

## DERLEME MAKALESİ

## Arıtılmış Atıksuların Çevresel Akış için İkame Amaçlı Kullanımı: Tampon Bölge olarak Yapay Sulak Alanların Rolü

Yazışma yazarı:  
Fatma Nihan DOĞAN,  
doganf15@itu.edu.tr

Referans:  
Karpuzcu, M.E., Doğan, F.N. ve Öztürk İ. (2024). Arıtılmış Atıksuların Çevresel Akış için İkame Amaçlı Yapay Sulak Alanların Rolü, *Çevre, İklim ve Sürdürülebilirlik*, 24(1), 15-22.

Makale Gönderimi : 13 EYLÜL 2023  
Online Kabul : 13 ŞUBAT 2024  
Online Basım : 18 NİSAN 2024

Mahmut Ekrem KARPUZCU<sup>1</sup>, Fatma Nihan DOĞAN<sup>2</sup>, İzzet ÖZTÜRK<sup>1</sup>

<sup>1</sup>İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Maslak, İstanbul, Türkiye. ORCID: 0000-0001-6832-2151

<sup>2</sup>İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Maslak, İstanbul, Türkiye. ORCID: 0000-0002-6245-9621

<sup>3</sup>İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Maslak, İstanbul, Türkiye. ORCID: 0000-0002-8274-5326

**Özet** Uzun süren kuraklıklar, artan nüfus, iklim değişikliğinin muhtemel etkileri nedeniyle özellikle son yıllarda arıtılmış atıksuların çevresel akışı ikame amaçlı kullanımı önem kazanmıştır. Bu etkenler tüm dünyada akarsuların kalitesi ve miktarını artırmaya yönelik tedbirleri zorunlu hale getirmiştir. Atıksuların zirai ve peyzaj sulama amaçlı kullanımı giderek yaygınlaşmakla birlikte nehir ekosistemlerinde çevresel akış veya ekolojik ihtiyaç debisi olarak atıksuyun yeniden kullanımına dair örnekler de artmaktadır. Arıtılmış atıksuların yeniden kullanımı konusunda dikkat edilmesi gerekli en önemli iki husus atıksuyun nehir ekosistemini tehdit eden kirleticilerden arındırılmış olması ve nehrin doğal habitatının korunmasıdır. Bu amaçla, yapay sulak alanlar iyi bir nihai arıtım seçeneği olmaktadır. Bu çalışma ile arıtılmış atıksuların akarsulara deşarjının güvenli bir şekilde yapılabilmesi için deşarj öncesi bir tampon arıtma bölgesi olarak yapay sulak alanların etkinliği incelenmiştir. Saha çalışmaları, yapay sulak alanların kalıcı organik madde gideriminde etkinliğini göstermektedir. Nehir ekosistemlerinde bulunması muhtemel endokrin bozucular, pestisitler, mikro-plastikler gibi öncelikli kirleticilerle ilgili çalışmaların daha yaygınlaşması gerekmektedir. Önümüzdeki 50 ila 100 yıl boyunca, nüfus artışı, ekonomik kalkınma ve iklim değişikliğinin akarsuları özellikle kurak ve yarı kurak bölgelerde daha da fazla baskı altına alacağı düşünüldüğünde, arıtılmış atıksuların çevresel akışı ikame amaçlı kullanılmasının kaçınılmaz hale geleceği düşünülmektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Çevresel akış, ekolojik ihtiyaç debisi, yapay sulak alanlar, atıksu geri kazanımı, kalıcı organik kirleticiler

## Reuse of Treated Wastewater to Sustain Environmental Flow: The Role of Constructed Wetlands as Buffer Zones

**Abstract** The reuse of treated wastewater to sustain environmental flows has gained importance due to prolonged droughts, increasing population, and the potential impacts of climate change widely across the globe. The stresses on water sources calls for a long-term ecological integrity of river systems in terms of water quantity and quality. While the use of wastewater for agricultural and landscape irrigation is becoming more widespread, there are also increasing examples of the reuse of wastewater to sustain environmental flow in river ecosystems. There are still many concerns regarding the adequacy of treatment especially for micropollutants found in wastewater and protection of natural habitats. Field studies demonstrate the effectiveness of constructed wetlands in removing most of the commonly encountered persistent organic pollutants in wastewater. Hence, constructed wetlands can be implemented for the elimination of micropollutants from wastewater as a final treatment step and treatment buffer zone before discharge to rivers. More studies are needed to evaluate removal efficiencies of persistent organic pollutants such as endocrine disruptors, pesticides, and microplastics in constructed wetlands. Given that over the next 50 to 100 years, population growth, economic development, and climate change are expected to put more pressure on rivers, especially in arid and semi-arid regions, recycled water has the potential to serve as a viable resource for renewal of water-stressed streams.

**Keywords:** Environmental flow, ecological flow requirement, constructed wetlands, wastewater reuse, persistent organic pollutants

## 1. Giriş

Akarsular, dünyada en çok değişime ve tahribata uğramış ekosistemler arasındadır. Antropojenik kaynaklı girişimler bu sistemlerde düşük su kalitesi ve ekolojik habitatın bozulmasına yol açmaktadır. İklim değişikliği modelleri ile tahmin edilen yoğun kuraklık beklentileri önümüzdeki yıllarda havzalarda yeraltı suyu kullanımının artarak akiferlerin tükenmesi ve dolayısıyla akarsu rejimlerinin değişime uğraması yönündedir (Wu vd. 2020). Araştırmalar, 2050 yılına kadar yeraltı suyu çekiminden etkilenen havzaların %42-79'unda akarsu akışının ekolojik sınırlarına ulaşmış olacağını göstermektedir (de Graaf vd. 2019). İklim değişikliği, kuraklık ve nüfus artışı gibi etkenler tüm dünyada akarsuların kalitesi ve debisini arttırmaya yönelik yeni tedbirleri zorunlu hale getirmiştir.

