

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 (2023), 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

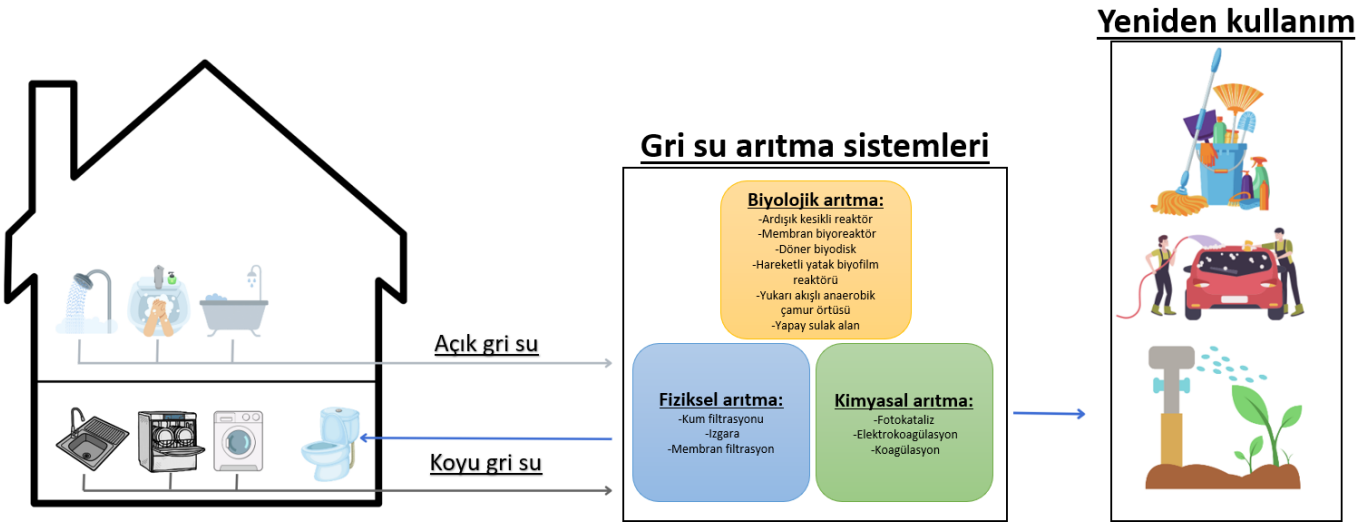
1. Giriş

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 oluşturmakta 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 saniteye 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 saniteye 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 saniteye imkanlarına erişemeyeceği tahmin edilmektedir. Sürdürülebilir ve yaşanabilir kentler için su kıtlığının ve potansiyel çözümlerin kapsamlı bir şekilde değerlendirilmesi ve aksiyon alınması gerekmektedir (Öztek, 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 saniteye 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 şampuanlardan 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 bazlı 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 (Haque, 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

Çevre, İklim ve Sürdürülebilirlik

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	
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 kirlili 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 artırdığı 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 suyunda, 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 evlerin

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 sıvrisinek 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 borulama 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 kullanılmasının 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>
- Barişçi, S., & Turkay, 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., Stokal, 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>
- Halalshah, 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., Lemac, 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>

