ağına dâhil edilmektedir. Yeraltı sularının genel amaçlı, operasyonel ve miktar bakımından izleneceği belirtilmiştir.

Köye Yönelik Hizmetler Hakkında Kanun 09.05.1985 tarihinde yürürlüğe girmiş olup, köy ve yerleşim birimleri ile askeri garnizonlara içme ve kullanma suyu temini amacıyla açılacak sondajların tahditli bölgelerde açılacak olanlar dışında 167 sayılı Yeraltı Suları Kanunu hükümlerine tabi olmadığı belirtilmiştir.

4.2 Kurumsal Durum

Su kaynaklarının korunmasına ve sürdürülebilir şekilde kullanılmasına dair politikaların oluşturulması amacıyla çalışmalar yaparak ulusal su yönetimini koordine etme görevi 10.07.2018 tarihinde yayımlanan Cumhurbaşkanlığı Kararnamesi ile Tarım ve Orman Bakanlığına verilmiştir. Tarım ve Orman Bakanlığına ait merkezi birimlerden olan Su Yönetimi Genel Müdürlüğü ve bağlı kuruluşlardan olan DSİ Genel Müdürlüğü ile Türkiye Su Enstitüsü' (SUEN) nün yeraltı sularının yönetimi konusunda görevleri bulunmaktadır.

DSİ Genel Müdürlüğü faaliyetlerini 6200 sayılı Teşkilat ve Vazifeleri Hakkındaki Kanun, 167 sayılı Yeraltı Suları Hakkındaki Kanun ve 1053 sayılı Belediye Teşkilatı Olan Yerleşim Yerlerine İçme, Kullanma ve Endüstri Suyu Temini Hakkında Kanun hükümlerine göre yürütmektedir. DSİ yeraltı suyu etüt ve araştırmaları için kuyu açmak veya açtırmak, yeraltı suyu tahsisi yapmak, yeraltı sularının korunması ve tescilli, arama, kullanma, ıslah ve tadil belgesi vermek görevlerindedir.

Su Yönetim Genel Müdürlüğü (SYGM) su kaynaklarının korunması, iyileştirilmesi ve kullanılmasına ilişkin politikaların belirlenmesi amacıyla çalışmalar yapmaktadır. Yeraltı sularının kalite ve miktarının korunmasına yönelik hedef, ilke ve alıcı ortam standartlarını ilgili kurum ve kuruluşlarla birlikte belirlemek, su kalitesini izlemek veya izletmek görevleri arasındadır.

SUEN 2011 yılında kurulmuştur. Su yönetişiminin iyileştirilmesi için kısa ve uzun dönemli stratejiler ile ulusal politikalar üretmeye yönelik bir düşünce kuruluşudur. Ulusal ve uluslararası düzeyde eğitim programları düzenlemektedir.

Çevre ve Şehircilik Bakanlığına bağlı Çevre Yönetimi Genel Müdürlüğü yeraltı ve yerüstü sularının korunması, kirliliğin önlenmesi amacıyla kirlenme unsurlarının kontrolüne ilişkin usul

Çevre, İklim ve Sürdürülebilirlik

ve esasları tespit ederek, acil müdahale planları yapmak, bu kapsamda gerekli tedbirleri almak veya kaldırmak görevleri arasındadır. Atık su arıtma tesislerinin tasarım esaslarını ve kriterlerini Tarım ve Orman Bakanlığı ile birlikte belirleyerek, onay işlemlerini yürütmektedir.

4.3 Türkiye’de yeraltı suyu kullanımına bakış

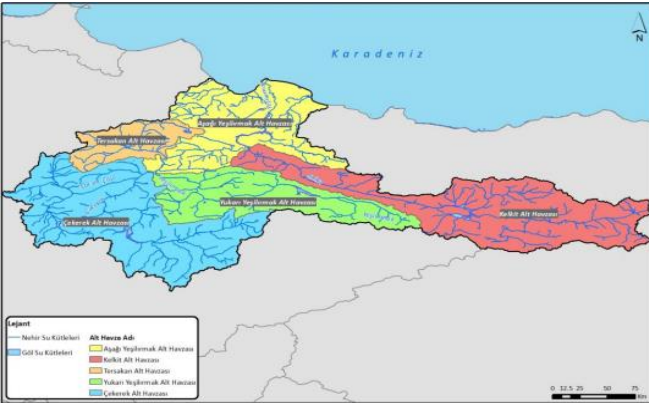
Türkiye’de 2022 yılında doğal kaynaklardan çekilen toplam 19,2 km³ suyun 4,26 km³’ü yeraltı suyundan çekilmiştir. Bu toplam çekilen suyun %22’sini oluşturmaktadır. Bunun 3,05 km³’ü belediyeler, 0,39 km³’ü köyler, 0,47 km³’ü imalat sanayi işyerleri, 0,04 km³’ü termik santraller, 0,13 km³’ü organize sanayi bölgeleri, 0,18 km³’ü maden işletmeleri tarafından çekilmiştir (TÜİK 2024).

Türkiye’de 2022 yılı sonu itibarıyla yeraltı suyu sulama kooperatifleri ve kamu kuruluşlarına ait yeraltı suyu tahsis miktarı 4,64 km³/yıl, belgeli şahıs kuyularına ait yeraltı suyu tahsisi 7,53 km³/yıl olup, sulamalara ait toplam tahsis miktarı 12,17 km³/yıl’dır. İçme kullanma ve sanayi suyuna ait yeraltı suyu tahsisi 5,89 km³/yıl’dır. Toplam 18,06 km³/yıl tahsisin %67,4’ü sulamalara, %32,6’sı içme kullanma ve sanayi suyuna ait olduğu görülmektedir (DSİ, 2024).

4.4 Yeraltı suyu yönetimi kapsamında Yeşilirmak Havzası’nın incelenmesi

4.4.1 Yeşilirmak Havzası’na genel bakış

Yeşilirmak Havzası Anadolu’nun kuzeyinde yer almaktadır. Havza içerisinde kalan illerin toplam alanı 39.574,38 km²’dir. Tersakan, Kelkit ve Çekerek kollarını oluşturmaktadır. Alt havzaları Aşağı Yeşilirmak alt havzası, Çekerek alt havzası, Kelkit alt havzası, Tersakan alt havzası ve Yukarı Yeşilirmak alt havzalarıdır (Şekil 1).



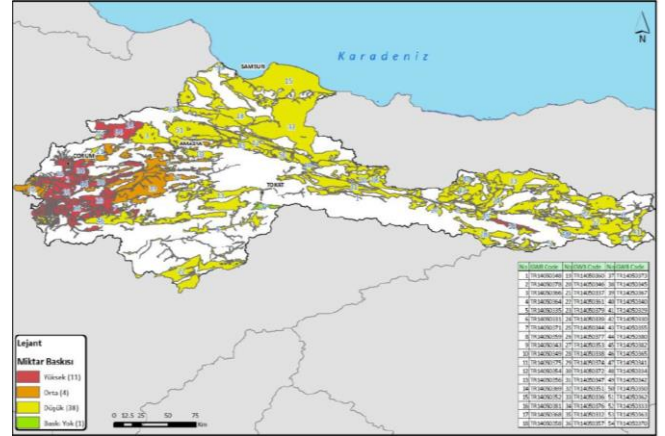
Şekil 1 Yeşilirmak havzası ve alt havzaları (Kaynak: www.tarimorman.gov.tr).

4.4.2 Yeşilirmak havzası yeraltı suyu yönetimi kapsamında yapılan çalışmalar

Yeşilirmak Havzası Master Plan Raporu kapsamında 2015 yılında DSİ tarafından havza içerisindeki yeraltı suyu alt havzaları için beslenme ve boşalım hesaplamaları yapılmıştır. Havza 11 alt havzaya ayrılarak incelenmiş, yeraltı suyu baskısının en yoğun olduğu 10 numaralı bölgede 1.084,40 hm³/yıl su çekimi yapılırken, 1.227,43 hm³/yıl beslenme hesaplanmıştır. Tüm alt havzalarda beslenme miktarı boşalım miktarından fazla bulunmuştur (SYGM-Yeşilirmak Havzası Kuraklık Yönetim Planı 2023).

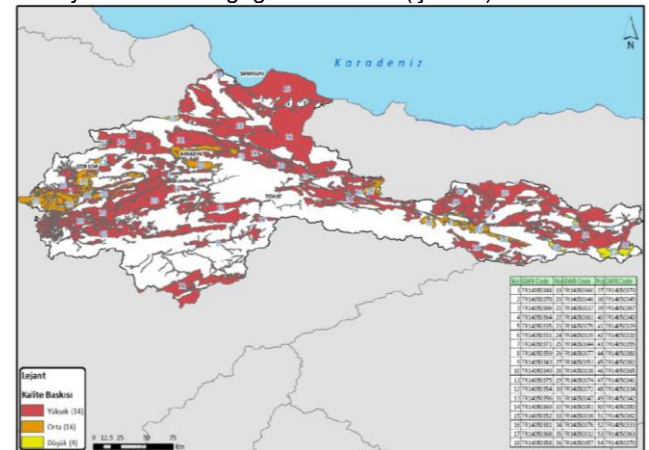
Yeşilirmak Havzası Nehir Havza Yönetim Planı 2021 yılında hazırlanmıştır. Bu kapsamda yeraltı suları için miktar açısından ve hem noktasal hem de yayılı kirlilik kaynaklarının neden olduğu kalite açısından baskılar değerlendirilmiştir.

Miktar açısından baskıların değerlendirilmesi uzun dönem yıllık su çekimlerinin uzun dönem yıllık su beslenimine bölünmesiyle yapılmıştır. Münferit izinsiz çekimlere ilişkin verilerden yararlanılarak hesaplamalara izinsiz su çekimlerinin dâhil edildiği ifade edilmiştir. Yeşilirmak Havzasında 11 yeraltı suyu (YAS) kütesinin miktar açısından yüksek baskıya maruz kaldığı, 1 YAS kütesinin baskıya maruz kalmadığı, 38 YAS kütesinin düşük baskı altında olduğu, 4 YAS kütesinin ise orta baskı altında olduğu tespit edilmiştir. Yüksek ve Orta baskının yoğun olduğu alanlar Tersakan ve Çekerek alt havzalarında kısmen ise Kelkit alt havzasında kalmaktadır. Şekil 2’de yeraltı suyu kütlelerinde miktar bakımından baskı durumları görülmektedir.



Şekil 2. Yeşilirmak havzasında yeraltı suyu kütlelerinde miktar bakımından baskı durumları (Kaynak: Su Yönetimi Genel Müdürlüğü (SYGM)-Nehir Havzası Yönetim Planı-NHYP 2021).

Kentsel arazi kullanımı, madencilik, endüstriyel arazi kullanımı, jeotermal suların neden olduğu noktasal kirlilik kaynakları ile hayvancılık faaliyetleri, tarımda gübre kullanımı ve atık depolama alanlarından kaynaklanan sızıntının neden olduğu yayılı kirlilik kaynakları havzayı etkileyen kimyasal baskılar olarak değerlendirilmiştir. Madencilik faaliyetlerinden kaynaklanan baskının diğer baskı türlerine göre yeraltı suyu kütlelerini daha fazla etkilediği tespit edilmiştir. Jeotermal faaliyetlerin en az etkileyen baskı türü olduğu görülmüştür. YAS kütlelerinin 34 tanesinin genel kalite bakımından yüksek baskı altında olduğu, 16’sının orta baskıya, 4’ünün düşük baskıya maruz kaldığı görülmektedir (Şekil 3).



Şekil 3. Yeşilirmak havzasında yeraltı suyu kütlelerinde kalite bakımından baskı durumları (Kaynak: SYGM-NHYP).

Miktar bakımından etkilerin değerlendirilmesinde kuyulara ait yeraltı suyu verileri incelenmiş, 10 yıllık dönemde aşağı yönlü eğilimler değerlendirilmiştir. 54 yeraltı suyu kütesinde 14 tanesinde uzun dönemli verilerin mevcut olduğu ifade edilmiştir. Su çekiminden dolayı etki oluşan 11 YAS kütesinden 4 tanesinin miktar bakımından yüksek baskı altında, 3’ünün orta baskı altında, 3’ünün düşük baskı altında olduğu tespit edilmiştir. 40 YAS kütesi veri eksikliği nedeniyle

değerlendirilememiştir.

Yeşilirmak Havzasında İnsani Tüketim Amaçlı Sular Hakkındaki Yönetmelik'te belirlenen değerlerin 15 YAS kütlelerinde aşularak bu kütlelerin etki altında olduğu, 3 YAS kütlelerinin etki altında olmasının muhtemel olduğu belirlenmiştir. 24 YAS kütlelerinden 24'ünün kalite açısından etki altında olduğu, 26 YAS kütlelerinde etki olmadığı, 3 YAS kütlelerinde potansiyel etki olduğu gözlenmiştir.

Miktar ve kalite açısından riskler değerlendirilerek Yeşilirmak Havzasındaki yeraltı suyu kütlelerinin %83'ünün risk altında olduğu, %13'ünün risk altında olmadığı ve %4'ünün potansiyel riskli olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Yeraltı suyu kütlelerinin durumu değerlendirildiğinde ise 54 YAS kütlelerinin 26'sının iyi durumda olduğu, 27'sinin zayıf durumda olduğu ve 1 YAS kütlelerinde ise yetersiz veri olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Yeşilirmak NHYP'de yeraltı suyu kütlelerine özgü miktar ve kalite sorunlarına yönelik tedbirler önerilmiştir. Bu kapsamda yeraltı suyu çekimleri yönetim planı hazırlanarak her bir yeraltı suyu kütlelerinde sürdürülebilir kullanım oranına uymak için tahsis edilecek maksimum hacmi içermesi gerektiği ifade edilmiştir. Yeni su çekimine kapalı alanların trendinin takibi ve yasa dışı sulama kuyularının tespiti ve kapatılması gerekliliği, çekim sorunu olmayan alanlarda yasa dışı kuyuların yasallaştırılması, gerektiğinde ruhsatlı kuyularda tahsislerin azaltılmasının düşünülmesi önerilmiştir. Aşırı çekim veya ruhsatsız çekim nedeniyle tuzluluğa sebep olan kayıt dışı ve kayıtlı kuyuların kapatılması gerektiği önerilmiştir. Tüm yeraltı suyu çekimlerinin kayıtlı tahsisinin olması ve yeraltı suyu

çekim envanterinin hazırlanmasının temel tedbir olduğu belirtilmiştir. Son olarak yeraltı suyu çekimlerinin izlenmesi ve kontrolü tedbiri tanımlanmıştır. Tedbirlerin uygulanmasından DSİ'nin sorumlu olduğu ifade edilmiştir.