Akarsularda, iklim değişikliği ve insan kaynaklı tüketime karşı su miktarını korumaya yönelik uygulamalardan biri de arıtılmış atıksuların akarsulara deşarjıdır. Atıksuların tarım ve peyzaj sulaması amaçlı kullanımının giderek yaygınlaşması ile birlikte nehir ekosistemlerinde ekolojik ihtiyaç debisi olarak atık suyun yeniden kullanımına dair örnekler artmaktadır. Mevsimsel değişkenlikler, atıksuyun nehre karışmadan önce geçirdiği aşamalar ve özellikle kurak dönemlerdeki nehrin akış geçmişi gibi faktörler göz önünde bulundurularak, nehirler arıtılmış atıksular ile beslenebilir. Buradaki amaç nehri sabit bir debide tutmak (düz bir hidrograf değil, nehrin doğal seyirindeki akış rejimini taklit etmek ve habitatı korumaktır (Luthy vd. 2015). Bu amaçla, nehre beslenen arıtılmış atıksular ile nehir taşkın yatağındaki habitatın canlılığı korunarak yerli türlerin devamlılığı sağlanır ve doğal akış durumu simüle edilebilir (Bischel vd. 2013). Atıksu deşarjları, nehirleri doğal akış şartlarına geri döndürmek, nesli tükenen türlerin devamlılığını sağlamak ve doğal koşullarda oluşmayacak yeni ekosistemler kurmak için kullanılabilir (Wolfand vd. 2022). Örneğin, doğal olarak kesikli akışa sahip, Kaliforniya'daki Calera Deresi'nde, arıtılmış atık suların ikame debisi olarak kullanılmasıyla sürekli akış hali oluşturulmuş ve bu durum nesli tükenmekte olan ve nadir görülen türlerin artmasını sağlamıştır (Halaburka vd. 2013). Arıtılmış atıksular, Kaliforniya'nın su tedarikinin önemli bir bileşeni olup eyaletin kentsel su taleplerinin %9'undan fazlası rezervuar, yeraltı suyu ve doğal su kaynaklarına beslenmiş atıksulardan karşılanmaktadır (WateReuse California 2019). Bir ekosistem hizmetleri değerlendirme çalışması, geri kazanılmış atıksuyun çevresel akış için kullanılmasının ekosistem servisleri açısından fayda sağlayacağını fakat bu durumun arıtma tesislerinin işletme maliyetlerini artıracığını ve dolayısıyla su faturalarındaki su arıtma ücretinin yaklaşık 2 katına çıkacağını işaret etmektedir (Alcon vd. 2011).

Arıtılmış atıksular ile nehirlerin beslenmesi, bahsedilen potansiyel faydalarına rağmen su kalitesi ve su habitatına etkisi açısından tartışılmalı bir konudur. Geçmişte arıtma tesislerinin yetersiz oluşu, ileri arıtmanın gerçekleştirilememesi ve seyreltmenin bir arıtma yöntemi olarak benimsenmesi ile neredeyse ham denilecek atıksular nehirlere deşarj ediliyordu. Günümüzde ise birçok gelişmiş ve gelişmekte olan ülkenin çevre mevzuatında atıksuların arıtılması ve arıtma tesislerinin iyileştirilmesine dair şartlar getirilmiştir. İleri düzeyde arıtma ile organik madde, nütrientler, ağır metaller, pestisitler gibi kirleticiler giderilerek atıksu, önemli bir çevresel akış kaynağı olabilmektedir (Luthy vd. 2015; Bischel vd. 2013). Arıtılmış atıksuların çevresel akış kaynağı olarak kullanılmasının yaygınlaşmasının önündeki en büyük engellerden biri, sucul ekosistemler üzerindeki uzun dönem etkilerinin yeterince ortaya konulmamış olmasıdır. Bunun yanı sıra, atıksu arıtma tesislerinde tam olarak giderilemeyen kalıcı organik kirleticilerin varlığı da endişe konusudur (Plumlee, Gurr, ve Reinhard 2012). Kalıcı organik kirleticilerin giderimi için bir yaklaşım, ters ozmos, ozonlama gibi (çoğu kalıcı organik

kirleticinin %99'dan fazlasını giderebilir) ileri arıtma sistemlerinin kullanılmasıdır. Ancak bu tür teknolojiler yüksek maliyet nedeniyle belirlenen proje faydalarına bağlı olarak uygulanabilir olmayabilir. Kalıcı organik kirleticilerin giderimi için alternatif ve daha az maliyetli bir yöntem olarak yapay sulak alanların kullanımı son yıllarda öne çıkmış ve bu konudaki bazı başarılı uygulamalar literatürde yer almıştır (Hijosa-Valsero vd. 2010; Yan vd. 2022; Llorens vd. 2009; Jasper vd. 2013).

Ülkemizde yapay sulak alan uygulamaları ekolojik ihtiyaç debisini karşılamak amacıyla kullanılmamasına rağmen, özellikle atıksu arıtımı için kullanıldığı örnekler mevcuttur (Gunes vd. 2021). Genellikle sistem performansları organik karbon, azot, fosfor, askıda katı madde açısından incelenmiştir. Daha ileri performans değerlendirmeleri ile (kalıcı organik kirleticiler, pestisitler, ilaç ve kişisel bakım ürünleri gibi), mevcut yapay sulak alanlar, atıksuların arıtımını sağlayarak ekolojik ihtiyaç debisini karşılamak amacıyla kullanılabilirler.

Bu çalışmanın amacı, arıtılmış atıksuların ekolojik ihtiyaç debisinin sağlanması amacıyla (ikame debisi olarak) akarsulara deşarjının incelenmesi ve bu deşarjların güvenli bir şekilde yapılabilmesi için deşarj öncesi bir tampon arıtma bölgesi olarak yapay sulak alanların etkinliğinin ortaya konulmasıdır.

## 2. Çevresel Akışın Belirlenmesi

Çevresel akış (ÇA) terimi, birçok ülkede barajdan bırakılan minimum akış uygulamasının günümüzdeki karşılığı olarak kullanılmaktadır. Çevresel akış, bir akarsu ekosisteminin sağlıklı kalabilmesi ve ekolojik işlevlerini sürdürebilmesi için gerekli su akışının ve seviyesinin miktarı, zamanlaması ve kalitesi olarak tanımlanır. Çevresel akış (ekolojik ihtiyaç debisi) çalışmalarında, çalışılan su kütlesi hidroloji, biyoloji, su kalitesi, bütünlük ve jeomorfolojik açıdan incelenmelidir. Akarsu rejimlerinde debilerin değişkenlik göstermesi, ekosistem için gerekli olan farklı fiziksel, kimyasal ve biyolojik işlevleri sağlayarak, periyodik olarak ekosistemin kendini yenilemesine imkân verir.

