

ÇEVRE BİLİMLERİ VE MÜHENDİSLİĞİ ALANINDA GÜNCEL KONULAR VE AKADEMİK DEĞERLENDİRMELER

Editör: Dr.Öğr.Üyesi Saadet HACISALİHOĞLU



yaz
yayınları

**Çevre Bilimleri ve Mühendisliği Alanında
Güncel Konular ve Akademik Değerlendirmeler**

Editör

Dr.Öğr.Üyesi Saadet HACISALİHOĞLU

yaz
yayınları

2026

**Çevre Bilimleri ve Mühendisliği Alanında
Güncel Konular ve Akademik
Değerlendirmeler**

Editör: Dr.Öğr.Üyesi Saadet HACISALİHOĞLU

© YAZ Yayınları

Bu kitabın her türlü yayın hakkı Yaz Yayınları'na aittir, tüm hakları saklıdır. Kitabın tamamı ya da bir kısmı 5846 sayılı Kanun'un hükümlerine göre, kitabı yayınlayan firmanın önceden izni alınmaksızın elektronik, mekanik, fotokopi ya da herhangi bir kayıt sistemiyle çoğaltılamaz, yayımlanamaz, depolanamaz.

E_ISBN 978-625-8926-84-2

Ekim 2026 – Afyonkarahisar

Dizgi/Mizanpaj: YAZ Yayınları

Kapak Tasarım: YAZ Yayınları

YAZ Yayınları. Yayıncı Sertifika No: 73086

M.İhtisas OSB Mah. 4A Cad. No:3/3

İscehisar/AFYONKARAHİSAR

www.yazyayinlari.com

yazyayinlari@gmail.com

İÇİNDEKİLER

Kömür Madenciliğinde Sera Gazı Emisyonlarının Kaynakları ve Karbon Ayak İzinin Belirlenmesi.....	1
<i>Gizem SOLMAZ, Abdullah YİNANÇ</i>	

Sustainable Pollution Control at the Intersection of Green Chemistry and Environmental Engineering	22
<i>Zeynep YÜCESOY, Çiğdem KALKAN AKTAN</i>	

"Bu kitapta yer alan bölümlerde kullanılan kaynakların, görüşlerin, bulguların, sonuçların, tablo, şekil, resim ve her türlü içeriğin sorumluluğu yazar veya yazarlarına ait olup ulusal ve uluslararası telif haklarına konu olabilecek mali ve hukuki sorumluluk da yazarlara aittir."