4.4.3 Yeşilirmak Havzası yeraltı suyu durumu ve kullanımlarının incelenmesi

Yeşilirmak Havzası yeraltı suyu beslenme miktarı 907,20 hm³/yıl iken işletme rezervi 872,8 hm³/yıldır. Yeraltı suyu kooperatif sulamaları DSİ ve İl Özel İdaresi tarafından ortaklaşa gerçekleştirilmektedir. Yeşilirmak havzasında 89 adet YAS bulunmaktadır. YAS sulama kooperatifleri tarafından Amasya, Çorum ve Tokat'ta 10.286 ha alan salma sulama yöntemi ile sulanmaktadır. Yeşilirmak Havzasında Amasya, Çorum ve Tokat'ta 3.413 ha alan bu şekilde sulama sulama yöntemiyle sulanmaktadır. Havza içerisinde toplam sulama alanının %91,3'ü açık sulama sistemi ile sulama yapılırken (200.778 ha alanda), %8,70'inde kapalı sulama sistemi ile sulama (19.135 ha alanda) yapılmaktadır.

Sulanan alanların %86,68'inde salma, %7,21'inde yağmurlama ve %6,11'inde damlama sulama sistemi uygulanmaktadır. Tablo 1'de Yeşilirmak Havzasında sektörel su ihtiyaçlarına ait yüzde dağılımlar görülmektedir. Toplam su ihtiyacının mevcutta %83,68'i tarımda, %14,14'ü içme kullanmada, %1,65'i hayvancılıkta, %0,5'i sanayide, %0,03'ü turizmde olduğu tespit edilmiştir (SYGM-Yeşilirmak Havzası Kuraklık Yönetim Planı 2023).

Tablo 1. Yeşilirmak havzası su ihtiyaç durumu dağılımları (%) (SYGM 2023- Yeşilirmak Havzası Kuraklık Yönetim Planı)

Alt havza	Tarım	Hayvancılık	İçme Kullanma	Sanayi	Turizm
Aşağı Yeşilirmak Alt Havzası	71,36	1,59	26,26	0,74	0,05
Çekerek Alt Havzası	91,20	1,40	7,11	0,27	0,02
Kelkit Alt Havzası	87,21	1,98	9,92	0,87	0,02
Tersakan Alt Havzası	87,50	1,24	10,98	0,26	0,02
Yukarı Yeşilirmak Alt Havzası	79,58	2,50	17,45	0,42	0,05

Tablo 2. Yeşilirmak havzasında bulunan illere ait işletme rezerv ve tahsis miktarları ile su tahsislerinin sektörel yüzde dağılımları (SYGM 2023- Yeşilirmak Havzası -Kuraklık Yönetim Planı)

İller	Yeraltı suyu işletme rezervi (hm ³ /yıl)	Toplam tahsis miktarları (hm ³ /yıl)	Sulama (%)	İçme ve kullanma (%)	Sanayi (%)
Tokat	321	113,44	19,58	68,78	11,64
Amasya	182,5	146,47	61,00	28,85	10,15
Samsun	159	56,68	21,93	44,62	33,45

Yeşilirmak Havzası içerisinde bulunan Amasya, Samsun ve Tokat illerine ait yeraltı suyu kullanım durumları Tablo 2'de görülmektedir. Amasya ili Yeşilirmak Havzası kısmında DSİ 2021 yılı sonu verilerine göre toplam tahsisin %61'i tarımsal sulama için, %28,85'i içme suyu için, %10,15'si sanayi suyu için gerçekleşmiştir. Toplam rezervin % 80,26'sının tahsisi yapıldığı görülmektedir. Samsun ili Yeşilirmak Havzası kısmında Toplam tahsisin %21,93'ü tarımsal sulama için, %44,62'si içme suyu için, %33,45'i sanayi suyu için gerçekleşmiştir. Toplam rezervin % 35,65'inin tahsisi yapıldığı görülmektedir. Tokat ilinin Yeşilirmak Havzası sınırlarında toplam tahsisin %19,58'i tarımsal sulama için, %68,78'i içme suyu için, %11,64'ü sanayi suyu için gerçekleşmiştir. Toplam rezervin % 35,34'ünün tahsisi yapılmıştır.

4.5 Yeraltı suyu çekiminde enerji verimliliği ve izleme

Yeraltı suyunun sondaj kuyuları yoluyla çekilmesi sırasında dikkat edilmesi gereken hususlar enerji kullanımında tasarruf sağlamaktadır. Öncelikli olarak yeraltı suyu statik ve dinamik su seviyelerinin doğru bir şekilde belirlenerek kuyudan

alınabilecek suyun aşırı çekime neden olmadan, kuyunun verebileceğinden fazlasını istemeden çekmek hem yeraltı su seviyesindeki düşümün sınırlı kalmasını hem de enerji kullanımında verimliliği sağlayacaktır. Su çekimi yapılan kuyuların zamanla debilerinin ve dinamik seviyelerinin değişmesi, mevcut pompa ve motorun kuyunun ilk açıldığı zamandaki verimini sağlamayacağından, pompa ve motor grubunun yeniden değerlendirilerek değiştirilmesi gerekebilecektir. Değişimin gerçekleştirilmemesi halinde daha yüksek enerji harcanacaktır. Bu nedenle kuyular ve pompa veriminin sürekli takip edilerek izlenmesi gerekmektedir.

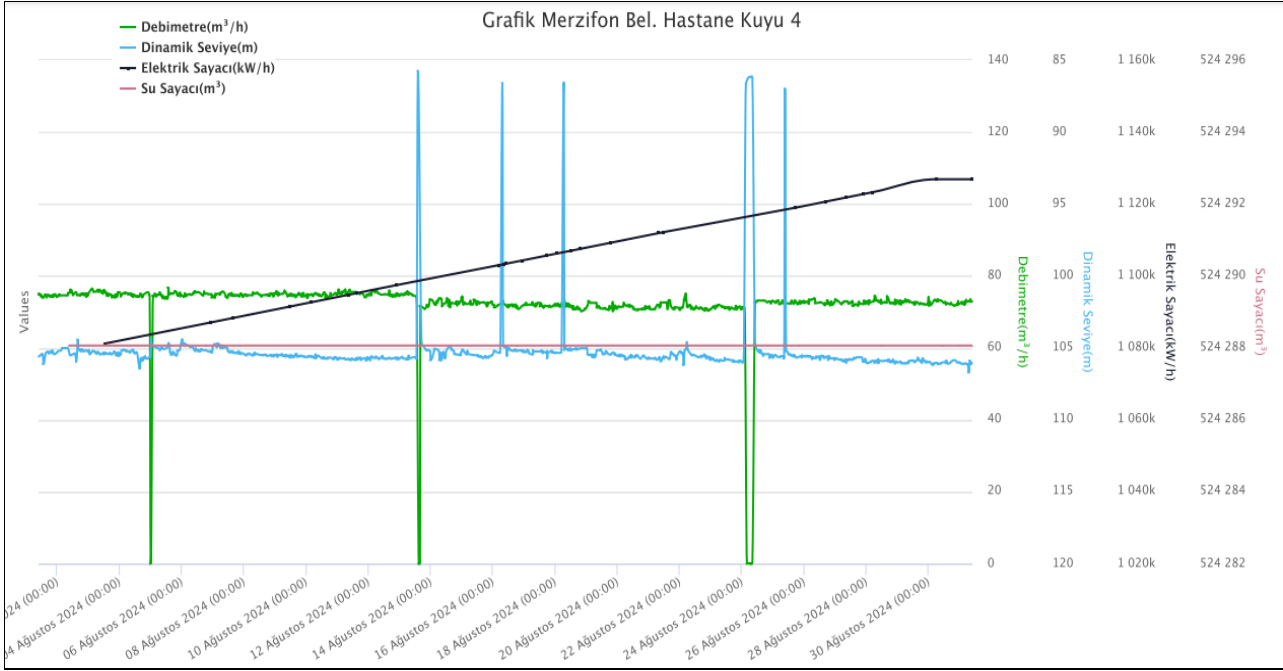
İzleme sondaj kuyusuna ait statik, dinamik seviyeler, debi, enerji, verim, elektrik ve su çekim sayacı gibi verilerin anlık ulaşılmasını sağlamalıdır. Uzun yıllara özgü raporlamaların alınması sistemin eksiklerinin ve durumunun gözlenmesine yardımcı olacaktır.

Şekil 4'te Yeşilirmak Havzası Amasya ili Merzifon Belediyesi sondaj kuyusuna ait 1 Ağustos 2024 ve 31 Ağustos 2024 tarihleri arasındaki debi, dinamik seviye, elektrik ve su sayacı verileri görülmektedir.

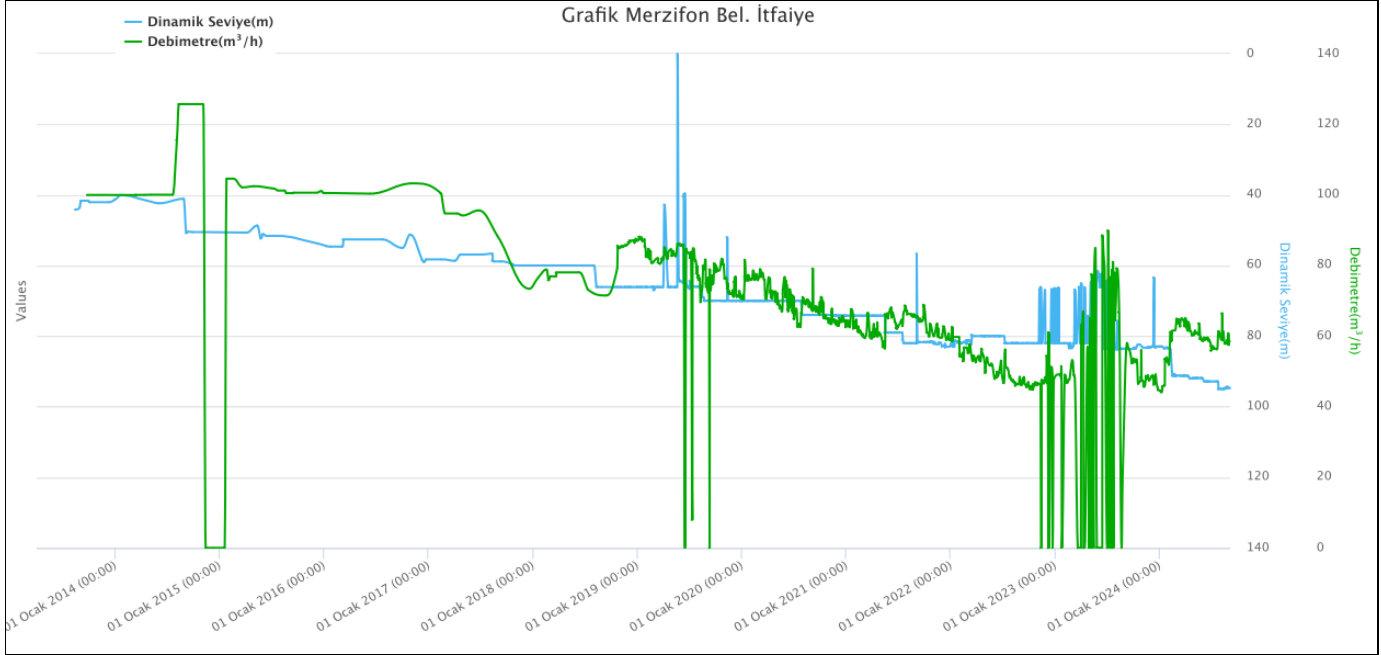
Şekil 5'te Yeşilirmak Havzası Merzifon ilçesinde açılmış içme

kullanma amaçlı sondaj kuyusuna ait 2013 ve 2024 yıllarına ait debi ve dinamik yeraltı su seviyesi verileri görülmektedir. 2013 yılında 41 m olan dinamik seviyede 100 m/h su çekilirken, 2024 yılında 95 m dinamik seviyeden 58 m/h su çekilebilmektedir. Bu izleme ile emniyetli yeraltı suyu çekimi

sınırlarının aşıldığı ve önlemlerin hızlıca uygulanması gerektiğini görülmektedir.



Şekil 4. Su sondaj kuyusuna ait veriler (Merzifon Belediyesi 2024).



Şekil 5. Su sondaj kuyusuna ait son 11 yıllık debi seviye verileri (Merzifon Belediyesi 2024).

4.6 Türkiye'de yeraltı suyu yönetiminin değerlendirilmesi

Türkiye'de tahsisten sorumlu kuruluş belli olmakla birlikte işlevleri yerine getirmek için yeraltı suyu yönetimine yönlendirilecek finansal kaynak olmadığı görülmektedir. Hem yüzey hem yeraltı suyu kaynakları için uzun vadeli bir havza planı su kullanımını çevresel olarak sürdürülebilir seviyelerde sınırlandırmalıdır. Yeraltı suyu kullanımı için verilen tahsislerin yıllık olarak aşılmayı aşmadığını belirleyen bir sistemin olmadığı görülmektedir. Havza bazında sondaj kuyularından çekilen su miktarı tespit edilemezken, çekilen su miktarı yerine Çevre Durum Raporlarında tahsis edilen su miktarlarının alınabileceği ifade edilmektedir.

Su kaynakları için yasal statünün varlığı görülmektedir. Yeraltı suyu kullanımında düzenlenmiş kullanıma geçilmiştir. Yeraltı suyu kullanımlarında kaynağa erişimi belirleme yetkisi tanımlanmıştır.

Su kaynaklarının mevcudiyet durumu ve kıtlığın yeterince anlaşılması görülmektedir. Yeraltı suyu potansiyeline yönelik, kalite durumlarına yönelik, kıtlık durumlarında tahsislerin nasıl düzenleneceğine yönelik tanımlamalar konusunda çalışmaların derinleştirilmesi gerektiği açıkça görülmektedir. Ayrıca bu bilgiler kamuoyunun anlayışını teşvik edecek şekilde kamuya açık hale getirilmelidir.

Yerinde gereklilikleri ve sürdürülebilir kullanımı yansıtan bir çekim üst sınırı bulunmamaktadır. Yeraltı suyu kaynaklarının

yalnızca bir kısmı (toplam stok ve akışlardan oluşan) işletilebilir olarak kabul edilmelidir. Bir su çekme sınırı belirlemek, çıkarılmayan kullanımları (ekosistem ihtiyaçları için akışlar, su kalitesinin korunması gibi) ve gelecekteki kullanımları karşılamak için akiferde bırakılması gereken su miktarının dikkate alınmasını gerektirmektedir. Optimum yeraltı suyu kullanımı, maliyetleri çıkararak faydaların mevcut değerini en üst düzeye çıkarır, bu da çıkarılan ve çıkarılmayan kullanımlar ile mevcut ve gelecekteki kullanımların dengelenmesini gerektirmektedir, bu duruma uygun düzenlemelerin yapılması gerekmektedir. Sürdürülebilir kullanım için mevcut yeraltı suyu miktarına ilişkin hem politika ile ilgili hem de teknik sınırlamalar tanınmalıdır. Teknik kısıtlamalar, pompalama maliyetleri faydaları aştığında ekonomik olarak uygulanabilir su çekmeyi sınırlamalıdır. Politika ile ilgili sınırlamalar, bağlı yüzey su kütlelerinin taban akışını sağlamak için asgari akışlarla ilgili yükümlülükleri, çevresel akışları, çökmeyi veya kalite bozulmasını önlemek için yeraltı suyu stokunu korumayı içermelidir.