Çevresel akış veya ekolojik ihtiyaç debisi hesaplamalarında dikkat edilmesi gereken hususlar şu şekildedir (Williams vd. 2019):

- Aynı bölgede dahi olsa ekolojik debi ihtiyacı havzadan havzaya, nehirde nehrine değişebilir. Bazı nehirlerde insan kaynaklı etki, kentleşmenin etkisi ya da baraj gibi yapıların varlığı söz konusu olabilir; bu yüzden her nehir ayrı ayrı incelenmeli, genelleştirmeye gidilmemelidir.
- Olaya sadece hidrolojik açıdan bakmak, hidrolojiden etkilenen biyolojik değişimlerin göz ardı edilmesine yol açabilir.
- Nehirler sularla birlikte sediment, ağaç parçaları, sucul canlıları ve nütrientleri de taşır. Ekolojik ihtiyaç debisi belirlenirken tüm bu faktörler birlikte düşünülmelidir.
- Çevresel akış ayarlamaları ve nehir ağı çıkışındaki rezervuar kapasitesi, akım yönünü ve miktarını ayarlayabilen kanallar gibi yapay uygulamalar ile kontrol altında tutulmalıdır. Çevresel akışın belirlenmesi için hidrolojik, hidrolik, habitat benzeşimini esas alan ve bütünlük yöntemleri gibi çeşitli hesap yöntemleri kullanılmaktadır. Tablo 1'de bu yöntemlere ait kullanılan veriler ve modellere örnekler verilmiştir. Kuzey yarımkürenin ekonomik olarak gelişmiş ülkelerinde çevresel akış, habitat benzeşimini esas alan yöntemler kullanılarak hesaplanmaktadır. IFIM (Instream Flow Incremental Methodology) gibi habitat modelleri, deşarj gibi çevresel değişkenler ile seçilen hedef türler ve sucul canlılar arasında ampirik ilişkiyi tanımlamaya yaramaktadır. Gelişmekte ve çevre yasaları görece yeni ülkelerde hidrolojik senaryoları içeren ve havza genelinde akış gereksinimlerini simüle edebilen bütünlük yöntemleri kullanılmaktadır (Gopal 2013). İkame debisi olarak kullanılacak atıksuyun sadece

miktari ve hızı dikkate alındığında, atıksuyun deşarj edildiği nehirde ne gibi ekolojik değişikliklere yol açacağı göz ardı edilmektedir. Sağlık, sucul yaşam, nehir çevresi ekosistemi açısından birçok potansiyel tehlike taşıyan atıksu

deşarjlarında, su kalite parametreleri deşarj edilen bölgenin yapısına göre özelleştirilmelidir.

Tablo 1. Çevresel akış debisinin belirlenmesi için kullanılan yöntemler (Operacz vd. 2018).

ÇA yöntemi	Girdi verisi	Model örnekleri
<b>Hidrolojik</b>	Uzun yıllara ait günlük akım verileri	Tennant, 7Q10, Tessmann, IHA, RVA, DRM, ABF
<b>Hidrolik</b>	Akım hızları, nehir kesitleri	R2Cross method,
<b>Habitat benzeşimli</b>	Akım hızları, nehir kesitleri, balık türleri	PHABSIM, IFIM
<b>Bütünleşik</b>	Hidrolojik, hidrolik, ekolojik ve sosyal bilimler	BBM, ELOHA, DRIFT

Hidrolojik yöntemlerden olan Tennant yöntemi ile hidrolojik kayıtlar ve ortalama akımlar temel alınarak ekolojik olarak ihtiyaç duyulan su miktarı (çevresel akış) tahmin edilmeye çalışılır (Balbay 2011). Bu yöntemde göre, bir yıllık süre, kurak-az yağışlı dönem (Ekim-Mart) ve yağışlı dönem (Nisan-Eylül) olarak ikiye ayrılmaktadır. Burada, Tennant'ın esas aldığı kurak-az yağışlı dönem (Ekim-Mart) ile yağışlı dönem (Nisan-Eylül) bölgeden bölgeye ve ülkeden ülkeye değişim gösterecektir. Bu yüzden bu tür yöntemlerin uygulandığı coğrafyaya uygunluğunun araştırılması ve gerektiğinde revize edilmeleri gerekmektedir. Bir başka istatistiksel yöntem olan 7Q10 yöntemi, belli bir döneme ait günlük akış esas alınarak, her yıla ait minimum 7 günlük ortalama akımlar ile oluşturulan örnekte; akarsuda zamanın %90'ında mevcut olan minimum haftalık akış olarak tanımlanır (Köle 2015). Aralarında İngiltere, Bulgaristan, Tayvan ve Avustralya'nın da bulunduğu bazı ülkelerde aşılma ihtimali %5 olan veya zamanın %95'inde akarsuda mevcut olan debi (Q95); Brezilya (bazı eyaletler), Kanada ve İngiltere'de (bazı havzalar) zamanın %90'ında akarsuda mevcut günlük debi (Q90) ve çoğu Avrupa ülkesinde ise zamanın %99'unda akarsuda mevcut günlük debi (Q99) esas alınarak çevresel akış hesaplanmaktadır (TÜBİTAK 2013).

Ülkemizdeki mevcut mevzuata göre nehirler üzerine inşa edilen hidroelektrik santral (HES) tesislerinde doğal hayatın devamı için mansaba bırakılacak su miktarı projeye esas alınan son on yıllık ortalama akımın en az %10'u kadar olmak zorundadır (Tarım ve Orman Bakanlığı 2019). ÇED (Çevresel Etki Değerlendirme) sürecinde ekolojik ihtiyaçlar göz önüne alındığında bu miktarın yeterli olmayacağını belirlenmesi durumunda bu debi artırılabilir. Nehirler üzerinde kurulan su yapılarından can suyu olarak adlandırılan sabit bir minimum akış bırakılmasının ekolojik açıdan yeterli olmadığı, bu sistemlerde dinamik bir akışa ihtiyaç olduğu aşikardır. Ekolojik ihtiyaç debisi kavramı su kaynaklarında taban akış şartlarını sağlayacak can suyu olarak değil, iklim değişikliği etkili uzun kuraklık dönemlerinde, tarımsal sulama için aşırı su kullanıldığında ve nehrin morfolojisi değiştiğinde nehrin ve içindeki sucul yaşamın devamlılığını sağlayacak kaynak olarak görülmelidir.

### 3. Artırılmış Atıksu Deşarjının Çevresel Etkileri

Artırılmış atıksuların nehir kollarına doğrudan verilmesi durumunda, ilgili nehir havzalarının bütüncül bir yaklaşımla yönetilmesi gerekmektedir. Atıksu deşarjı, sadece nehir debisinde bir değişikliğe yol açmamakta, tüm sucul yaşamı ve dolaylı olarak insan ve çevre sağlığını da etkilemektedir. Atıksularla beslenen akarsulardaki başlıca sorunlar; değişen hidrograflar, artan besi ve kirlenici konsantrasyonları, değişen şartlara toleranslı türlerin artan baskınlığı ile azalan biyoçeşitlilik, sucul canlıların biyolojisinde ve popülasyonunda değişimler olarak sıralanabilir (Violin vd. 2011; Walsh, Fletcher, ve Ladson 2005). Geleneksel arıtma tesisleri ileri arıtım ünitelerine sahip olsa bile, endokrin bozucular, ilaçlar, pestisitler, kişisel bakım ürünleri ve yüzey aktif maddelerin giderimini sağlamakta yetersiz kalabilmektedir (Gorito vd. 2018; Matamoros ve Rodríguez 2017). Bazı çalışmalarda, artırılmış atıksular ile beslenen nehirlerde yaşayan balıklarda daha yüksek

oranda ilaç kalıntılarının olduğu tespit edilmiştir (Grabicova vd. 2015; Schultz vd. 2010).