KÖMÜR MADENCİLİĞİNDE SERA GAZI EMİSYONLARININ KAYNAKLARI VE KARBON AYAK İZİNİN BELİRLENMESİ

Gizem SOLMAZ¹

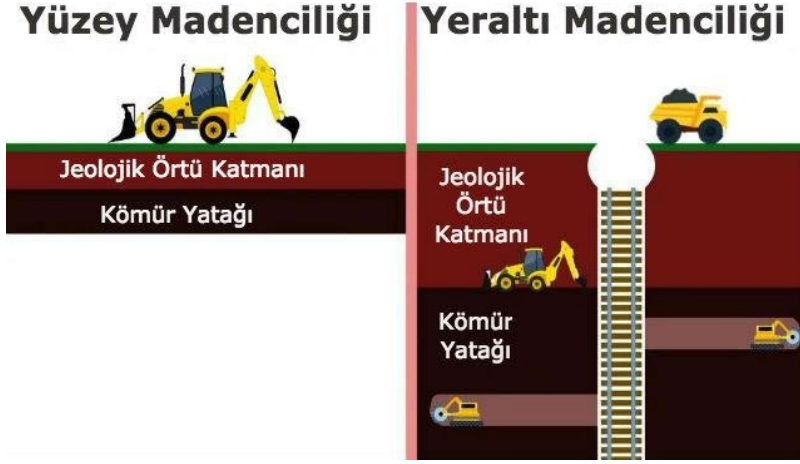
Abdullah YİNANÇ²

1. GİRİŞ

Kömür, milyonlarca yıl süren jeolojik süreçler sonucunda bitkisel organik maddelerin dönüşümüyle oluşan yenilenemeyen bir fosil enerji kaynağıdır. Dünya genelinde enerji üretiminin önemli bir kısmı hâlen kömür kaynaklıdır. Enerji talebinin artmasıyla birlikte fosilyakıtların kullanımı artmıştır. Kömür, dünyadaki birincil enerji tüketiminin yaklaşık %27'sini, elektrik üretiminin ise %35'ini karşılamaktadır. Kömür, dünya enerji arzının önemli bir kısmını karşılamasına rağmen, çevresel etkileri bakımından eleştirilmektedir. Kömür üretimi ve kullanımı sırasında açığa çıkan karbon dioksit (CO₂) ve metan (CH₄) emisyonları, iklim değişikliğinin temel nedenlerinden biri olan sera gazı birikimine hem doğrudan hem de dolaylı olarak katkı sağlamaktadır. Bu nedenle kömür üretim süreçlerinin çevresel etkilerinin, özellikle de karbon ayak izi bileşenlerinin değerlendirilmesi çevre mühendisliği açısından büyük önem taşımaktadır (IEA, 2023).

¹ YL., Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı, ORCID: 0009-0001-7209-1496.

² Doç. Dr., Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi Teknik Bilimler MYO, ORCID: 0000-0002-8144-8266.



Şekil 1. Madencilik türlerine göre kömürün yüzeye olan mesafesi (Hartman ve Mutmansky, 2002)

Şekil 1’de görüldüğü üzere, kömür yataklarının yüzeye olan derinliği ve jeolojik konumu, uygulanacak madencilik yönteminin belirlenmesinde temel unsurlardan biridir. Yüzeye yakın kömür damarlarının çoğunlukla açık ocak yöntemiyle, daha derinlerde bulunan damarların ise yeraltı madenciliği yöntemleriyle işletilmesi, üretim süreçlerinin teknik özelliklerinin yanı sıra çevresel etkilerinin de farklılaşmasına neden olmaktadır. Açık ocak işletmeciliğinde dekapaj, kazı, yükleme ve taşıma faaliyetleri nedeniyle yakıt ve enerji tüketimine bağlı emisyonlar ön plana çıkarken, yeraltı madenciliğinde özellikle kömür damarlarından ve çevre kayalarından kaynaklanan metan (CH_4) emisyonları önemli bir çevresel sorun oluşturmaktadır. Bu farklılıklar, kömür üretiminden kaynaklanan karbon ayak izinin yalnızca üretim miktarına değil, aynı zamanda kullanılan madencilik yöntemine ve üretim koşullarına bağlı olarak değişebileceğini göstermektedir. Bu kapsamda, kömür üretim süreçlerinin karbon emisyonları açısından değerlendirilmesi ve farklı madencilik

yöntemlerinin emisyon profillerinin ortaya konulması, çalışmanın temel odak noktalarından birini oluşturmaktadır.