Su Tahsisleri Hakkında Yönetmelikle su kullanım amaçlarında öncelik sıralaması yapılmasına rağmen suyun temel kullanımlar için sağlanmasını garanti altına alan kısıtlı riskinin etkin ve adil bir şekilde yönetilmesini sağlayacak etkili bir yaklaşımın, planlamaların bulunmadığı görülmektedir. Yüzey ve yeraltı suyunun birbiri yerine kullanılabilirliği durumlarda temel kullanımlar için erişimin güvence altına alınması birlikte yönetilmelidir.

Kuraklık ve yoğun kirlilik gibi istisnai durumların yönetilmesinde belirlenmiş düzenlemelerin hızlandırılması gerekmektedir. Kuraklık yüzey suyunun mevcudiyetini sınırladığında kullanıcılar yeraltı suyu pompalamasına olan bağımlılıklarını artırabilir. Ciddi bir kirlilik olayı, yüzey suyunu veya yeraltı suyu kaynaklarını etkileyebilir. Bunlara ilişkin tanımlamalar yapılarak sorumlu otoriteler belirlenmelidir.

Yeni su kullanıcıları ile baş edilmesi veya mevcut kullanıcıların haklarını artırmak ya da değiştirmek için aktif bir sürecin olmadığı görülmektedir. Tamamen tahsisin gerçekleştirildiği kapalı bir yeraltı su kaynağında yeni bir katılımcının kaynaktan su çekme konusunda bir çıkar elde etmesinin veya mevcut bir kullanımın mevcut bir hakkı genişletmesinin tek yolu, başka bir kullanıcının eşdeğer miktardaki kullanımdan vazgeçmesini sağlamak ve böylece su hakkını yeni katılımcıya veya hakkı genişleten mevcut kullanıcıya devretmektir. Buna ilişkin düzenlemenin olmadığı bir bölgede bu durum kaçak sondaj kuyularından su çekilerek sağlanacağı açıktır.

Su kaynağı üzerindeki baskı seviyesini yansıtan kaynak, ekosistem gereksinimleri, çekimler ve yeniden doldurma için uygun bir izleme seviyesini hedefleyen bir tahsis rejimi uygulanmalıdır. Sıkı izleme, her kullanıcı tarafından alınan su hacminin izlenmesini gerektirmektedir. Bunun için sayaçların, sayaç okumanın ve muhasebe protokollerinin kurulması gerekmektedir. Kaynak kullanımının ve su haklarının izlenmesini desteklemek için su kullanımını ve tüketimini, kiralama ve ticareti (izin verildiği yerlerde) izleyen uygun muhasebe düzenlemeleri yapılmalıdır. Para cezaları veya su haklarının kısıtlanması gibi uygun yaptırımlar uygulanmalı ve gerektiği gibi uygulanmalıdır.

Yeraltı suyu kullanımında tasarrufa yönelen teşviklerin uygulanması gerekmektedir. Örneğin tarımsal sulamada salma sulama yönteminden kapalı sulama sistemlerine geçiş yapan kullanıcılara elektrik tarife düzenlemesi yapılması, kayıp kaçak oranını dünya ortalamalarına düşüren içme ve kullanma suyu şebekelerinde benzer teşviklerin uygulanması yanında su çekimlerinin de takip edilmesi yeraltı suyu çekim miktarında azalmaya neden olacaktır.

Su haklarının yasal bir tanımı bulunmamaktadır. Tahsis

rejiminin esnekliğini artırmak için su haklarını mevcut kaynağın bir oranı veya bir hissesi olarak tanımlamak değişen koşullarda yanıt verme esnekliğini sağlayacaktır. Su hakkının uzun süreli tanımlanması uzun vadeli yatırımı teşvik edecektir. Kaynağın kullanılabilirliğiyle ilgili belirsizlik derecesi ve çekmenin olası olumsuz etkileri de hakkın süresinde bildirilmelidir. Kaynak kullanılabilirliğiyle ilgili daha yüksek düzeyde belirsizlik, kaynağın daha fazla izlenmesine olanak sağlamak için daha kısa bir süreyi gerektirmektedir.

Geri akışlar ve deşarjlarla ilgili yükümlülükler bulunmamaktadır. Çekilen suyun brüt miktarı yerine tüketilen suyun net miktarını tanımlanmalıdır. Çekilen ancak bir kısmını yeniden besleme yoluyla sisteme geri döndüren suyun muhasebeleştirilmesi gerekmektedir. Özellikle, sulama verimliliğindeki iyileştirmeler yeraltı suyu yeniden beslemesini önemli ölçüde azaltabilmektedir. Geri akışların yeraltı suyu üzerindeki etkisini değerlendirirken, yeniden beslemenin akifer özelliklerinden etkileneneği kabul edilmelidir.

Su kullanıcılarının rejimin tahsis verimliliğini artırmak için suyu kendi aralarında yeniden tahsis etmelerine izin vermesine yönelik düzenlemelerin bulunmadığı görülmektedir. Su hakkı sahiplerinin su haklarını ticaret etmelerine, kiralama veya devretmelerine izin vermek, tahsis ve kaynak kullanımında verimliliği artırabilmektedir. Bu düzenleme kaynağın genel sınırlarıyla tutarlı olmalıdır. Su haklarının ticareti, kiralama veya devri mümkün olduğunda, işlemleri kolaylaştırmak için net kurallar olmalıdır. Kullanılmayan su haklarının gönüllü olarak kaybedilmesi sağlanmalıdır. Su hakkı ve tahsislerinin ticareti, kiralama veya devriyle ilgili işlem maliyetleri mümkün olduğunca düşük tutulmalıdır.

5. Sonuç

Yeraltı su kaynakları kullanılabilir suyun önemli bir kısmını oluşturmaktadır. Ancak bu kaynağın kalite ve miktar yönünden baskı altında olması bir takım tedbirlerin program dâhilinde belirlenerek uygulanmasını gerektirmektedir. Türkiye'de yeraltı su kaynaklarının korunmasında görev alan en önemli kurumlardan olan DSİ ve SYGM çalışmalarına ek olarak uygulamada yeraltı suyu miktarının ve kalitesinin kontrol altına alınmasına yönelik çalışmaların bir an önce hızlandırılması önem arz etmektedir. Aksi takdirde yağış rejimlerinin değişmesi, artan su kullanımı baskısı yetersiz ve kalitesiz su temini ile sonuçlanmaya doğru ilerlemektedir.

Öncelikle yeraltı suyu durumunun tespit edilebilmesi için havza bazında ve ülke genelinde izleme ağı oluşturularak çekilen su miktarı ve kalitesi yönelik verilerin netliğe kavuşması gerekmektedir. Özellikle incelenen raporlarda su rezervlerine ilişkin veriler bulunmasına rağmen, su çekim miktarlarına ait net verilerin bulunmadığı görülmüştür. Yeraltı suyu akiferlerine ait su rezerv ve çekim miktarları, kalite durumları hızlı bir şekilde kesinleştirildikten sonra su kullanımlarına göre yapılan tahsislerde bu durumlar dikkate alınarak, tahsislerin mevcut durumda kalması ve kısıtlanması gibi tedbirlerin uygulanmaya konması yeraltı suyunun korunmasında zaruri olacaktır. Buna yönelik yasal düzenlemelerin somut olarak belirlenerek yapılması gerekmektedir.

Özellikle yeraltı suyu kullanımının yoğun olduğu tarımsal sulama sistemleri ve içme kullanma şebekelerindeki kayıpların önlenmesine yönelik somut adımların hızlı bir şekilde atılması zorunludur. Salma sulama yöntemiyle sulama yapılan alan miktarının Yeşilirmak Havzasında sulanan alanların %86,68'sini oluşturduğu ve toplam su ihtiyacının mevcutta %83,68'inin tarımda olduğu göz önüne alındığında bu alanda reformun gerekliliği aşikârdır. Örneğin kapalı sulama sistemlerine geçenlerde elektrik tarifelerinde, salma sulama yapanlara göre teşvik oluşturduğu bir elektrik tarifesi

ile bu hızlandırılabilir. Ya da su miktarının artırılması amacıyla yenileme kuyusu açmak isteyen sulama yönetimlerinde salma sulama yöntemi sonlandırılması durumunda yenileme belgesinin düzenlenmesi koşulu getirilebilir. Ya da tüm tarımsal işletmelerin işletmecilik gerçeklerine uygun çalışmalarını sağlayacak idari bir yapılanma ihtiyacı olduğu açıkça görülmektedir. Ayrıca içme suyu şebekelerinde yeraltı suyu kullanan yerel idarelerin kayıplarının kabul edilebilir düzeylere çekilmesi her ne kadar ilgili yönetmelikte belirlenerek sürekli son gerçekleştirilme tarihi güncellense de kayıp düzeylerinin azaltılmasına yönelik ülke çapında reform niteliğinde düzenlemelerle su ve kanalizasyon idarelerinin işletme tarzlarının değiştirilmesine yönelik adımların atılması zorunlu görülmektedir.

Havza bazında kaçak kuyu açılmasının önlenmesi veya kontrol edilmesine yönelik çalışmalar yapılmalıdır. Belgeli ve belgesiz mevcut kuyuların envanteri çıkarılmalıdır. Su tüketimleri kontrol altına alınmalıdır. Bunun gerçekleştirilmesi için havza bazında yerel su kolluk kuvvetleri oluşturulmalıdır. Gerekli mevzuat düzenlemeleri, çalışma koşulları oluşturularak sondaj kuyuları kontrol altına alınmalıdır.

İlgili havzada tedbirler programı belirlendikten sonra maliyetlerin karşılanması için çevre ve kaynak maliyetlerinin tazmin edilmesini içselleştirecek adımlar atılması gerekmektedir. Tüm havzalarda tespit edilecek yeraltı suyu koruma tedbirlerinin uygulanması için gerekli olan finansmanın karşılanmasında yeraltı suyu çekenlerden m³ başına alınacak ve sadece yeraltı suyunun sürdürülebilir yönetiminde kullanacak bir vergi veya ücret alınması ve buna yönelik düzenlemelerin yapılması esas görünmektedir. Toplanan bu paralarla yeraltı suyu kalite ve miktarının izlenmesi, tüm yeraltı suyu potansiyelinin belirlenmesine yönelik çalışmalar, planlama çalışmaları gibi çalışmalara ilişkin maliyetler karşılanmalıdır. Hem yüzey hem yeraltı suyu için vergilendirme planları mevcut kaynakların aşırı sömürülmesini önleyecektir.

Yeraltı suyunun kalite ve miktar açısından sürdürülebilir yönetimini sağlamak için arazi kullanım değişikliklerini kontrol etmek önemlidir. Bu kapsamda yeniden şarjı destekleyen uygulamalar, yüzeylerin geçirgenliğini artıran kentleşme uygulamaları, diğer kentsel kullanımlar yerine tarımı sürdürme teşvikleri önemli kaldıraçlardır. İçme kullanma su temini havzalarında, tarımsal uygulamalara ilişkin kurallar potansiyel kirleticilerin kullanımını sınırlandırabilir. Ayrıca daha düşük su talebi olan ürünler için kurallar ve ekonomik teşvikler su çekimini azaltabilecektir.

Maliyetlere ilişkin düzenlemelerin karşılanmasında ortaya zorlukların çıkması muhtemeldir. Bu zorlukların aşılmasında halkın katılımı toplantıları düzenlenerek bilgilendirme yapılmalıdır. Yeraltı suyu politikalarının önceliklendirilmesi için halk tarafından desteğe ihtiyaç vardır. Halkın yeraltı suyu kaynağı miktarı ve kalitesi gibi konularda gerçeklerle yüzleştirilmesi halk desteğinin sağlanmasında katkı sağlayabilecektir. Yapılacak ve uygulanacak projelerde halkın katılımının sağlanması bu hususta önemli olacaktır.

Yeraltı suyundan elde edilen faydalar birçok biçimde olabilir: içme suyu temini, endüstri ve sulama için üretken kullanımlardan elde edilen ekonomik değerden, yeraltı suyuna bağımlı ekosistemlerde çeşitli türlerin desteklenmesiyle sağlanan ekolojik değere ve yeraltı suyunun gelecekteki su kıtlıklarına karşı bir tampon olarak depolanmasının seçenek değerine kadar. Yeraltı suyu tahsis politikalarının bu farklı türdeki değerleri hesaba katması, mevcut ve gelecek nesillerin ihtiyaçlarını dengeleyecek şekilde belirlenmesi gerekmektedir.

Makale araştırma ve yayın etiğine uygun olarak hazırlanmıştır.

7. Kaynaklar

- ARCADIS (2012). The Role of Water Pricing and Water Allocation in Agriculture in Delivering Sustainable Water use in Europe. Project number 11589. European Commission, Brussels, Belgium.
- Badiani, R., Jessoe, K.K. & Plant, S. (2012). Development and the environment: the implications of agricultural electricity subsidies in India. *J Environ Dev* 21(2):244–262.
- Barker, I. (2016). UK Environment Agency. personal communication.
- Barlow, P.M. & Reichard, E.G. (2010). Saltwater intrusion in coastal regions of North America. *Hydrogeol J* 18(1):247–260
- Berbel, J., Pedraza, V., & Giannoccaro, G. (2013). The trajectory towards basin closure of a European river: Guadalquivir. *International Journal of River Basin Management*, 11(1), 111-119. Berbel, J.,
- Borrego-Marin, M. M., Exposito, A., Giannoccaro, G., Montilla-Lopez, N. M., & Roseta-Palma, C. (2019). Analysis of irrigation water tariffs and taxes in Europe. *Water Policy*, 21(4), 806-825.
- Berbel, J., & Expósito, A. (2020). The theory and practice of water pricing and cost recovery in the Water Framework Directive. *Water Alternatives*, 13(3), 659- 673.
- BMUB (2016). Water Framework Directive – The Status of German Waters 2015. Umweltbundesamt, Dessau, Germany.
- Damaneh, H. E., Gh, Z., Salajeghe, A., Ghorbani, M., & Khosravi, H. (2018). Assessing the effect of land use changes on groundwater quality and quantity (Case study: west basin of Jazmoryan wetland). *Journal of Range and Watershed Management*, 71(3), 1.
- Danmarks Statistik (2015), “Vandregnskap 2014: Geografi, miljø og energi” [Water accounts 2014: Geography, environment and energy], Statistics Denmark.
- Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü (2024). <https://www.dsi.gov.tr/>.
- EC (2012). Communication from the Commission to the European Parliament, the Council the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions: report on the review of the European water scarcity and droughts policy. COM (2012) 672, Brussels
- EC (2015). Water Framework Directive and the Floods Directive: Actions Towards the ‘ Good Status’ of EU Water and to Reduce Flood Risks. Report on the Progress in Implementation of the Water Framework Directive Programmes of Measures. SWD (2015) 50 Final. Brussels, Belgium.
- Ferguson, G. & Gleeson, T. (2012). Vulnerability of coastal aquifers to groundwater use and climate change. *Nat Clim Chang* 2(5):342–345.
- Freeman, D. (2011). Implementing the Endangered Species Act in the Platte Basin water commons. University

Press of Colorado, Boulder

GEF, World Bank, UNESCO-IHP, FAO & IAH (2015). Global groundwater governance a call to action: a shared vision for 2030.