İnsani tüketim amaçlı kullanılan ve kullanılmayan su kaynaklarında artırılmış suların tekrar kullanımı farklı açılardan değerlendirilmelidir. Kuraklığın yoğun yaşandığı ve aşırı su çekiminin olduğu bölgelerde, artırılmış atıksu deşarjlarının sucul ekosistem üzerine olumsuz etkisi olabilmektedir. Örneğin, artırılmış atıksu deşarjı su sıcaklığının artmasına yol açmakta, bu durum da bazı sucul canlılarda cinsiyet, parazitlik, büyüme oranları ve popülasyon dağılımını etkileyebilmektedir (Bonada ve Resh 2013; Brooks, Riley, ve Taylor 2006). Atıksu deşarjlarının sürekli ya da ani olması da akarsu habitat kalitesi üzerinde olumlu ya da olumsuz etki bırakabilir.

Aralıklı (kesikli/mevsimlik) akışa sahip olan akarsularda, artırılmış atıksu deşarjı ile bu akarsular yüksek debili akarsulara dönüştürülebilir, ancak akış değişimi, fauna ve flora yapısını etkileyerek istilacı türlerin artmasına yol açabilir (Luthy vd. 2015). Yıllık akış durumu ıslak/kuru döngüsünde olan nehirlerde atıksu deşarjlarına dikkat edilmelidir. Nehir kıyısı ve su biyotası bu döngüye dayanacak şekilde uyum sağlamıştır. İnsani tüketim amaçlı kullanılacak sularda ise artırılmış su kullanımında su kalitesine yönelik parametrelerin takibinin yapılması gerekmektedir. Artan sıcaklık, nütrient miktarları, çözülmüş oksijen seviyesi, ilaç maddeleri, endokrin bozucular ve pestisitler gibi su kalitesi parametreleri ile mikro kirleniciler, artırılmış atıksu deşarj edilen nehirlerde sorun oluşturabilmektedir (Hamdhani, Eppehimer, ve Bogan 2020; Chen vd. 2009; Hur vd. 2007). Atıksu deşarjlarının gerçekleştiği mansap noktasında daha düşük çözünmüş oksijen seviyesi görülmekte, bu durum balık ölümleri ve toksik fitoplankton patlamalarına yol açabilmektedir (Carey ve Migliaccio 2009; Matamoros ve Rodríguez 2017). İsrail'de gerçekleştirilen bir çalışmada, artırılmış atıksuların verildiği nehrin balık popülasyonu ve çeşitliliğinin atıksu deşarjı verilmeyen nehre göre daha az, fakat biyokütle açısından daha yüksek olduğu görülmüştür (Gafny, Goren, ve Gasith 2000).

Tüm bu muhtemel ve mevcut olumsuz etkilere rağmen artırılmış suların deşarjı, özellikle kuraklığın yaygın olduğu ve insan kaynaklı su çekiminin çok olduğu bölgelerde çevresel akış debisini sağlayarak ekolojik bütünlüğü korumaya yardımcı olmaktadır. ABD'nin Teksas eyaletinde bulunan Trinity Nehri'nin, Dallas-Fort Worth ile Houston yakınlarındaki Livingston Gölü arasındaki 320 km'lik bölümünde gerçekleştirilen artırılmış atıksu deşarjı ile nehir ekosisteminde iyileşmeler (düzenli akım rejimi) ve yaşayan balık türlerinde artış görülmüştür (Luthy vd. 2015). Trinity Nehri örneği ayrıca su sıkıntısı çeken bölgelerde nehir akışlarının yönetimi ile ilgili zorlukları da göstermektedir. Kentsel gelişimden önce, yarı kurak ve kurak bölgelerdeki diğer birçok nehir gibi, yazın bazı dönemlerinde tamamen kuruyan Trinity Nehri, havzadaki hızlı nüfus artışından sonra, çevresel akışını yıl boyunca Dallas-Fort Worth bölgesinden gelen atıksu deşarjlarıyla sürdürür hale gelmiştir. Diğer kollarından çok az girdi alan (beslenen) Trinity Nehri'nin baz akışı/çevresel akışı neredeyse tamamen artırılmış atıksudan oluşmaktadır. Bir zamanlar artırılmamış atıksu ve mezbaha atıklarıyla yoğun bir şekilde kirlenen bu nehrin su kalitesi, 1972

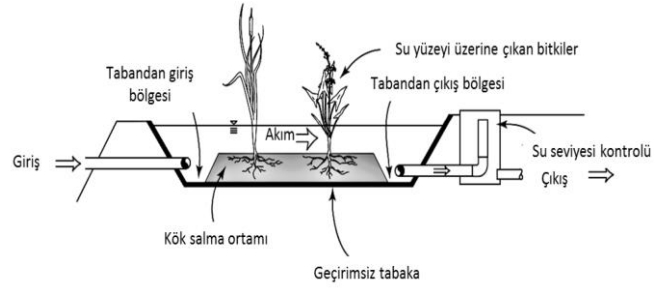


tarihli ABD Temiz Su Yasası'nın kabul edilmesinin ardından, atıksu arıtma tesislerinin ve diğer altyapının inşa edilmesinin bir sonucu olarak büyük ölçüde iyileştirilmiştir. Nehirde yaşayan balık türlerinin gözlemlenen sayısı 1970'lerin başında 4 iken, 1990'larda 25'e yükselmiştir (Luthy vd. 2015).