Geoscience Australia, (2010). Assessing the need to revise the guidelines for groundwater protection in Australia: a review report. Geoscience Australia.

GEUS (2010). Water Supply in Denmark. Denmark.

Golovina, E., & Karennik, K. (2021). Modern trends in the field of solving transboundary problems in groundwater extraction. *Resources*, 10(10), 107.

Grafton, R. Q., & Hussey, K. (Eds.). (2011). *Water resources planning and management*. Cambridge University Press.

Grönwall, J. (2014). "Power to segregate: improving electricity access and reducing demand in rural India", Stockholm International Water Institute, Paper 23.

Jakeman, A. J., Barreteau, O., Hunt, R. J., Rinaudo, J. D., & Ross, A. (2016). *Integrated groundwater management* (p. 762). Springer Nature.

Hou, L., Zhou, Z., Wang, R., Li, J., Dong, F., & Liu, J. (2022). Research on the non-point source pollution characteristics of important drinking water sources. *Water*, 14(2), 211.

Huang, S., Krysanova, V., & Hattermann, F. (2015). Projections of climate change impacts on floods and droughts in Germany using an ensemble of climate change scenarios. *Regional Environmental Change*, 15, 461-473.

Hunt, R.J., Borchardt, M.A., Richards, K.D., & Spencer S.K. (2010). Assessment of sewer source contamination of drinking water wells using tracers and human enteric viruses. *Environ Sci Technol* 44(20):7956–7963.

Hussey, K. & Kay, E. (2015). The opportunities and challenges of implementing water sensitive urban design: lessons from stormwater management in Victoria, Australia.

Hunt, R. J., Rinaudo, J. D., & Ross, A. (2016). *Integrated groundwater management* (p. 762). Springer Nature.

Kløve, B., Ala-Aho, P., Bertrand, G., Gurdak, J. J., Kupfersberger, H., Kværner, J. & Pulido-Velazquez, M. (2014). Climate change impacts on groundwater and dependent ecosystems. *Journal of Hydrology*, 518, 250-266.

Liefferink, D. (2011). The EU water framework directive: a multi-dimensional analysis of implementation and domestic impact. *Land Use Policy* 28:712–722.

Maupin, M.A. (2014). Estimated use of water in the United States in 2010: U.S. Geological Survey Circular 1405, 56 p.

Nelson, R. (2012) Submission to house of representatives standing committee on regional Australia's inquiry on certain matters relating to the proposed Murray Darling Basin plan: groundwater SDLs. Parliament of Australia, Canberra.

Neuman, J. (2010). Are we there yet? Weary travellers on the long road to water policy reform. *Nat Resour J* 50:139–166.

Oeztan, M. & Axelrod, M. (2011). Sustainable transboundary groundwater management under shifting political scenarios: the Ceylanpınar Aquifer and Turkey-Syria relations. *Water Int* 36(5): 671–685.

Organisation for Economic Co-Operation and Development, (2017). Groundwater allocation: managing growing pressures on quantity and quality (pp. 116-pp).

Pittock, J., Williams, J., & Grafton, R. (2015). The Murray-Darling Basin plan fails to deal adequately with climate change. *Water: Journal of the Australian Water Association*, 42(6), 28-32.

Ross, A. (2012). Water connecting people adapting: integrated surface water and groundwater management in the Murray-Darling Basin, Colorado and Idaho. Australian National University, Canberra.

Schuerhoff, M., Weikard, H.P. & Zetland, D. (2013). The life and death of Dutch groundwater tax. *Water Policy* 15(6), 1064–1077.

Shah, T. (2014). Towards a managed aquifer recharge strategy for Gujarat India: an economist's dialogue with hydro-geologists. *J Hydrol* 518:94–107.

Taylor, R. G., Scanlon, B., Döll, P., Rodell, M., Van Beek, R., Wada, Y., & Treidel, H. (2013). Ground water and climate change. *Nature climate change*, 3(4), 322-329.

T.C. Çevre Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı. 2023 İl Çevre Durum Raporları. <https://ced.csb.gov.tr/2023-yili-il-cevre-durum-raporlari-i-112399>.

T.C. Merzifon Belediyesi. 2024. Gözetleyici Kontrol ve Veri Toplama Sistemi.

T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı Su Yönetimi Genel Müdürlüğü (SYGM). Yeşilirmak Nehir Havzası Yönetim Planı (NHYP). <https://www.tarimorman.gov.tr/SYGM/Sayfalar/Detay.aspx?SayfaId=49>.

T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı Su Yönetimi Genel Müdürlüğü (SYGM). Yeşilirmak Havzası Kuraklık Yönetim Planı 2023. [www.tarimorman.gov.tr/SYGM/Belgeler/Kuraklık%20Yönetim%20Planları](http://www.tarimorman.gov.tr/SYGM/Belgeler/Kuraklik%20Yonetim%20Planlari).

TÜİK (2024). <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Su-ve-Atiksu-Istatistikleri-2022-49607>. Erişim tarihi: 09.08.2024. Erişim saati: 10:55.

Tzampoglou, P., Ilija, I., Karalis, K., Tsangaratos, P., Zhao, X., & Chen, W. (2023). Selected worldwide cases of land subsidence due to groundwater withdrawal. *Water*, 15(6), 1094.

UK Environment Agency (2016). "Managing water abstraction", UK Environment Agency, Bristol.

Wada, Y. & Heinrich, L. (2013). Assessment of transboundary aquifers of the world-vulnerability arising from human water use. *Environ Res Lett* 8(2).

- Wada, Y., Van Beek, L. P., Van Kempen, C. M., Reckman, J. W., Vasak, S., & Bierkens, M. F. (2010). Global depletion of groundwater resources. *Geophysical research letters*, 37(20).
- Wang, J., Zhang, L., Huang, Q., Huang, J., & Rozelle, S. (2014). Assessment of the development of groundwater market in rural China. *Water Markets for the 21st Century: What Have We Learned?*, 263-282.
- Wang, J. et al. (2016). *Managing Water on China's Farms: Institutions, Policies and the Transformation of Irrigation under Scarcity*, Academic Press, Elsevier.
- Wijnen, M. et al (2012). *Managing the invisible: understanding and improving groundwater governance*. World Bank, Washington, DC.

ARAŞTIRMA MAKALESİ

UI Green Metric Sıralamasındaki Türkiye Üniversitelerinin Enerji ve İklim Değişikliği Stratejileri

Ceydanur SARIKOÇ¹, Nihan ENGİN²

Yazışma yazarı:

Ceydanur SARIKOÇ,
ckuduban@hotmail.com¹Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mimarlık Fakültesi, Mimarlık Bölümü, Trabzon, Türkiye.

ORCID: 0000-0001-7608-9855

²Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mimarlık Fakültesi, Mimarlık Bölümü, Trabzon, Türkiye.

ORCID: 0000-0003-1558-5577

Referans:

Sarıkoç, C. ve Engin, N. (2024). UI Green Metric Sıralamasındaki Türkiye Üniversitelerinin Enerji ve İklim Değişikliği Stratejileri, *Çevre, İklim ve Sürdürülebilirlik*, 25(2), 111-122.Makale Gönderimi : 23 EYLÜL 2024
Online Kabul : 31 ARALIK 2024
Online Basım : 31 ARALIK 2024

Özet Sürdürülebilir bina değerlendirme sistemleri, farklı işlevlere sahip yapıları veya belirli bir amaca yönelik tasarımları analiz etmek üzere oluşturulmuştur. UI Green Metric Dünya Üniversite Sürdürülebilirlik Sıralaması, çevresel, ekonomik ve sosyal eşitlik temellerine dayanır ve üniversitelerde sürdürülebilirlik uygulamalarını değerlendirmeyi hedefler. Eğitimde sürdürülebilirlik, kampüs alanlarının çevre dostu düzenlenmesi, sosyal değişimin teşvik edilmesi, üniversitelerin kendi performanslarını değerlendirebilmeleri ve toplumun sürdürülebilirlik konusunda bilinçlendirilmesi gibi önemli amaçlara hizmet eder. Değerlendirme kriterleri, yerleşim ve alt yapı, enerji ve iklim değişikliği, eğitim ve araştırma, ulaşım, su ve atık ana başlıklarından oluşur. Bu çalışmada iklim-enerji ilişkisi görülmek istenmiş, bu nedenle UI Green Metric Dünya Üniversite Sürdürülebilirlik Sıralamasında %21 ile kategoriler içindeki en yüksek yüzdeleri dilime sahip olan enerji ve iklim değişikliği kategorisindeki uygulamaların, iklim farklılıklarına göre değişimi ele alınmıştır. Türkiye'de 2022 yılında bu değerlendirme sistemine sahip olan seksen üç üniversiteden, sürdürülebilirlik raporlarına ulaşılan on dokuz üniversite bu bağlamda değerlendirilmiştir. Türkiye'deki beş farklı iklim bölgesinde yer alan bu on dokuz üniversitenin enerji ve iklim değişikliği kategorisindeki uygulamaları, UI Green Metric ve Türkiye'deki enerji yönetmelikleri üzerinden analiz edilmiştir. Çalışma sonucunda, iklim koşulları, enerji tasarrufu, renovasyon ve maliyet gibi faktörlerin üniversitelerin sürdürülebilirlik çabalarını kısıtladığı görülmüştür. Ayrıca, yalnızca enerji ve iklim değişikliği değil, diğer kriterlerin de değerlendirmede önemli bir rol oynadığı belirlenmiştir. Mevcut yapı stoğu üzerinden bu değerlendirmeye giren üniversitelerin çoğunda, ısıtma ve soğutma ihtiyacı için bölgesel iklim koşullarını ele alan iklimsel tasarım yaklaşımlarının göz ardı edilebildiği görülmüştür. UI Green Metric'in enerji ve iklim değişikliğine yönelik alt kriterlerde de iklimsel tasarıma yönelik pasif uygulama çalışmalarının daha az yer tuttuğu gözlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Enerji ve İklim Değişikliği, Sürdürülebilir Bina Değerlendirme Sistemleri, UI Green Metric

Energy and Climate Change Strategies of Turkish Universities in UI Green Metric Rankings

Abstract Sustainable building assessment systems have been created to analyze structures with different functions or designs for a specific purpose. The UI Green Metric World University Sustainability Ranking is based on the foundations of environmental, economic and social equality and aims to evaluate sustainability practices in universities. Sustainability in education serves important purposes such as environmentally friendly arrangement of campus areas, promotion of social change, universities' ability to evaluate their own performance and raising awareness of society about sustainability. The evaluation criteria consist of the main headings of settlement and infrastructure, energy and climate change, education and research, transportation, water and waste. This study aimed to see the climate-energy relationship, therefore, the change in the applications in the energy and climate change category, which has the highest percentage in the categories with 21% in the UI Green Metric World University Sustainability Ranking, was addressed according to climate differences. Nineteen universities, out of eighty-three universities in Turkey that have this evaluation system in 2022, whose sustainability reports were available, were evaluated in this context. The applications of these nineteen universities located in five different climate zones in Turkey in the energy and climate change category were analyzed through UI Green Metric and energy regulations in Turkey. As a result of the study, it was seen that factors such as climate conditions, energy saving, renovation and cost limit the sustainability efforts of universities. In addition, it was determined that not only energy and climate change, but also other criteria play an important role in the evaluation. It was observed that climatic design approaches that address regional climate conditions for heating and cooling needs can be ignored in most of the universities included in this evaluation based on the existing building stock. It has been observed that passive application studies on climatic design have less place in the sub-criteria of UI Green Metric regarding energy and climate change.

Keywords: Energy and Climate Change, Sustainable Building Rating Systems, UI Green Metric

1. Giriş

Üniversiteler, barındırdığı geniş nüfus ve gerçekleştirdiği çeşitli faaliyetler nedeniyle doğrudan veya dolaylı olarak belirli sorumluluklar üstlenmektedir. Sahip oldukları kişi sayısı ve işleyişi göz önünde bulundurulduğunda, üniversiteler küçük ölçekli kentler gibi düşünülebilir. Bu küçük ölçekli kentler, çeşitli çevre sorunlarına yol açabilir. Toplumun zamanla değişen ihtiyaçları, yükseköğretim kurumlarının yalnızca eğitim ve öğretimle sınırlı kalmayıp, aynı zamanda yeme-içme, dinlenme, barınma, sosyal etkinlikler, spor, sağlık ve idari hizmetler gibi farklı alanlarda da yeni gereksinimlerle karşılaşmasına neden olmuştur. Bu değişimle birlikte, üniversiteler artık kendi kendine yeterli olan ve genellikle kent merkezlerinden uzak konumlarda yer alan yerleşkeler haline gelmiştir.

Sürdürülebilirlik kavramı üniversitelerde ilk olarak 1990'lı yılların başında tanıtılmaya başlanmıştır. 2000 yılından itibaren bu kavram daha fazla kabul görmüş ve çeşitli uygulamalar hayata geçirilmiştir. 2010'dan sonra 'yeşil üniversite', 'yeşil kampüs' ve 'yeşil müfredat' gibi kavramlar daha fazla dikkat çekmiştir. Bu artan farkındalık, üniversitelerin sadece eğitim ve öğretim süreçlerinde değil, aynı zamanda altyapı ve yönetimlerinde de çevreye duyarlı bir yapıya dönüşmelerine olanak sağlamıştır. Ders içeriklerinde ve uygulamalarda da sürdürülebilirlik hedefleri belirgin hale gelmiştir (Atıcı vd., 2021).