## 4. Tampon Bölge Olarak Yapay Sulak Alan Uygulamaları

Daha önce de belirtildiği gibi, aktif çamur sistemine dayalı biyolojik ve ileri biyolojik atıksu arıtma tesisleri, toplumda endişe yaratan ve artırılmış atıksuyun yeniden kullanımı konusunda engel teşkil eden kalıcı organik kirleticileri gidermek için tam olarak yeterli değildir. Alternatif olarak, fotokataliz (Murgolo vd. 2019), ozonlama (Deng 2020) ve membran bazlı teknolojiler (mikrofiltrasyon, ultrafiltrasyon, nanofiltrasyon, ters osmoz) (Mansas vd. 2020) gibi ileri arıtma proseslerinin, kalıcı organik kirleticilerin gideriminde etkili olduğu gösterilmiştir. Ancak yüksek maliyetler ve bakım gereksinimleri, özellikle kırsal alanlarda ve merkezi olmayan atıksu arıtma tesisleri (AAT) inşaatlarında bu teknolojilerin kapsamlı uygulamalarını sınırlamıştır (Li vd. 2020). Bu bağlamda yapay sulak alanlar (YSA) umut verici bir alternatif olarak değerlendirilmiştir (Gallego-Schmid ve Tarpani 2019). Saha uygulamalarının yanı sıra birçok çalışma, yapay sulak alanların kalıcı organik kirleticilerin giderimindeki etkinliğini göstermiştir (Yan vd. 2022; Jasper ve Sedlak 2013; Llorens vd. 2009). Yan vd. 2022, sulak alanlarda iz organik kirletici giderimi ile ilgili çalışmada, pH, çözünmüş oksijen, Eh (redoks potansiyeli), kirletici başlangıç konsantrasyonu ve YSA çalışma süresi gibi parametrelerin giderim verimliliğini belirlediğini bulmuştur. İspanya'da evsel atıksu arıtma tesisi çıkış suyu verilen serbest yüzey akışlı YSA'da 8 adet ilaç ve kişisel bakım ürünlerinin (PPCP) giderimleri incelenmiştir. PPCP'lere ilişkin sonuçlar, sulak alanın bu bileşiklerin büyük bir kısmını giderme konusunda iyi bir kapasiteye sahip olduğunu göstermiştir. Klofibrinik asit (%34) ve karbamazepin (%39) hariç diğer maddeler için (ibuprofen, naproxen, diclofenac, ketoprofen, galaxolide ve tonalide) giderim verimliliği %70'ten yüksek olarak belirlenmiştir (Llorens vd. 2009). Atıksu arıtma tesislerinde ilaç ve kişisel bakım ürünleri (ketoprofen, naproxen, ibuprofen, diclofenac, salicylic acid, klofibrinik acid, furosemide, kafein ve methyl dihydrojasmonate) giderimini, hibrit çalışan yapay sulak alanlardaki giderim ile kıyaslayan bir çalışmada, YSA'ların en az arıtma tesisleri kadar performans gösterdiği bulunmuştur. Genel olarak bu kirleticilerin giderim verimi YSA'larda %70 ve üzerinde olup, biyolojik parçalanma mekanizması ile giderim sağlanmıştır (Hijosa-Valsero vd. 2010). Sulak alanlar, suya doymuş toprak koşullarına uyum sağlamış bitki türlerini barındıran ve bu koşulları sağlamaya yetecek sıklıkta ve süreklilikte yüzey suyu ya da yeraltı suyu tarafından doymuş veya suyla kaplanmış alanlardır. Sulak alanların temel özelliği, sürekli veya periyodik olarak dip yüzeyinde suya doymuluk veya suyla kaplı olma durumu ve bu durumu yansıtan fiziksel, kimyasal ve biyolojik unsurlara sahip olmasıdır. Sulak alan ekosistemlerinin yüksek biyolojik aktiviteye sahip sistemler olması, bu sistemlerde atıksularda rastlanan birçok kirletici maddenin dönüşümünün gerçekleşmesine imkan vermektedir (Kadlec ve Wallace 2008). Yapay sulak alanlar (YSA) ise, sulak alan ekosistemlerinin bu özelliğini öne çıkaran arıtma amaçlı tasarlanmış sistemlerdir (Şekil 1). Yapay sulak alanlarda kalıcı organik kirleticilerin giderim mekanizmaları olarak adsorpsiyon, fotodegradasyon, hidroliz, biyolojik ayrışma ve bitki alımı ön plana çıkmaktadır (Yan vd. 2022). Yapay sulak alanların kullanımının yaygınlaşmasının önündeki en büyük engellerden biri, istenen kirletici giderim performansını sağlayacak büyüklükte uygun arazinin bulunması ve öngörülebilir performansa sahip sulak alanların tasarlanmasının zorluğudur. Sulak alanların arıtım performansında hidrolojik rejime doğrudan bağlı olan bekleme süresi ve hidrolik yüklenme hızı, göz önüne alınması gereken iki önemli kriterdir. Küçük yerleşim yerleri için sulak alan boyutlandırılmasında hidrolik yüklenme hızının 2-5 cm/gün aralığında tutulması tavsiye edilirken, uygulamada 1-22 cm/gün aralığında değişen hidrolik yüklemeye sahip sistemler mevcuttur (Kadlec ve Wallace 2008). Mekanik arıtma sistemleri ile karşılaştırıldığında, yapay sulak alanlarda meydana gelen kirletici

taşınma ve dönüşüm süreçleri daha



Şekil 1. Örnek bir yapay sulak alan (YSA) kesiti (Kadlec ve Wallace 2008).

da karmaşıktır. Bununla birlikte, mekanistik araştırmaların sağladığı bilgiler ışığında yapay sulak alanlar belirli bir kirletici kümesinin giderilmesine yönelik "birim proses" yaklaşımıyla tasarlanabilir (Jasper vd. 2013). Bu yaklaşımın temelini, farklı özelliklere sahip sulak alan hücrelerinin farklı kirleticilerin giderimi için optimize edilerek birbirine seri bağlı şekilde kullanılması oluşturur. Bu tür birim proseslerin farklı özellikteki kalıcı organik kirleticileri içeren bir artırılmış atıksu için nasıl tasarlanabileceğine dair bir örnek vermek gerekirse, ilk adımda sığ olarak (~20 cm su derinliği) tasarlanmış ve açık su yüzeyine sahip bitkisiz bir hücre, fotobozunma reaksiyonlarının verimli bir şekilde gerçekleşmesi amacıyla tasarlanabilir. Bu hücrede direkt ve indirekt fotoliz reaksiyonları ile kirletici dönüşümü gerçekleşir (Jasper vd. 2013). Amerika Birleşik Devletleri'nin Kaliforniya eyaletindeki Discovery Bay pilot ölçekli sulak alan sisteminde bu şekilde tasarlanan hücrelerde direkt ve indirekt fotoliz reaksiyonları sonucu bir dizi kalıcı organik kirleticinin yüksek verim (~%90) ile giderildiği gösterilmiştir (Jasper ve Sedlak 2013). Sığ olarak tasarlanmış hücrenin ardından biraz daha derin (~60 cm su derinliği) ve yoğun bitki içeren diğer tip hücrelerde (reaktörler) çökeltme ve biyolojik ayrışma proseslerinin yanısıra hidrofobik kirleticilerin adsorpsiyonu gerçekleşir. Bitki köklerinin etrafındaki rizosfer denilen bölgede aerobik mikroorganizmalar faaliyet gösterirken, köklerden uzak bölgelerde anaerobik mikroorganizmaların etkinliğiyle zengin bir mikrobiyal faaliyet gerçekleşir. Takip eden hücrelerde farklı bitki türleri kullanılarak giderim performansı optimize edilebilir.

Kaliforniya'daki Santa Ana Nehri yakınlarındaki Prado Sulak Alanları, yapay sulak alanların atıksuyun çevresel akış amaçlı yeniden kullanımında tampon bölge olarak oynayabileceği role güzel bir örnektir (Luthy vd. 2015). Atıksu arıtma tesislerinden yüksek miktarda atıksu deşarjı alan nehir boyunca inşa edilen yapay sulak alanlar, nehir içme suyu kaynağı olarak kullanılan yeraltı suyunu beslemeden önce nitrat giderimini sağlamaktadır. Nitrat giderimi fakültatif heterotrof bakteriler tarafından nitrat azotunun azot gazına indirgenmesi ile tarif edilen denitrifikasyon prosesi ile gerçekleşmektedir. Bu işlem sulak alan sedimentlerinin anaerobik tabakasında gerçekleşir ve işlem sırasında kolay parçalanabilir karbona ihtiyaç duyulur. Atıksu arıtma tesisleri tarafından nehre deşarj edilen atıksular, yapay sulak alan arıtımından geçtikten sonra nehrin mansabında yeraltı sularına beslenmektedir. Yaz mevsiminde, bu sulak alanlar nitrat konsantrasyonlarını yaklaşık 8 mg L<sup>-1</sup>'den 1 mg L<sup>-1</sup>'in altına düşürmektedir (Luthy vd. 2015). 1992'de inşa edilen bu sulak alan sistemi 5 milyon dolara mal olurken, mevcut arıtma tesislerine nitrat giderimi için ilave ileri arıtım ünitelerinin eklenmesinin 100-200 milyon dolara denk geleceği tahmin edilmiştir. Bu örnekte yapay sulak alanların maliyet açısından üstünlüğü çarpıcı bir şekilde ortaya konmuştur.

Atıksuyun çevresel akış için uygun hale getirilmesinde kullanılan yapay sulak alanlara bir başka örnek de İsrail'in Yarqon Nehri'dir (Luthy vd. 2015). Yarqon Nehri aynı zamanda, bir nehrin ekolojik koşullarının ve kültürel değerlerinin rehabilite edilmesinde paydaş katılımının iyi bir örneğidir. Nehrin ekolojik ve kültürel

rehabilitasyonuna paydaşların katılımını sağlamak amacıyla 1988 yılında Yarqon Nehri Otoritesi (YRA) oluşturulmuştur. Amonyak azotu toksisitesi ve yüksek biyokimyasal oksijen ihtiyacı (BOİ), yerel kırmızı kuyruklu sazan türü olan *Acanthobrama telavivensis*'in nehirdeki vahşi popülasyonunun yok olmasına neden olmuştur. Nehir ekosistemini koruma amaçlı, 2003 yılında atıksu deşarj standartları yükseltilmiş ve bu standartları sağlayabilmek amacıyla 2008 yılında, Yarqon Nehri'ne deşarj öncesi günde 25.000 m<sup>3</sup>'e kadar atıksuyu arıtmak için bir yapay sulak alan tasarlanmıştır. Geleneksel bir serbest yüzey akışlı sulak alanda, amonyak azotunu 5 mg L<sup>-1</sup>'den 1 mg L<sup>-1</sup>'e düşürmek için yüksek miktarda araziye ihtiyaç duyulduğu belirlenmiştir. Mevcut durumda alanın yetersiz olması sebebiyle, sulak alan tasarımı revizyon yapılmıştır. Yeni tasarlanan sulak alan, doldur boşalt şeklinde çalışan üç hücreye bölünmüş; bu hücreler sifonlar aracılığıyla ortalama 25.000 m<sup>3</sup>/gün hızla boşaltılmıştır. Dolma ve boşalma döngüleri sırasında amonyak azotunun oksidasyonu ile nitrifikasyon gerçekleşmekte; denitrifikasyon ise dolu haldeki döngü sırasında yeterli organik karbon olması durumunda gerçekleşmektedir. Yapay sulak alan uygulaması ile nehirdeki amonyak azotu konsantrasyonları azaltılmış, böylelikle sivrisinek kontrolü de sağlayan ve neredeyse yok olmuş endemik balık türü yeniden ortaya çıkmıştır (Garcia ve Pargament 2015).

## 5. Sonuç ve Öneriler

Birçok nehir havzasında, mevsimsel yağış değişkenlikleri su akışlarında dalgalanmaya sebep olmaktadır. Mevsimsel dalgalanmalarla birlikte sulama amaçlı nehir suyu kullanılması, hidroelektrik santralleri, kuraklık dönemleri, orman yangınları ve iklim değişikliği hidrolojik rejim değişikliklerine yol açmakta; bu durum nehir ekosistemini olumsuz yönde etkilemektedir. Mevsimsel değişkenlikler, suyun nehre girmeden önce geçirdiği serüven ve özellikle kurak dönemlerdeki nehrin akış geçmişi göz önünde bulundurularak, arıtılmış atıksular ile nehirler beslenebilir. Böylelikle bu sular okyanuslara/denizlere deşarj edilmelerine göre daha kısa yoldan yeniden kullanıma ve su döngüsüne girerler. Burada açıklanan vaka çalışmaları, çevresel akışı sağlamak ve yüksek oranda bozulmuş kent içi akarsuları yenilemek için atıksu kullanmanın değerini göstermektedir. Önümüzdeki 50 ila 100 yıl boyunca, nüfus artışı, ekonomik kalkınma ve iklim değişikliğinin kent içi nehirleri özellikle kurak ve yarı kurak bölgelerde daha da fazla baskı altına alacağı düşünülürse, arıtılmış atıksuların çevresel akışı ikame amacıyla kullanılması kaçınılmaz hale gelecektir. Arıtılmış atıksuların çevresel akış için yeniden kullanılmasında dikkat edilecek en önemli hususlar, atıksuyun nehir ekosistemini tehdit eden kirleticilerden arındırılmış olması ve nehrin doğal habitatının korunmasıdır. Atıksularda bulunan mikrokirleticilerin yapay sulak alanlarda arıtımına dair çalışmalarda son yıllarda belirgin bir artış gözlemlense de, nehir ekosistemlerini tehdit eden endokrin bozucular, pestisitler, mikroplastikler gibi kirletici maddelere ait çalışmaların daha da yoğunlaşması gerekmektedir. "Birim proses yaklaşımıyla" inşa edilen yapay sulak alanlarda, arıtılmış atıksular nehre verilmeden önce ilave bir arıtım gerçekleştirilerek, geleneksel arıtma tesislerinde giderilemeyen kirleticilerin giderilebilmesi için sulak alan tasarımı kademelendirme yapılabilmekte ve proses işletimi sağlanabilmektedir.