Enerji, iş yapma kapasitesini ifade eder ve yenilenebilir (tükenmeyen doğal kaynaklar) ile yenilenemez (fosil yakıtlar ve nükleer enerji) olarak sınıflandırılmaktadır. Fosil yakıtlar yüksek karbon emisyonuna sahiptir ve çevreye zarar vermektedir. 2022 yılında, emisyonlardaki en büyük artış elektrik ve ısı üretimi sektöründe yaşanmıştır. Bu sektörün emisyonları %1,8 (261 Mt) artarak 14,6 Gt ile rekor seviyeye ulaşmıştır. İklim değişikliği, kontrolsüz insan faaliyetlerinin bir sonucu olarak meydana gelmektedir ve küresel ısınma ile ilgili etkiler, insan sağlığı, toplum ve ekonomi üzerinde birbirini etkileyen sonuçlar doğurmaktadır. İklim değişikliği, enerji tüketimini de artırmaktadır; aşırı ısınan bir ortamın soğutulması veya aşırı soğuyan bir mekanın ısıtılması, enerji tüketimini daha da yükseltmektedir. Yapı sektöründe, mekanların ısıtılması ve soğutulması enerji tüketimini artırırken çevreye zararlı emisyonları da yükseltmektedir. Ancak yenilenebilir enerji kaynaklarının daha yaygın kullanımı, karbon salınım yoğunluğunda azalma sağlamıştır (Sümertaş, 2021; URL-20). Sera gazı emisyonlarının çoğu, fosil yakıtların enerji üretiminde kullanılması sonucu ortaya çıkan katı ve gaz halindeki atıklardan kaynaklanmaktadır. Bu durum, enerji sektörü ile iklim değişikliği arasındaki bağlantıyı göstermektedir (Çoban & Şahbaz Kılınc, 2015). Sürdürülebilir bina değerlendirme sistemlerinde en yüksek puan genellikle enerji kategorisine verilmektedir. LEED'de enerji başlığı toplam puanın %24,7'sini, BREEAM'de %19'unu, SBtool'da %23'ünü, Green Star'da ise %18'ini oluşturarak öne çıkmaktadır. Oranlara bakıldığında sürdürülebilir binalar için enerji kavramının önemi görülmektedir.

Üniversite yerleşkeleri, eğitim sektöründe önemli bir rol üstlenen ve sürekli faaliyet gösteren kurumlardır. Bu yerleşkelerdeki binaların çeşitliliği, enerji ve su tüketiminin yüksek olmasına, ayrıca büyük miktarda kimyasal ve kimyasal olmayan atık üretimine yol açmaktadır. Bu

bağlamda üniversite yerleşkeleri tükenebilir kaynaklar yerine yenilenebilir alternatifler kullanmayı, enerji, su ve malzeme verimliliğini artırmayı ve israfı engellemeyi hedeflemektedir. (Ruşen vd., 2018).

Bu çalışma, 2023 yılında teslim edilen Sarıkoç, 2023'e ait yüksek lisans tezi kapsamında gerçekleştirilmiş ve 2022 yılı verilerine dayanarak yapılmıştır. Araştırmada, UI Green Metric 2022 Dünya Üniversite Sürdürülebilirlik Sıralamasında yer alan ve beş farklı iklim bölgesindeki (soğuk, ılıman-nemli, ılıman-kuru, sıcak-nemli ve sıcak-kuru) on dokuz üniversitenin enerji ve iklim değişikliği kategorileri incelenmiştir. Bu üniversitelerin sürdürülebilirlik raporlarındaki enerji ve iklim değişikliği ile ilgili on altı kriter karşılaştırılarak, iklim farklılıklarının bu çözümler üzerindeki etkisi sorgulanmıştır.

Çalışma şu şekilde yapılandırılmıştır: 1. Bölüm "Giriş", 2. Bölüm ise "Eğitim Yapılarında Sürdürülebilir Bina Değerlendirme Sistemleri", "Eğitim yapıları, enerji ve iklim değişikliği ile ilgili yönetmelikler" ve "UI Green Metric Dünya Üniversite Sürdürülebilirlik Sıralaması"na dair literatür incelemesini içermektedir. 3. Bölümde araştırmanın amacı, yöntemi ve seçilen üniversitelerin analizleri yer almaktadır. 4. Bölüm bulgular ve irdemelerle, elde edilen veriler ışığında yapılan çıkarımları sunmaktadır. 5. ve son bölüm ise sonuçlar ve önerilerle çalışmayı tamamlamaktadır.

2. Literatür Taraması

2.1 Eğitim yapılarında sürdürülebilir bina değerlendirme sistemleri

Eğitim, bireylerin kimlik oluşumunda aileden sonra en önemli faktördür ve eğitim yapıları, fiziksel ve sosyal koşulların birey üzerinde büyük bir etkisi vardır. Bu yapılar, sağlıklı ve güvenli bir ortam sağlayarak kültürel iletişim ve öğrenme alanları olarak işlev görmektedir. Sürdürülebilirlik farkındalığı, eğitim yoluyla hem teorik hem de uygulamalı olarak kazandırılabilir. Eğitim yapılarında sürdürülebilirlik ölçütleri doğal aydınlatma, havalandırma, ısıtma-soğutma, iç hava kalitesi, su tasarrufu, akustik konfor ve çevre ile etkileşim gibi unsurları içermektedir. (Künyeli & Baydoğan, 2020).

Sürdürülebilirlik kavramının eğitimle ilişkisi ilk kez Stockholm Konferansı'nda kurulmuş, Tbilisi Konferansı'nda çevre eğitiminin amaçları belirlenmiştir. Talloires Deklarasyonu (1990) yükseköğretimde çevresel sürdürülebilirlik taahhüdünü ortaya koyarken, Halıfaks Deklarasyonu (1991) üniversitelerin çevre ve kalkınma konularındaki sorumluluklarını vurgulamıştır. Kyoto Deklarasyonu, üniversitelerde sürdürülebilirlik için uygulama planlarının önemini ifade ederken, Nagoya Deklarasyonu (2014) sürdürülebilir kalkınma için eğitimin aciliyetini ve 2015 sonrası öncelik listesindeki yerini vurgulamıştır. (Bilgili & Topal, 2021; URL-15).

Üniversitelerde sürdürülebilirlik uygulamalarını geliştirmeye yönelik çeşitli girişimler bulunmaktadır. Tablo 1'de eğitim yapıları kategorisine sahip sürdürülebilir değerlendirme sistemlerine yer verilmiştir.

Üniversiteler tarafından imzalanan sürdürülebilirlik deklarasyonlarında genellikle şu anahtar noktalar vurgulanmaktadır:

- Çevrenin korunması ve sürdürülebilir bir şekilde yönetilmesi,
- Sürdürülebilir yaklaşımlara yönelik üretim ve tüketim alışkanlıklarının dönüştürülmesi,

- Sürdürülebilirlik alanındaki araştırmaların desteklenmesi,
- Sürdürülebilirliğin her sektörde benimsenmesinin önemi,
- Özel sektör, sivil toplum kuruluşları ve kamu arasındaki işbirliğinin değeri (Darendelioğlu, 2020; Güngör Tanç vd, 2022).

Ulusal ve uluslararası sürdürülebilir bina değerlendirme

sistemlerine ek olarak, yalnızca üniversitelerin sürdürülebilirlik çabalarını değerlendiren, karşılaştıran ve sıralayan özel sistemler de vardır. Tablo 2’de eğitim yapılarını da inceleyen sürdürülebilir değerlendirme sistemleri gösterilmiştir. Bu araçların bazıları küresel ölçekte, bazıları ise bölgesel düzeyde kullanılmaktadır.

Tablo 1. Eğitim yapıları kategorisine sahip sürdürülebilir değerlendirme sistemleri

Adı	Ülkesi	Başlangıç Yılı	Kategori	Seviyeler
BREEAM	İngiltere	1990	Yönetim, Enerji, Su, Ulaşım, Sağlık ve konfor, Atık, Malzemeler, Arazi kullanımı ve ekoloji, Kirlilik, Yenilik.	Geçer (30-44 puan) İyi (35-54 puan) Çok İyi (55-69 puan) Mükemmel (70-84 puan) Seçkin (85 puan ve üstü)
CASBEE	Japonya	2001	İç mekan çevresi, Servis kalitesi, Arsada dış mekan çevresi, Enerji, Kaynaklar ve malzemeler, Arsa dışındaki çevre.	C (düşük) BEE = 0.5 den az B- (biraz düşük) BEE = 0.5 ~ 1.0 B+ (iyi) BEE = 1.0 ~ 1.5 A (çok iyi) BEE = 1.5 ~ 3.0 S (mükemmel) BEE = 3.0 veya üzeri Q = 50 veya üzeri
DNGB	Almanya	2008	Ekolojik nitelik, Ekonomik nitelik, Sosyo-kültürel ve İşlevsel nitelik Teknik nitelik, Sürecin niteliği, Konumun niteliği	Sertifika (*-35 puan) Bronz (35-50 puan) Gümüş (50-65 puan) Altın (65-80 puan)
GREEN STAR	Avustralya	2003	Enerji, Malzeme, İç mekan çevre kalitesi, Ulaşım, Yönetim, Su, Arazi kullanımı ve ekoloji, Kirlilik, Yenilik.	1 yıldız (10-19 puan) 2 yıldız (20-29 puan) 3 yıldız (30-44 puan) 4 yıldız (45-59 puan) 5 yıldız (60-74 puan) 6 yıldız (75-100 puan)
LEED	Amerika Birleşik Devletleri	1998	Yenilik ve tasarım, İç mekan hava kalitesi, Malzeme ve kaynaklar, Sürdürülebilir arsalar, Su etkinliği, Enerji ve atmosfer.	Sertifika (40-49 puan) Gümüş (50-59 puan) Altın (60-79 puan) Platin (80 puan ve üstü)
SBTool	Kanada	1998	İç mekan kalitesi, Enerji ve kaynak tüketimi, Çevresel yükler, Sosyal ve ekonomik esaslar, Kültürel ve algısal esaslar, Arsa seçimi, proje planlama ve geliştirme.	-1 (Olumsuz) 0 (Kabul Edilebilir) 3 (İyi Uygulama) 5 (En İyi Uygulama)
YeS-TR (Ulusal Yeşil Sertifika Sistemi)	Türkiye	2004	BBT (Bütünleşik Bina Tasarım, Yapım ve Yönetimi) YMD (Yapı Malzemesi ve Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi) İOK (İç Ortam Kalitesi) EKV (Enerji Kullanımı ve Verimliliği) SAY (Su ve Atık Yönetimi)	Geçer 32 – 39 İyi 40 - 54 Çok İyi 55 - 74 Ulusal Üstünlük > 74

Tablo 2. Sürdürülebilir üniversiteler için kullanılan değerlendirme sistemleri. (Caeiro vd., 2020; Chakraborty vd., 2021; Du vd., 2020; Gedikkaya Bal vd., 2022; Özdoğan & Civelekoğlu, 2018; Tosun, 2022; URL-16; URL-17; URL-18; URL-19)

Adı	Ülkesi	Başlangıç Yılı	Kurum/Kuruluş	Kategori
AASHE-STARs (The Sustainability Tracking, Assessment & Rating System)	Amerika	2008	Yüksek Öğretimde Sürdürülebilirliği Geliştirme Derneği (AASHE)	Akademik Performans Kilit aktörlerin katılımı Operasyonlar, Planlama ve yönetim, Yenilik ve liderlik,
AISHE (Auditing Instrument for Sustainability in Higher Education)	Hollanda	2000-2001	Hollanda Sürdürülebilir Yüksek Öğretim Vakfı	Kimlik Eğitim, Araştırma, Operasyonlar, Toplumsal Erişim.
SAQ (Sustainability Assessment Questionnaire for Colleges and Universities)		1999-2001	Sürdürülebilir Bir Gelecek için Üniversite Liderleri (ULSF)	Müfredat, Kampüs, Tesisler ve Operasyonlar, Topluma ulaşma ve hizmet, Öğrenci fırsatları, Yönetim, misyon ve planlama.
UI Green Metric Dünya Üniversite Sürdürülebilirlik Sıralaması	Endonezya	2010	Endonezya Üniversitesi	Yerleşim ve altyapı, Enerji ve iklim değişikliği, Atık, Su, Ulaşım, Eğitim ve araştırma.
ASGC (Assessment Standard for Green Campus)	Çin		Çin Şehir Araştırmaları Derneği (CSUS)	Planlama ve ekoloji, Enerji ve kaynaklar, Çevre ve sağlık, Eğitim ve yayılma.
ASSC (Assessment System for Sustainable Campus)	Japonya	2013	Hokkaido Üniversitesi	Yönetim, Eğitim ve araştırma, Çevre, Yerel toplum.
THE-Impact Ranking	İngiltere	2004	Times Higher Education (THE)	Öğretim (öğrenme ortamı), Araştırma ortamı (hacim, gelir ve itibar), Araştırma kalitesi (araştırmanın çıktıları), Endüstri (bilgi transferi) Uluslararası görünüm (personel, öğrenciler ve araştırma).
Üniversite Ligi (University League) Endeksi	İngiltere	2007	People & Planet	Sürdürülebilirlik politika ve stratejisi, Sürdürülebilirlikle ilgili insan kaynaklar, Çevresel denetimler, Etik yatırımlar, Karbon yönetimi, İşçi hakları, Sürdürülebilir beslenme, Öğrenci ve personel katılımı, Eğitim kalitesi, Enerji kaynakları, Atık yönetimi ve geri dönüşüm, Karbon salınımının azaltılması, Su kullanımının azaltılması.

Sürdürülebilir bina değerlendirme sistemleri, sürdürülebilirlik hedeflerini düzenli bir yapıda belirlemeyi amaçlamaktadır. Bu hedefler genellikle çeşitli kategoriler ve kriterler şeklinde sunulmaktadır. Üniversitelerin, bu değerlendirme sistemlerinin belirlediği kriterlere uyması beklenmektedir. Bu sistemlerin kullanımı, sürdürülebilirlik hedeflerinin nesnel ve etkili bir

şekilde gerçekleştirilmesine katkıda bulunur (Darendelioğlu, 2020).

Türkiye'de, İstanbul Teknik Üniversitesi (İTÜ) ve Çevre ve Şehircilik Bakanlığı tarafından ortaklaşa yürütülen YeS-TR (Ulusal Yeşil Sertifika Sistemi), iklimsel ve bölgesel koşullara

Çevre, İklim ve Sürdürülebilirlik

uygun, enerji ve su verimliliği sağlayan, yenilenebilir enerji kaynakları kullanan binaları ve yerleşimleri değerlendirmek ve belgelendirmek amacıyla geliştirilmiş ilk sürdürülebilir bina sertifikası sistemidir. Sistemin altyapısı 8 Kasım 2019'da oluşturularak çalışmalarına başlanmıştır (Darendelioğlu, 2020).

2.2 Eğitim yapıları, enerji ve iklim değişikliği ile ilgili Türkiye'deki yönetmelikler

Eğitim yapıları için küresel düzeyde tasarım rehberleri, eylem planları, eğitim programları ve değerlendirme sistemleri bulunmaktadır. Bu rehberler, yönetim ve tasarım süreçlerine rehberlik ederken, ülkelerin ilgili kurumları tarafından yayınlanan kılavuzlar, yapıların standartlara uygun üretilmesini sağlar. Kılavuzlar, tasarım, yeniden düzenleme, enerji tüketimi ve aydınlatma gibi ana başlıklar altında, yapıların çevresel etkilerine yönelik öneriler sunar (Çelik & Ünver, 2019).