Ülkemizdeki yapay sulak alan uygulamalarının sayısı son derece yetersizdir ve küçük ölçekli evsel atıksu arıtımı uygulamaları ile sınırlı kalmıştır. Arazi uygunluğunun sağlanabildiği yerlerden başlanarak nehir ekosistemi ölçeğinde çevresel akışı ikame amaçlı serbest yüzey akışlı sulak alan uygulamaları teşvik edilmelidir. Bu projelerin sağlıklı bir şekilde hayata geçirilebilmesi için mevzuattaki boşluklar giderilmeli ve kirleticiler için standartlar ortaya konmalıdır. Tasarlanan sistemler işletmeye alındıktan sonra düzenli izleme çalışmaları ile arıtılmış atıksudaki kirletici parametreler takip edilmeli, nehir ekosistemindeki değişiklikler izlenerek düzenli olarak kayıt altına alınarak değerlendirilmelidir.

## 6. Teşekkür ve Bilgi

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

## 7. Kaynaklar

- Alcon, F., Martin-Ortega, J., Berbel, J., & de Miguel, M. D. (2011). Environmental benefits of reclaimed water: An economic assessment in the context of the Water Framework Directive. *Water Policy*, 14(1), 148-159. <https://doi.org/10.2166/wp.2011.001>
- Balbay, Ü. C. (2011). Hidroelektrik Santral Projelerinde Ekosistem Su İhtiyacının Belirlenmesi ve Türkiye'deki Uygulamalar [Doktora tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi].
- Bischel, H. N., Lawrence, J. E., Halaburka, B. J., Plumlee, M. H., Bawazir, A. S., King, J. P., ... Luthy, R. G. (2013). Renewing urban streams with recycled water for streamflow augmentation: Hydrologic, water quality, and ecosystem services management. *Environmental Engineering Science*, 30(8), 455-479. <https://doi.org/10.1089/ees.2012.0201>
- Bonada, N., & Resh, V. (2013). Mediterranean-climate streams and rivers: Geographically separated but ecologically comparable freshwater systems. *Hydrobiologia*, 719. <https://doi.org/10.1007/s10750-013-1634-2>
- Brooks, B. W., Riley, T. M., & Taylor, R. D. (2006). Water quality of effluent-dominated ecosystems: Ecotoxicological, hydrological, and management considerations. *Hydrobiologia*, 556(1), 365-379. <https://doi.org/10.1007/s10750-004-0189-7>
- Carey, R. O., & Migliaccio, K. W. (2009). Contribution of wastewater treatment plant effluents to nutrient dynamics in aquatic systems: A review. *Environmental Management*, 44(2), 205-217. <https://doi.org/10.1007/s00267-009-9309-5>
- Chen, B., Nam, S-N., Westerhoff, P. K., Krasner, S. W., & Amy, G. (2009). Fate of effluent organic matter and DBP precursors in an effluent-dominated river: A case study of wastewater impact on downstream water quality. *Water Research*, 43(6), 1755-1765. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2009.01.020>
- Deng, H. (2020). A review on the application of ozonation to NF/RO concentrate for municipal wastewater reclamation. *Journal of Hazardous Materials*, 391. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.122071>
- Gafny, S., Goren, M., & Gasith, A. (2000). Habitat condition and fish assemblage structure in a coastal Mediterranean stream (Yarqon, Israel) receiving domestic effluent. *Hydrobiologia*, 422/423, 319-330. <https://doi.org/10.1023/A:1017040017238>
- Gallego-Schmid, A., & Tarpani, R. R. Z. (2019). Life cycle assessment of wastewater treatment in developing countries: A review. *Water Research*, 153, 63-79. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.01.010>
- Garcia, X., & Pargament, D. (2015). Rehabilitating rivers and enhancing ecosystem services in a water-scarcity context: The Yarqon River. *International Journal of Water Resources Development*, 31(1), 73-87.