Türkiye'de bu anlamda "Eğitim Yapıları Asgari Tasarım Standartları Kılavuzu" yürürlükte. Eğitim Yapıları Asgari Tasarım Standartları Kılavuzu'na göre, eğitim kurumlarının binaları, Milli Eğitim Bakanlığı tarafından çevrenin ve programların ihtiyaçlarına uygun şekilde planlanmaktadır ve inşa edilmektedir. Yeni yapı, ek bina ve tadilatlarda ilgili mevzuata uyulması şarttır. Tasarımda, kullanıcı ihtiyaçlarını karşılayan, esnek, yenilenebilir, sürdürülebilir, çevreye duyarlı ve konforlu çözümler önceliklidir. Tasarım kılavuzları, yapıların mekan, tip ve boyutlarının yanı sıra çevresel etkilerini de dikkate alarak kontrolsüz yapılaşmayı önlemektedir ve çevre üzerindeki olumsuz etkileri sınırlamaktadır. Fiziksel faktörler, yerleşim planlaması, bina tasarımı, açık alan düzenlemeleri, yapı malzemeleri ve teknik tesisat gibi unsurlar her bölgeye özgü değerlendirilmeli ve tasarıma dahil edilmelidir. (İnşaat, T. M. E. B., & Başkanlığı, 2015)

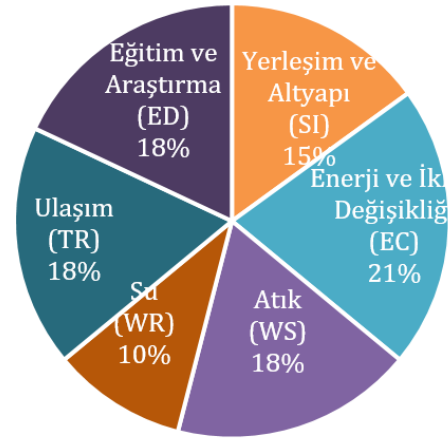
Yapı sektörü, enerji tüketimi ve çevreye zararlı madde salınımında en yüksek etkiye sahip alanlardan biridir. Eğitim yapılarında enerji tüketimini azaltmak amacıyla iklim ve çevresel koşullar göz önünde bulundurulmalıdır. Türkiye'de enerji verimliliğini artırmak için 1985 yılında "Isı Yalıtım Yönetmeliği" ve "TS 825 Binalarda Isı Yalıtım Kuralları" yürürlüğe girmiştir. Ayrıca, 2007 yılında "Enerji Verimliliği Kanunu" ve 2008 yılında "Binalarda Enerji Performansı Yönetmeliği" ile binaların enerji tüketimi ve kimlik belgesi düzenlemeleri zorunlu hale getirilmiştir. (Alveroğlu, 2022)

Kamu Binalarında Enerji Verimliliği (KABEV) projesi, Dünya Bankası fonuyla Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı tarafından Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı desteğiyle uygulanmaktadır. Proje, kamu binalarında enerji tüketimini ve giderlerini azaltmayı, sera gazı emisyonlarını düşürmeyi, sürdürülebilir finansman mekanizmaları oluşturmayı ve toplumsal farkındalığı artırmayı hedeflemektedir. Bina seçiminde, 2000 sonrası inşa edilmiş, son on yılda enerji verimliliği tadilatı yapılmamış ve mülkiyeti kamuya ait binalar önceliklidir. (URL-21)

2.3 UI Green Metric dünya üniversite sürdürülebilirlik sıralaması

2010 yılında Endonezya Üniversitesi tarafından başlatılan UI Green Metric Dünya Üniversite Sürdürülebilirlik Sıralaması, dünya çapındaki üniversitelerin yeşil kampüs ve sürdürülebilirlik çabalarını değerlendirmeyi amaçlayan bir

girişimdir. Bu sıralama sistemi, üniversitelerin sürdürülebilirlik uygulamaları ve yeşil kampüs performanslarını ölçmek için kullanılmaktadır (Gómez, Sáez-Navarrete, Lioi, & Marzuca, 2015). UI Green Metric Dünya Üniversite Sürdürülebilirlik, üniversitelerin her yıl sağladığı anket verilerine dayanarak yapılmaktadır. Bu veriler, Mayıs ile Ekim ayları arasında toplanır ve Aralık ayında güncellenip web sitelerinde yayınlanmaktadır (Atıcı vd., 2021). UI Green Metric Dünya Üniversite Sürdürülebilirlik Sıralamasına dahil olmak isteyen üniversiteler, yeşil kampüs taahhütlerini desteklemek amacıyla çeşitli kriterlere göre sayısal veriler sunmalıdır. Bu kriterler yerleşim ve Alt yapı, Enerji ve İklim Değişikliği, Eğitim ve Araştırma, Ulaşım, Su ve Atık ana başlıklarından oluşmaktadır. Enerji kullanımı ve iklim değişikliği ile ilgili çabalar, değerlendirme sisteminin en önemli bölümlerini oluşturmaktadır. Şekil 1'de UI Green Metric Dünya Üniversite Sürdürülebilirlik Sıralaması kategorilerinin yüzdelik dağılımı gösterilmiştir. Bu dağılımda Enerji ve İklim Değişikliği kategorisinin, kategoriler içindeki en yüksek yüzdelik dilim olan 21 olduğu görülmektedir.



Şekil 1. UI Green Metric Dünya Üniversite Sürdürülebilirlik Sıralaması kategorilerinin yüzdelik dağılımı (Sarkoç, 2023)

UI Green Metric Dünya Üniversite Sürdürülebilirlik Sıralaması'na birçok ülkeden katılım sağlanmaktadır. Bu sistem, sürdürülebilirlik çalışmaları için yükseköğretim kurumlarına rehberlik sağlamakta, öz değerlendirme fırsatları sunmakta ve küresel bir farkındalık yaratmaktadır. Ayrıca, hükümetler, çevre kuruluşları ve toplum genelinde sürdürülebilirlik konularında bilinci artırmayı amaçlamaktadır. Göstergeler, tüm üniversiteler için uygulanabilir şekilde tasarlanmış olup, eğitimde çevre odaklı dönüşümün desteklenmesine katkıda bulunmaktadır. Tablo 3'te UI Green Metric (2022) Dünya Üniversite Sürdürülebilirlik Sıralaması'na katılan ülkeler ve katılım sağlayan üniversitelerin sayılarına yer verilmiştir.

Değerlendirme sisteminde, enerji tasarrufu, akıllı bina teknolojileri, yenilenebilir enerji stratejileri, toplam enerji tüketimi, enerji tasarruf projeleri, yeşil bina özellikleri, sera gazı emisyonlarının azaltılması ve iklim değişikliği adaptasyonu gibi çeşitli göstergeler değerlendirilir. Bu kriterler, üniversitelerin enerji verimliliği ve iklimle ilgili çabalarını geliştirmelerini teşvik eder. Tablo 4'te UI Green Metric Dünya Üniversite Sürdürülebilirlik Sıralaması / Enerji ve İklim Değişikliği kriterleri ve puanlaması gösterilmiştir.

Tablo 3. UI Green Metric (2022) Dünya Üniversite Sürdürülebilirlik Sıralaması'na katılan ülkeler ve katılım sayıları

Ülke	Sayı	Ülke	Sayı
Almanya	6	Japonya	1
Amerika	13	Gana	1
Arjantin	3	Guatemala	1
Azerbaycan	3	Kanada	3
Birleşik Arap Emirlikleri	3	Kazakistan	12
Birleşik Krallık	6	Kırgızistan	1
Ermenistan	2	Kolombiya	43
Bahreyn	3	Kosta Rika	2
Bangladeş	2	Kuveyt	1
Beyaz Rusya	2	Letonya	3
Bosna Hersek	1	Litvanya	1
Brezilya	39	Lübnan	3
Bulgaristan	1	Macaristan	11
Curaçao	1	Malezya	32
Çek Cumhuriyeti	6	Meksika	27
Çin	1	Mısır	17
Çin Taipeisi	30	Nijerya	2
Danimarka	1	Özbekistan	20
Ekvador	6	Pakistan	58
El Salvador	1	Panama	2
Endonezya	126	Peru	2
Estonya	1	Polonya	11
Etiyopya	1	Portekiz	7
Fas	1	Romanya	11
Fiji	1	Rusya	51
Filistin	7	Slovakya	4
Filipinler	10	Sri Lanka	7
Firlandiya	3	Suriye	4
Fransa	2	Suudi Arabistan	8
Güney Amerika	3	Şili	5
Hırvatistan	1	Tayland	47
Hindistan	42	Tunus	3
Hollanda	3	Türkiye	83
Honduras	1	Türkmenistan	2
Hong Kong	1	Ukrayna	17
Irak	77	Umman	1
İran	45	Ürdün	10
İrlanda	4	Venezüella	4
İsrail	3	Vietnam	3
İspanya	29	Yeni Zelanda	1
İsviçre	1	Yunanistan	3
İtalya	34	Zimbabve	1

Tablo 4. UI Green Metric Dünya Üniversite Sürdürülebilirlik Sıralaması / Enerji ve İklim değişikliği puanlama

EC	Enerji ve İklim Değişikliği (%21)	Puan 2100
EC 1	Enerji tasarruflu cihazların kullanımı	200
EC 2	Akıllı bina uygulaması	300
EC 3	Kampüsteki yenilenebilir enerji kaynaklarının sayısı	300
EC 4	Toplam enerji kullanımının toplam kampüs nüfusuna bölümü (kWh/kişisi)	300
EC 5	Yenilenebilir enerji üretiminin yıllık toplam enerji kullanımına bölünmesiyle elde edilen oran	200
EC 6	Yeşil bina uygulamalarının tüm inşaat ve tamirat politikalarına yansıyan öğeleri	200
EC 7	Sera gazı emisyonu azaltma programı	200
EC 8	Toplam karbon ayak izi /toplam kampüs nüfusu (kişi başına metrik ton)	200
EC 9	Enerji ve iklim değişikliği alanındaki yenilikçi program(lar)ın sayısı	100
EC 10	İklim değişikliği üzerinde etkili üniversite program(lar)	100

EC: Energy and Climate Change

Çevre, İklim ve Sürdürülebilirlik

3. Materyal ve Metodoloji

3.1 Araştırmanın amacı ve yöntemi

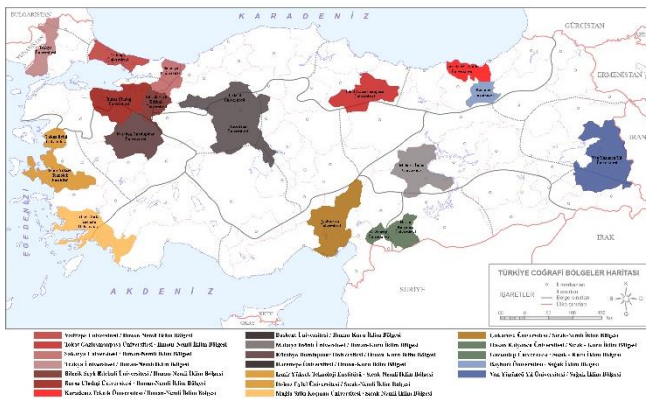
Bu çalışmada amaç, UI Green Metric Dünya Üniversite Sürdürülebilirlik Sıralamasında enerji ve iklim değişikliği kategorisindeki uygulamaların, iklim farklılıklarına göre değişiklik gösterip göstermediğini değerlendirilmiştir. Bu amaç kapsamında, Türkiye'nin beş farklı iklim bölgesinde yer alan ve bu derecelendirme sistemine sahip olan üniversiteler içinden sürdürülebilirlik raporlarına ulaşılan on dokuz üniversitenin enerji ve iklim değişikliği kategorileri ele alınmıştır. Çalışmada literatür tarama ve analiz çalışma yöntemi uygulanmıştır.

Literatürden üniversitelerde uygulanan değerlendirme sistemleri araştırılarak derlenmiştir. Sonrasında Türkiye'deki üniversitelerin sürdürülebilirlik raporlarına ulaşılarak analiz edilmiş ve değerlendirilmiştir. Çalışma 2023 yılında teslim edilen yüksek lisans tezi kapsamında gerçekleştirilmiş ve bu nedenle 2022 yılı verileri esas alınmıştır. Sürdürülebilirlik raporlarına erişim, üniversitelerin resmi internet sitelerinden sağlanmaya çalışılmıştır. Erişim sağlanamayan üniversitelere ise Karadeniz Teknik Üniversitesi aracılığıyla yazışmalar yapılmıştır. Bu bağlamda raporlarına ulaşılan on dokuz üniversite çalışma kapsamında yer almıştır. Raporlardaki altı ana başlık içerisinde yer alan enerji ve iklim değişikliği başlığı altında kullanılan on altı kriter incelenmiştir. Üniversiteler hem kendi içlerinde hem de birbirleriyle iklim ve enerji kategorisinde karşılaştırılarak analiz edilmiş ve değerlendirilmiştir.

3.2 Örnek olarak seçilen üniversitelerin analizleri

2022 yılında Türkiye'den UI Green Metric Sıralaması'na katılım sağlayan seksen üç üniversitenin, buldukları iklim bölgeleri ve Türkiye'deki sıralamaları Tablo 5'te gösterilmiştir.

Çalışma kapsamında seksen üç üniversitenin sürdürülebilirlik raporlarına erişim, üniversitelerin resmi internet sitelerinden sağlanmaya çalışılmıştır. Erişim sağlanamayan üniversitelere ise Karadeniz Teknik Üniversitesi aracılığıyla yazışmalar yapılmıştır. Bu bağlamda raporlarına ulaşılan on dokuz üniversite çalışma kapsamında yer almıştır. Şekil 2'de analizi yapılmak üzere seçilmiş üniversitelerin harita üzerindeki konumları gösterilmektedir.



Şekil 2. UI Green Metric (2022) Dünya Üniversite Sürdürülebilirlik Sıralaması'nda yer alan analizi yapılmış üniversitelerin konumları

İncelenen on dokuz üniversitenin UI Green Metric Sıralaması'na katıldıkları yıllar ve bu yıllara bağlı olarak Türkiye ve Dünya'da aldıkları toplam puan üzerinden girdikleri sıralama numarası Tablo 6'da verilmiştir.

Bu çalışma, enerji ve iklim değişikliği kriterinin incelenmesiyle, uygulamalarda iklim farklılıklarının ne kadar belirleyici olduğunu değerlendirmeyi amaçlamıştır. Bu bağlamda

incelenen üniversitelerin altı ana kategori üzerinden aldıkları puan açılımları da Şekil 3'te gösterilmiştir. Elde edilen veriler, bulgular ve irdelemelerde verilmiştir.



Şekil 3. İklim bölgeleri ve üniversitelerin UI Green Metric (2022) Dünya Üniversite Sürdürülebilirlik Sıralaması kategori puanları.

Tablo 5. Ul Green Metric Sıralaması'na Türkiye'den katılım sağlayan Üniversiteler ve iklim bölgeleri.

İKLİM BÖLGESİ	TÜRKİYE SIRALAMASI- ÜNİVERSİTE ADI
SOĞUK İKLİM BÖLGESİ	24-Atatürk Üniversitesi
	28- Kastamonu Üniversitesi
	55- Bayburt Üniversitesi
	58- Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi
	63- Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi
	69- Sivas Cumhuriyet Üniversitesi
	70- Ağrı İbrahim Çeçen Üniversitesi
	75- Erzurum Teknik Üniversitesi
78- Bingöl Üniversitesi	
İLİMAN – NEMLİ İKLİM BÖLGESİ	1- İstanbul Teknik Üniversitesi
	4- Özyeğin Üniversitesi
	5- Yıldız Teknik Üniversitesi
	6- Yeditepe Üniversitesi
	8- Bartın Üniversitesi
	11- Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi
	12- Sakarya Üniversitesi
	18- Trakya Üniversitesi
	19- Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi
	26- Sabancı Üniversite
	27- İstanbul Sabahattin Zaim Üniversitesi
	31- Bursa Uludağ Üniversitesi
	32- Düzce Üniversitesi
	37- Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi
	41- Ondokuz Mayıs Üniversitesi
	47- Bursa Teknik Üniversitesi
	49- Piri Reis Üniversitesi
	53- Kadir Has Üniversitesi
	59- Artvin Çoruh Üniversitesi
	64- Bezmialem Vakıf Üniversitesi
65- İstanbul Gelişim Üniversitesi	
66- Galatasaray Üniversitesi	
67- Karadeniz Teknik Üniversitesi	
68- Marmara Üniversitesi	
73- İstanbul Atlas Üniversitesi	
77- Karabük Üniversitesi	
İLİMAN – KURU İKLİM BÖLGESİ	3- Erciyes Üniversitesi
	8- Orta Doğu Teknik Üniversitesi
	10- Aksaray Üniversitesi
	14- Başkent Üniversitesi
	16- Malatya İnönü Üniversitesi
	17- Afyon Kocatepe Üniversitesi
	20- Kütahya Dumlupınar Üniversitesi
	21- Kütahya Sağlık Bilimleri Üniversitesi
	25- Hitit Üniversitesi
	29- Fırat Üniversitesi
	30- Kapadokya Üniversitesi
	34- Süleyman Demirel Üniversitesi
	36- Selçuk Üniversitesi
	38- Niğde Ömer Halis Demir Üniversitesi
	42- Hacettepe Üniversitesi
	43- Iğdır Üniversitesi
	45- Bilkent İhsan Doğramacı Üniversitesi
	48- Atılım Üniversitesi
	50- İzmir Bakırçay Üniversitesi
	51- TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi
	54- Eskişehir Teknik Üniversitesi
	56- Gazi Üniversitesi
	60- Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi
	71- Anadolu Üniversitesi
	72- Uşak Üniversitesi
76- Eskişehir Osmangazi Üniversitesi	
79- Çankaya Üniversitesi	
80- Kırıkkale Üniversitesi	
81- Ankara Üniversitesi	
83- Konya Teknik Üniversitesi	
SICAK – NEMLİ İKLİM BÖLGESİ	7- Ege Üniversitesi
	13- İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü
	15- Dokuz Eylül Üniversitesi
	23- Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi
	33- Mersin Üniversitesi
	35- Çukurova Üniversitesi
	40- Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi
	44- Akdeniz Üniversitesi
52- Antalya Bilim Üniversitesi	
57- Manisa Celal Bayar Üniversitesi	
74- Çağ Üniversitesi	
SICAK – KURU İKLİM BÖLGESİ	22- Hasan Kalyoncu Üniversitesi
	39- Gaziantep Üniversitesi
	46- Mardin Artuklu Üniversitesi
	61- Adıyaman Üniversitesi
	62- Dicle Üniversitesi
82- Kilis 7 Aralık Üniversitesi	

Tablo 6. Seçilen Üniversitelerin UI Green Metric Sıralamaları.

			2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
SOĞUK İKLİM BÖLGESİ	Bayburt Üniversitesi	Dünya Sıralaması	-	-	-	-	-	-	-	741	634
		Türkiye Sıralaması	-	-	-	-	-	-	-	56	55
	Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi	Dünya Sıralaması	-	-	-	-	-	-	-	-	648
		Türkiye Sıralaması	-	-	-	-	-	-	-	-	58
İLİMAN – NEMLİ İKLİM BÖLGESİ	Yeditepe Üniversitesi	Dünya Sıralaması	-	-	-	225	249	437	273	115	106
		Türkiye Sıralaması	-	-	-	4	6	19	12	7	6
	Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi	Dünya Sıralaması	-	-	-	-	-	504	412	256	185
		Türkiye Sıralaması	-	-	-	-	-	26	23	14	11
	Sakarya Üniversitesi	Dünya Sıralaması	-	-	-	-	-	-	310	208	186
		Türkiye Sıralaması	-	-	-	-	-	-	15	12	12
	Trakya Üniversitesi	Dünya Sıralaması	-	-	-	-	-	-	-	288	249
		Türkiye Sıralaması	-	-	-	-	-	-	-	16	18
	Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi	Dünya Sıralaması	-	-	-	-	-	-	-	275	259
		Türkiye Sıralaması	-	-	-	-	-	-	-	57	19
	Bursa Uludağ Üniversitesi	Dünya Sıralaması	-	-	-	-	-	-	-	335	357
		Türkiye Sıralaması	-	-	-	-	-	-	-	20	31
	Karadeniz Teknik Üniversitesi	Dünya Sıralaması	-	-	-	-	-	-	-	-	747
		Türkiye Sıralaması	-	-	-	-	-	-	-	-	67
İLİMAN – KURU İKLİM BÖLGESİ	Başkent Üniversitesi	Dünya Sıralaması	-	-	-	-	552	594	405	379	199
		Türkiye Sıralaması	-	-	-	-	20	32	20	27	14
	Malatya İnönü Üniversitesi	Dünya Sıralaması	345	320	343	469	437	468	340	310	208
		Türkiye Sıralaması	8	6	10	18	17	22	18	19	16
	Kütahya Dumlupınar Üniversitesi	Dünya Sıralaması	-	-	-	-	-	-	786	457	273
		Türkiye Sıralaması	-	-	-	-	-	-	53	36	20
Hacettepe Üniversitesi	Dünya Sıralaması	-	-	-	-	-	-	-	-	481	
	Türkiye Sıralaması	-	-	-	-	-	-	-	-	42	
SICAK – NEMLİ İKLİM BÖLGESİ	İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü	Dünya Sıralaması	-	-	-	-	-	-	217	198	197
		Türkiye Sıralaması	-	-	-	-	-	-	9	11	13
	Dokuz Eylül Üniversitesi	Dünya Sıralaması	-	-	-	-	-	460	380	295	207
		Türkiye Sıralaması	-	-	-	-	-	20	19	17	15
	Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi	Dünya Sıralaması	-	-	-	-	-	-	408	360	323
		Türkiye Sıralaması	-	-	-	-	-	-	22	23	23
	Çukurova Üniversitesi	Dünya Sıralaması	-	-	-	-	-	293	335	367	426
		Türkiye Sıralaması	-	-	-	-	-	12	17	24	35
SICAK – KURU İKLİM BÖLGESİ	Hasan Kalyoncu Üniversitesi	Dünya Sıralaması	-	-	-	-	-	-	-	375	298
		Türkiye Sıralaması	-	-	-	-	-	-	-	26	22
	Gaziantep Üniversitesi	Dünya Sıralaması	-	-	-	-	-	-	546	465	463
		Türkiye Sıralaması	-	-	-	-	-	-	36	37	39

4. Bulgular ve İrdelemeler

Tablo 6'da görüldüğü gibi UI Green Metric Sıralaması'na katılan on dokuz üniversitenin buldukları iklim bölgelerine göre dağılımlarında homojenlik görülmektedir. Türkiye, coğrafi konumu, yer şekilleri, yükselti ve denize yakınlık gibi unsurlar nedeniyle çeşitli iklim özelliklerine sahiptir. Analize dahil edilen üniversiteler, farklı bölgelerde bulunmakta ve bu bölgelerin sunduğu farklı koşulları barındırmaktadır.

UI Green Metric Dünya Üniversite Sürdürülebilirlik Sıralaması'na katılım her geçen yıl uluslararası ve ulusal düzeyde artmaktadır. Analiz edilen üniversitelerin çoğu aktif bir şekilde her yıl katılım sağlamaktadır, ancak bazı üniversiteler katılımlarını sürekli olarak gerçekleştirememektedir. Katılım yılı daha eski olan üniversiteler, toplam puan bazında yeni katılan üniversitelere göre genellikle daha düşük bir puan alabilmektedir. Bu durum, üniversitelerin mevcut imkanlar dahilinde eksikliklerini etkin bir şekilde gideremediğini göstermektedir. İklim koşullarının etkisiyle enerji tasarrufu uygulamaları, renovasyon ve maliyet gibi faktörler, üniversite binalarındaki sürdürülebilirlik çabalarının yetersiz kaldığını göstermektedir.

2022 yılı kapsamında Şekil 3'te ifade edildiği gibi analizi yapılan, iklim bölgelerine göre gruplandırılmış on dokuz üniversitenin Dünya ve Türkiye'deki sıralamaları Tablo 5'te verilmiştir. Bu üniversitelerin enerji ve iklim değişikliği kategorisinde sıralamaları en yüksekte en düşüğe şu şekildedir: Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi (1625) ve Başkent Üniversitesi (1625), Malatya İnönü Üniversitesi (1575), Yeditepe Üniversitesi (1525) ve Sakarya Üniversitesi (1525), Hasan Kalyoncu Üniversitesi (1425), Kütahya Dumlupınar Üniversitesi (1400), Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi (1375), Dokuz Eylül Üniversitesi (1300), İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü (1275), Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi (1250), Trakya Üniversitesi (1085), Çukurova Üniversitesi (1075), Bayburt Üniversitesi (1065), Gaziantep Üniversitesi (1040), Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi (1025), Bursa Uludağ Üniversitesi (900), Hacettepe Üniversitesi (875), Karadeniz Teknik Üniversitesi (835). Bu bilgiler dikkate alındığında, enerji ve iklim değişikliğinin puan sıralaması ve toplam puan sıralaması paralel gitmediği görülmektedir.

UI Green Metric 2022 verilerinde en yüksek puanı; Yeditepe Üniversitesi atık, Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi enerji ve iklim değişikliği ile ulaşım, Sakarya Üniversitesi eğitim ve araştırma, İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü ulaşım, Başkent Üniversitesi enerji ve iklim değişikliği, Dokuz Eylül Üniversitesi ulaşım, Malatya İnönü Üniversitesi enerji ve iklim değişikliği, Trakya Üniversitesi atık, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi ulaşım, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi eğitim ve araştırma, Hasan Kalyoncu Üniversitesi enerji ve iklim değişikliği, Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi enerji ve iklim değişikliği, Bursa Uludağ Üniversitesi atık ve ulaşım, Bayburt Üniversitesi ulaşım, Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi ulaşım, Karadeniz Teknik Üniversitesi ulaşım kategorisinden almıştır. Toplam puan bazında en yüksek puanı Yeditepe Üniversitesi almış olsa da kategoriler arasında enerji ve iklim değişikliği kategorisinden en yüksek puanı Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi ve Başkent Üniversitesi almıştır. UI Green Metric 2022 Dünya Üniversite Sürdürülebilirlik Sıralaması'nda enerji ve iklim değişikliği kriteri, yüksek bir yüzdeye sahip olmasına rağmen, diğer kriterler de toplam puan üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Enerji ve iklim değişikliği başlığındaki düşük puanlara rağmen, diğer başlıklardaki yüksek performans, toplam puanı artırarak üniversitenin sıralamada daha üst sıralara çıkmasını sağlayabilmektedir.

Üniversiteler, genellikle LED aydınlatma ve enerji tasarruflu cihazlar gibi yöntemlerle enerji verimliliğini artırmıştır. Genellikle sensörlü sistemler, otomatik kapı, otomatik aydınlatma, yangın

alarm sistemleri ve güvenlik sistemleri karşımıza çıkmaktadır. İncelenen uygulamalar genel olarak üniversitelerin doğal havalandırma, gün ışığından faydalanma ve enerji yönetim sistemleri gibi konulara odaklandığını göstermektedir. İncelenen veriler, üniversiteler enerji yönetimini geliştirme ve enerji tasarrufu sağlama konusunda çaba göstermektedir. Bu bağlamda, yenilenebilir enerjinin önemi de özellikle vurgulanmaktadır.

Ülkemizdeki üniversitelerde, genel olarak enerji verimli cihazlar ve akıllı bina uygulamaları ön plandadır. LED kullanımı ve enerji verimliliği yüksek cihazlar yaygın olarak tercih edilmektedir. Akıllı bina uygulamaları arasında sensörlü ışıklandırma, otomasyon sistemleri ve güvenlik sistemleri bulunmaktadır, böylece enerji kontrolü sağlanmaktadır.

Yenilenebilir enerji kaynaklarına olan uygun coğrafi konumumuz, güneş panellerinin yaygın olarak kullanılmasını teşvik etmektedir. Yeni yapılan binalarda ve mevcut yapıların iyileştirme çalışmalarında enerji üretimi ve tüketimi kontrol altına alınmaktadır. Altyapı çalışmalarında akıllı bina uygulamaları düşünülerek entegre edilmekte ve yeşil bina uygulamalarına öncelik verilmektedir.

Sera gazı emisyonlarını azaltmaya yönelik uygulamalarda elektrikli araç kullanımının arttığı, şahsi araç kullanımının sınırlandırıldığı ve toplu taşımanın teşvik edildiği görülmektedir. Ayrıca yaya ve bisiklet yolları düzenlenerek bisiklet kullanımı teşvik edilmekte ve bu konuda çeşitli çalışmalar yapılmaktadır.

Enerji ve iklim değişikliğinin sürdürülebilirlik üzerindeki büyük etkisi göz önüne alındığında, eğitim kurumları bu konularda çeşitli faaliyetlerle farkındalık düzeyini artırmaya çalışmaktadır. Öğrencilerin ilgisini bu konulara çekmek için sempozyumlar, webinarlar ve öğrenci topluluklarının düzenlediği etkinlikler düzenlenmektedir. Ayrıca, sürdürülebilirlik konuları ders içeriklerinde aktif bir şekilde işlenmektedir. Üniversiteler aynı zamanda kendi bünyelerinde sürdürülebilirlikle ilgili çeşitli çalışmalara da katılmaktadır.