- <https://doi.org/10.1080/07900627.2014.911147>
- Gopal, B. (2013). Methodologies for the assessment of environmental flows. In *Environmental Flows: An Introduction for Water Resources Managers* (pp. 129-172). National Institute of Ecology, India.
- Gorito, A. M., Ribeiro, A. R., Gomes, C. R., Almeida, C. M. R., & Silva, A. M. T. (2018). Constructed wetland microcosms for the removal of organic micropollutants from freshwater aquaculture effluents. *Science of The Total Environment*, *644*, 1171-1180. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.06.371>
- Graaf, I. E. M. de, Gleeson, T., van Beek, L. P. H. R., Sutanudjaja, E. H., & Bierkens, M. F. P. (2019). Environmental flow limits to global groundwater pumping. *Nature*, *574*(7776), 90-94. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1594-4>
- Grabičová, K., Grabič, R., Bláha, M., Kumar, V., Cervený, D., Fedorova, G., ... Randák, T. (2015). Presence of pharmaceuticals in benthic fauna living in a small stream affected by effluent from a municipal sewage treatment plant. *Water Research*, *72*, 145-153. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2014.09.018>
- Gunes, K., Masi, F., Ayaz, S., Tuncsiper, B., & Besiktas, M. (2021). Domestic wastewater and surface runoff treatment implementations by constructed wetlands for Turkey: 25 years of experience. *Ecological Engineering*, *170*, 106369. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2021.106369>
- Haddis, A., Van Der Bruggen, B., & Smets, I. (2020). Constructed wetlands as nature based solutions in removing organic pollutants from wastewater under irregular flow conditions in a tropical climate. *Ecohydrology & Hydrobiology*, *20*(1), 38-47. <https://doi.org/10.1016/j.ecohyd.2019.03.001>
- Halaburka, B. J., Lawrence, J. E., Bischel, H. N., Hsiao, J., Plumlee, M. H., Resh, V. H., ... Luthy, R. G. (2013). Economic and ecological costs and benefits of streamflow augmentation using recycled water in a California coastal stream. *Environmental Science & Technology*, *47*(19), 10735-10743. <https://doi.org/10.1021/es305011z>
- Hamdhani, H., Eppehimer, D. E., & Bogan, M. T. (2020). Release of treated effluent into streams: A global review of ecological impacts with a consideration of its potential use for environmental flows. *Freshwater Biology*, *65*(9), 1657-1670. <https://doi.org/10.1111/fwb.13519>
- Hijosa-Valsero, M., Matamoros, V., Martín-Villacorta, J., Bécares, E., & Bayona, J. M. (2010). Assessment of full-scale natural systems for the removal of PPCPs from wastewater in small communities. *Water Research*, *44*(5), 1429-1439. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2009.10.032>
- Hur, J., Schlautman, M. A., Karanfil, T., Smink, J., Song, H., Klaine, S. J., & Hayes, J. C. (2007). Influence of drought and municipal sewage effluents on the baseflow water chemistry of an upper Piedmont river. *Environmental Monitoring and Assessment*, *132*(1), 171-187. <https://doi.org/10.1007/s10661-006-9513-1>
- Jasper, J. T., Nguyen, M. T., Jones, Z. L., Ismail, N. S., Sedlak, D. L., Sharp, J. O., Luthy, R. G., Horne, A. J., & Nelson, K. L. (2013). Unit process wetlands for removal of trace organic contaminants and pathogens from municipal wastewater effluents. *Environmental Engineering Science*, *30*(8), 421-436. <https://doi.org/10.1089/ees.2012.0239>
- Jasper, J. T., & Sedlak, D. L. (2013). Phototransformation of wastewater-derived trace organic contaminants in open-water unit process treatment wetlands. *Environmental Science & Technology*, *47*(19), 10781-10790. <https://doi.org/10.1021/es304334w>
- Kadlec, R. H., & Wallace, S. (2008). *Treatment wetlands*. CRC Press.
- Köle, M. M. (2015). Boğazköy Baraj Ve Hes'inden Akışaşağıya Bırakılması Gereken Asgari Su Miktarının Bulunmasına Yönelik Bir Değerlendirme: Tennant Ve Akim Süreklilik Yöntemleri. *Marmara Coğrafya Dergisi*, *0*(32), 326. <https://doi.org/10.14781/mcd.64692>
- Li, X., Li, Y., Lv, D., Li, Y., & Wu, J. (2020). Nitrogen and phosphorus removal performance and bacterial communities in a multi-stage surface flow constructed wetland treating rural domestic sewage. *Science of The Total Environment*, *709*, 136235. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.136235>
- Llorens, E., Matamoros, V., Domingo, V., Bayona, J. M., & García, J. (2009). Water quality improvement in a full-scale tertiary constructed wetland: Effects on conventional and specific organic contaminants. *Science of The Total Environment*, *407*(8), 2517-2524. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2008.12.042>
- Luthy, R. G., Sedlak, D. L., Plumlee, M. H., Austin, D., & Resh, V. H. (2015a). Wastewater-effluent-dominated streams as ecosystem-management tools in a drier climate. *Frontiers in Ecology and the Environment*, *13*(9), 477-485. <https://doi.org/10.1890/150038>
- Luthy, R. G., Sedlak, D. L., Plumlee, M. H., Austin, D., & Resh, V. H. (2015b). Wastewater-effluent-dominated streams as ecosystem-management tools in a drier climate. *Frontiers in Ecology and the Environment*, *13*(9), 477-485.
- Mansas, C., Mendret, J., Brosillon, S., & Ayrat, A. (2020). Coupling catalytic ozonation and membrane separation: A review. *Separation and Purification Technology*, *236*, 116221. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2019.116221>
- Matamoros, V., & Rodríguez, Y. (2017). Influence of seasonality and vegetation on the attenuation of emerging contaminants in wastewater effluent-dominated streams. A preliminary study. *Chemosphere*, *186*, 269-277. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.07.157>
- Murgolo, S., Franz, S., Arab, H., Bestetti, M., Falletta, E., & Mascolo, G. (2019). Degradation of emerging organic pollutants in wastewater effluents by electrochemical photocatalysis on nanostructured TiO<sub>2</sub> meshes. *Water Research*, *164*, 114920. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.114920>
- Operacz, A., Wałęga, A., Cupak, A., & Tomaszewska, B. (2018). The comparison of environmental flow assessment - The barrier for investment in Poland or river protection? *Journal of Cleaner Production*, *193*, 575-592. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.05.098>



- Plumlee, M. H., Gurr, C. J., & Reinhard, M. (2012). Recycled water for stream flow augmentation: Benefits, challenges, and the presence of wastewater-derived organic compounds. *Science of The Total Environment*, 438, 541-548. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.08.062>.
- Schultz, M. M., Furlong, E. T., Kolpin, D. W., Werner, S. L., Schoenfuss, H. L., Barber, L. B., Blazer, V. S., Norris, D. O., & Vajda, A. M. (2010). Antidepressant pharmaceuticals in two U.S. effluent-impacted streams: Occurrence and fate in water and sediment, and selective uptake in fish neural tissue. *Environmental Science & Technology*, 44(6), 1918-1925. <https://doi.org/10.1021/es9022706>.
- Tarım ve Orman Bakanlığı. (2019). Elektrik Piyasasında Üretim Faaliyetinde Bulunmak Üzere Su Kullanım Hakkı Anlaşması İmzalanmasına İlişkin Usul Ve Esaslar Hakkında Yönetmelik.
- TÜBİTAK, MAM ÇEVRE ENSTİTÜSÜ. (2013). Havza Koruma Eylem Planlarının Hazırlanması – Büyük Menderes Havzası.
- Violin, C. R., Cada, P., Sudduth, E. B., Hassett, B. A., Penrose, D. L., & Bernhardt, E. S. (2011). Effects of urbanization and urban stream restoration on the physical and biological structure of stream ecosystems. *Ecological Applications*, 21(6), 1932-1949. <https://doi.org/10.1890/10-1551.1>.
- Walsh, C. J., Fletcher, T. D., & Ladson, A. R. (2005). Stream restoration in urban catchments through redesigning stormwater systems: Looking to the catchment to save the stream. *Journal of the North American Benthological Society*, 24(3), 690-705. <https://doi.org/10.1899/04-020.1>.
- WaterReuse California. (2019). California WaterReuse Action Plan. Erişim tarihi (Aralık 2023) <https://waterreuse.org/>.
- Williams, J. G., Moyle, P. B., Webb, A., & Kondolf, G. M. (2019). Environmental flow assessment: Methods and applications. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, Inc.
- Wolfand, J. M., Taniguchi-Quan, K. T., Abdi, R., Gallo, E., Irving, K., Philippus, D., Rogers, J. B., Stein, E. D., & Hogue, T. S. (2022). Balancing water reuse and ecological support goals in an effluent-dominated river. *Journal of Hydrology X*, 15, 100124. <https://doi.org/10.1016/j.hydroa.2022.100124>.
- Wu, W.-Y., Lo, M.-H., Wada, Y., Famiglietti, J. S., Reager, J. T., Yeh, P. J.-F., Ducharme, A., & Yang, Z.-L. (2020). Divergent effects of climate change on future groundwater availability in key mid-latitude aquifers. *Nature Communications*, 11(1), 3710. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-17581-y>.
- Yan, J., Hu, X., Chen, M., Zhang, J., Guo, F., Vymazal, J., & Chen, Y. (2022). Meta-analysis of the removal of trace organic contaminants from constructed wetlands: Conditions, parameters, and mechanisms. *Ecological Engineering*, 178, 106596. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2022.106596>.