Enerji ve iklim değişikliği kriterini değerlendirirken genellikle mevcut yapıların renovasyonu ön plana çıkmaktadır. Üniversiteler, minimum maliyetle maksimum tasarruf hedefiyle mevcut cihazları yenileriyle değiştirmektedir, güneş panellerini entegre etmektedir ve doğal aydınlatma/havalandırma için pencereleri optimize etmektedir. Ayrıca, sera gazı emisyonunu azaltmak amacıyla bisiklet ve yaya yolları düzenlenmektedir, sürdürülebilirlik dersleri düzenlenmektedir ve öğrencilerin aktif katılımını teşvik etmektedir.

5. Sonuç ve Öneriler

Sürdürülebilirlik bilinci ve uygulamaları, zamanla gelişerek enerji tasarrufu, yenilenebilir enerji kullanımı ve çevreye minimum zarar hedeflerini destekleyen sürdürülebilir bina değerlendirme sistemleriyle yaygınlaşmıştır. UI Green Metric Dünya Üniversite Sürdürülebilirlik Sıralaması, üniversitelerin sürdürülebilirlik çabalarını yerleşim, enerji ve iklim değişikliği, atık, su, ulaşım, eğitim ve araştırma gibi kategorilerde değerlendirir. Bu sistem, üniversitelerin durumlarını kıyaslamalarına, eksiklerini belirlemelerine ve sürdürülebilirlik alanında gelişim sağlamalarına olanak tanır.

UI Green Metric Dünya Üniversite Sürdürülebilirlik Sıralaması, toplam puan üzerinden belirlenmekte olup enerji ile iklim değişikliği kriteri, altı başlık içerisinde %21 ile en yüksek ağırlığa sahiptir. Ancak bu çalışma kapsamında incelenen örneklerde toplam puan ile enerji ve iklim değişikliği puanı arasında doğrudan bir paralellik görülmektedir. Bu durum, üniversitelerin sürdürülebilirlik uygulamalarına sadece enerji ve iklim değişikliği kriterlerinde değil, diğer kriterlerde de önem verdiğini göstermektedir.

Yapılan uygulamalar dikkate alındığında, genel olarak akıllı sistem kullanımı, enerji verimli cihaz kullanımları, güneş panellerinin kullanımı, doğal aydınlatma ve doğal havalandırma gibi ortak uygulamalar karşımıza çıkmaktadır.

Mevcut yapı stoğu üzerinden bu değerlendirmeye giren üniversitelerin çoğunda, ısıtma ve soğutma ihtiyacı için bölgesel iklim koşullarını ele alan iklimsel tasarım yaklaşımlarının göz ardı edilemediği görülmektedir. UI Green Metric'in enerji ve iklim değişikliğine yönelik alt kriterlerde de iklimsel tasarıma yönelik pasif uygulama çalışmalarının daha az yer tuttuğu gözlenmektedir.

Örneğin, analiz edilen örnekler arasında farklı iklim bölgelerinde benzer uygulamaların yapılması dikkat çekicidir. Yeni yapılar tasarlarken, iklim verilerinin dikkate alınması gerektiği düşünülmektedir.

Eğitim yapılarında sürdürülebilirlik açısından UI Green Metric Dünya Üniversite Sürdürülebilirlik Sıralaması'nın enerji ve iklim değişikliği başlıklarındaki değerlendirmelerini incelemiş ve 2022 yılında Türkiye'deki UI Green Metric Sıralaması'nda yer alan üniversitelerin bu konuda gerçekleştirdiği çalışmaları araştırmıştır. Çalışma sonucunda ortaya çıkan öneriler aşağıda sıralanmıştır.

Sürdürülebilirlik hedeflerinin etkin bir şekilde hayata geçirilebilmesi için, yeni üniversite binalarının tasarım ve inşaa süreçlerinde sürdürülebilir uygulamaların göz önünde bulundurulması gerekmektedir.

Üniversiteler, stratejik planlarına enerji verimliliği ve iklim krizi ile ilgili eylem planları dahil ederek bilinç düzeyini artırabilir. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı ile Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı tarafından yürütülen Kamu Binalarında Enerji Verimliliği (KABEV) projesi kapsamında, üniversite kampüslerinde yapılacak iyileştirmelerle enerji tüketimi ve giderleri azaltılabilir, sera gazı emisyonları düşürülerek iklim değişikliğiyle mücadele edilebilir. Bu süreç, sosyal ve ekonomik fayda sağlayarak enerji verimliliği konusunda toplumsal farkındalığı artırır.

İklim bölgelerinin kendine özgü özellikleri -sıcaklık, yağış, nem, rüzgar gibi - farklılıklar gösterdiği için, tasarruf sağlamak amacıyla alınması gereken önlemler de farklı olmalıdır. Her iklim bölgesine özel olarak:

- Soğuk iklimde, şiddetli rüzgar, soğuk ve kar yükü gibi durumlara başa çıkmak için ısı kaybını azaltmaya yönelik önlemler alınmalıdır.
- Sıcak-nemli iklimde, yoğun yağış, yüksek nem, sıcaklık ve fazla güneş ışınımı gibi etmenlere karşı havalandırma ve soğutma sistemlerine öncelik verilmelidir.
- Sıcak-kuru iklimde, aşırı sıcak ve soğuk havanın etkilerini engellemek için yalıtım özellikleri ve yağmur suyu kullanımını artırmaya yönelik sistemler kurulmalıdır.
- Ilıman-nemli ve ılıman-kuru iklimlerde ise, yazın güneşten korunma ve havalandırma, kışın ise güneşten maksimum fayda sağlamak için gölgelendirme sistemleri düşünülmelidir.

İklim bölgelerine özgü tasarruf yöntemleri, enerji tasarrufu sağlamada önemli bir rol oynamaktadır. Üniversiteler, bu farklı iklim koşullarını tasarımlarına dahil ederek enerji verimliliğini artırabilir ve tasarruf sağlayabilirler. Bu süreçte, enerji tasarrufunu teşvik eden politikalar da hayata geçirilmelidir.

Erişilen belgelerin içeriklerinin detaylı olmaması yapılan uygulamaların birbirleriyle kıyaslanabilmesine olanak sağlamamaktadır. Bu tür belgelerin daha detaylı paylaşılması ve daha nicel verilerin kullanılması bu uygulamaların hangi ölçüde katkı sağladığının daha net algılanmasını sağlayacaktır.

Gelecekteki çalışmalar, analizleri yapılan üniversitelerdeki uygulama eksikliklerini gözlemleyip çıkarılan sonuçları eğitim sürecimize en başından entegre ederek daha doğru uygulamalarla hayata geçirilmesini ve sürdürülebilirlik bilincinin eğitim sürecine temelden işlenmesini destekleyebilir. Mevcut yönetmelikler, standartlar bu eksikleri yapıcı yönde destekleyecek biçimde düzenlenebilir.

Makale araştırma ve yayın etiğine uygun olarak hazırlanmıştır. Yazarlar arasında herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

7. Kaynaklar

- Atıcı, K. B., Yaşayacak, G., Yıldız, Y., & Ulucan, A. (2021). Green University and academic performance: An empirical study on UI GreenMetric and World University Rankings. *Journal of Cleaner Production*, 291, 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125289>
- Bilgili, M. Y., & Topal, A. (2021). Sürdürülebilir Yükseköğretim Kurumları Oluşturulmasında Talloires Deklarasyonunun Rolü ve Önemi. *Yükseköğretim ve Bilim Dergisi*, 11(2), 417-424.
- Caeiro, S., Sandoval Hamón, L. A., Martins, R., & Bayas Aldaz, C. E. (2020). Sustainability Assessment and Benchmarking in Higher Education Institutions—A Critical Reflection. *Sustainability*, 12(2), 543. <https://doi.org/10.3390/su12020543>
- Chakraborty, A., Kumar, S., Shashidhara, L., & Taneja, A. (2021). Building Sustainable Societies through Purpose-Driven Universities: A Case Study from Ashoka University (India). *Sustainability*, 13(13), 7423. <https://doi.org/10.3390/su13137423>
- Çelik, K., & Ünver, R. (2019). Aydınlatmanın Eğitim Yapıları Tasarım Kılavuzundaki Yeri. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 34(3), 49-63.
- Çoban, O., & Şahbaz Kılınc, N. (2015). Yenilenebilir enerji tüketimi ve karbon emisyonu ilişkisi: TR örneği. *Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 1(38), 195-208.
- Darendelioğlu, T. (2020). Üniversite Kampüslerinin Sürdürülebilirlik Özelliklerinin İncelenmesi: Trakya Üniversitesi Balkan Yerleşkesi Örneği. Trakya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi. Edirne.
- Du, Y., H. Arkesteijn, M., den Heijer, A., & Song, K. (2020). Sustainable Assessment Tools for Higher Education Institutions: Guidelines for Developing a Tool for China. *Sustainability*, 12(16), 6501. <https://doi.org/10.3390/su12166501>
- Gedikkaya Bal, P., Ayas, M. Ö., Bozaykut, T., Yavuz Tiftikçigil, B., & Afacan Fındıklı, M. (2022). Sürdürülebilir Kalkınma Bağlamında Uluslararası Üniversite Sıralama İndeksleri Ve Türkiye'deki Üniversiteler. *Doğuş Üniversitesi Dergisi*, 23(1), 331-349. doi:10.31671/doujournal.1035962.
- Gómez, F. U., Sáez-Navarrete, C., Lioi, S. R., & Marzuca, V. İ. (2015). Adaptable model for assessing sustainability

- in higher education. Journal of Cleaner Production, 107, 475-485.
- Güngör Tanç, Ş., Tanç, A., Çardak, D., & Yağlı, İ. (2022). Türkiye'deki Üniversitelerin Sürdürülebilirlik Çalışmalarının İncelenmesi. *Muhasebe ve Denetim Bakış*, 66, 83-100. <https://doi.org/10.55322/mbbakis.1063261>
- İnşaat, T. M. E. B., & Başkanlığı, E. (2015). Eğitim yapıları asgari tasarım standartları kılavuzu. https://iedb.meb.gov.tr/meb_iys_dosyalar/2015_08/17032245_2015asgarita_sarmklavuzu.pdf. adresinden alındı
- Künyeli, F. B., & Baydoğan, M. Ç. (2020). Eğitim yapılarında esneklik üzerine bir inceleme: Kayseri örneği. *Erciyes Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*(50), 427-446. doi:10.48070/erusosbilder.712421
- Özdoğan, B., & Civelekoğlu, G. (2018). Üniversite Yerleşkeleri İçin Ulusal Çevresel Sürdürülebilirlik Endeksinin Geliştirilmesi. *Bilge International Journal Of Science and Technology Research*, 2(2), 167-173.
- Ruşen, S. E., Karanfil Celep, Topçu, M. A., Çeltek, S. A., Ruşen, A. (2018). Üniversite Kampüs Binaları için Enerji Etüdü: Örnek Çalışma. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 33(2), 83-92.
- Sarıkoç, C. (2023). UI GreenMetric'li (Dünya Üniversite Sürdürülebilirlik Sıralaması) Üniversitelerde Enerji ve İklim Değişikliği Uygulamaları: Türkiye Örneği. Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Trabzon.
- Sümertaş, S. D. (2021). İklim Değişikliği Ve Sürdürülebilirlik Etkisinde Yenilenebilir Enerji Piyasası Teşvikleri. *Özyeğin Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*. İstanbul. <http://hdl.handle.net/10679/7921> adresinden alındı
- UI GreenMetric. (2022). World University Ranking. <https://greenmetric.ui.ac.id/> adresinden alındı
- URL-1. (2023, Ağustos 4). <http://tanitim.sakarya.edu.tr/kampusaritasi.pdf>
- URL-2. (2023, Ağustos 4). <https://haber.sakarya.edu.tr/sau-dunyanin-en-cevreci-300-universitesi-arasinda-h101654.html>
- URL-3. (2023, Ağustos 4). <https://tanitim.sakarya.edu.tr/galeriDetay.php?galeri=kampus>
- URL-4. (2023, Ağustos 5). <https://sks.deu.edu.tr/duyurular/universitenize-hos-geldiniz/>
- URL-5. (2023, Haziran 29). <https://www.baskent.edu.tr/tr/tarihce/icerik/kurumsal-gelisme/39>
- URL-6. (2023, Ağustos 5). https://www.baskent.edu.tr/belgeler/akademik_faaliyet/2014-2015_faaliyet_raporu.pdf
- URL-7. (2023, Haziran 2). <https://aof.dpu.edu.tr/tr/index/sayfa/4258/sinav-yapilan-binalar>
- URL-8. (2023, Ağustos 6). <https://greenmetric.dpu.edu.tr/tr/index/sayfa/11611/toplam-kampus-alani>
- URL-9. (2023, Ağustos 6). https://www.helpmecovid.com/tr/241881_kutahya-dumlupinar-universitesi-kapali-spor-salonu
- URL-10. (2023, Ağustos 7). <https://www.hku.edu.tr/haberler/iyi-bir-gelecek-icin-hasan-kalyoncu-universitesi/>
- URL-11. (2023, Ağustos 7). <https://myo.hku.edu.tr/category/haberler/>
- URL-12. (2023, Ağustos 22). <http://wikimapia.org/8518174/tr/Van-Y%C3%BCz%C3%BCnc%C3%BC-Y%C4%B1-%C3%9Cniversitesi-Zeve-Yerle%C5%9Fkesi-Kamp%C3%BCs%C3%BC#/photo/7425268>
- URL-13. (2023, Ağustos 22). <https://www.yyu.edu.tr/foto-galeri>
- URL-14. (2023, Ağustos 22). <http://wikimapia.org/8518174/tr/Van-Y%C3%BCz%C3%BCnc%C3%BC-Y%C4%B1-%C3%9Cniversitesi-Zeve-Yerle%C5%9Fkesi-Kamp%C3%BCs%C3%BC#/photo/7425521>
- URL-15. (2023, Ağustos 22). <https://www.yyu.edu.tr/foto-galeri>
- URL-16. (2023, Ocak 31). <https://stars.aashe.org/about-stars/>
- URL-17. (2023, Şubat 2). <https://www.eauc.org.uk/theplatform/aishe>
- URL-18. (2023, Şubat 4). https://www.eauc.org.uk/theplatform/sustainable_campus_assessment_system
- URL-19. (2023, Şubat 5). <https://ulsf.org/sustainability-assessment-questionnaire/>,
- URL-20. (2023, Ağustos 31). <https://iea.blob.core.windows.net/assets/3c8fa115-35c4-4474-b237-1b00424c8844/CO2Emissionsin2022.pdf>
- URL-21. (2023, Kasım 5). <https://www.kabev.org/proje-hakkinda/projenin-hedefleri/>
- Yenice, T. K. (2019). Hasan Kalyoncu Üniversitesi konukevi mimari tasarımı. 7(1), 50-56.