1.1. Kömür Üretiminin Önemi

Kömür, sanayi devriminden itibaren küresel enerji sistemlerinin yapı taşlarından biri olmuştur. Madencilik açısından değerlendirildiğinde, kömür üretimi, enerji arz güvenliğini destekleyen, istihdam yaratan ve yerel/toplumsal kalkınmaya katkı sağlayan stratejik bir faaliyettir. Yer altı ve açık ocak madenciliği faaliyetleri jeolojik araştırmalar, mühendislik çözümleri ve lojistik yönetim gibi birçok teknolojik bileşeni barındırır. Bu yönüyle kömür madenciliği, yalnızca bir hammadde çıkarımı değil, aynı zamanda madencilik sektörü için önemli bir teknik ve endüstriyel platform sunmaktadır. Öte yandan çevre açısından bakıldığında, kömür üretimi ve kullanımının bir dizi doğrudan ve dolaylı etkisi vardır. Örneğin, madencilik sürecinde arazi tahribatı, orman örtüsünün yok edilmesi, toprağın bozulması ve yeraltı/yerüstü su kaynaklarının kirlenmesi gibi etkiler gözlemlenmektedir. Ayrıca, madencilik ve taşımacılık aşamalarında meydana gelen toz, partikül madde yayılımı ve ağır metal salınımları bölgesel ekosistemleri etkileyebilir. Özellikle açığa çıkarılan atık malzemeler ve depolama sahalarından kaynaklanan asit maden drenajı (AMD) gibi süreçler su kalitesini olumsuz etkileyebilmektedir. Enerji üretim sürecinde ise, kömürün yanması sonucu ortaya çıkan CO₂ ve özellikle madencilik aşamasında yer altından açığa çıkan metan (CH₄) gibi sera gazları iklim değişikliğine önemli katkı yapmaktadır. Ülkemizde ve uluslararası düzeyde yapılan veriler, açık ve kapalı madenlerden salınan metan emisyonlarının toplam sera gazı yükünde dikkate değer bir paya sahip olduğunu göstermektedir. Örneğin, ABD’de aktif ve terk edilmiş kömür madenlerinden çıkan metan emisyonları toplam metan yayılımının yaklaşık %7’sini oluşturmaktadır. Bu durum, kömür üretim zincirinin yalnızca enerji/hammadde temini açısından

değil, iklim etkileri açısından da stratejik bir önem taşıdığını göstermektedir (Shongwe, 2018). Bu çerçevede, kömür üretiminde sürdürülebilirlik perspektifiyle yaklaşmak kritik bir gerekliliktir. Madencilik operasyonlarında çevresel etkilerin azaltılması; örneğin metan gazı yakalama, verimli enerji kullanımı, rehabilitasyon ve restorasyon faaliyetleri, çevre dostu atık yönetimi gibi uygulamalarla mümkündür. Aynı zamanda, madencilik faaliyeti sonrası arazinin yeniden kullanımı ve doğal ekosistemlere entegrasyonu da uzun vadeli çevresel fayda sağlar. Bu bakımdan, kömür üretimi yalnızca enerji arzı açısından değil, çevresel sorumluluk, teknoloji adaptasyonu ve toplumsal karşılıklı fayda boyutlarıyla değerlendirilmeli; yeni dönemde bu alanlarda bütüncül bir yaklaşım benimsenmelidir (World Bank, 2018).

1.2. Kömürün Enerji Sektöründeki Yeri

Kömür, küresel enerji sisteminde tarihsel olarak kritik bir rol oynamış ve hâlâ belirli bölgelerde önemli bir yük taşıyıcısı olmaya devam etmektedir. Bu yaklaşım hem arz güvenliği hem sanayileşme hem de altyapı perspektifinden değerlendirilmelidir.

1.2.1. Arz Güvenliği ve Temel Enerji Kaynağı

Kömür, dünya genelinde hâlâ, elektrik üretiminin yaklaşık üçte birinden fazlasını karşılamaktadır. Örneğin, International Energy Agency (IEA) verilerine göre kömür, “küresel elektrik üretiminin hâlâ biraz üzerinde bir bölümünü” sağlamaktadır. Bunun nedeni, kömürün çok sayıda ülke için yerel olarak ulaşılabilir ve fosil yakıtlar içinde görece yaygın bulunabilir bir kaynak olmasıdır. Bu durum, özellikle enerji talebinin hızla arttığı ya da alternatif kaynakların henüz yeterli olgunluğa ulaşmadığı kalkınma sürecindeki ülkelerde önem taşımaktadır (Balat, 2008).

1.2.2. Sanayi ile Entegrasyon ve Elektrik Üretimi

Enerji sektöründe kömürün bir diğer önemli işlevi ise, sanayileşmenin temel girdilerinden biri olmasıdır. Kömür sadece termik santrallarda elektrik üretiminde değil, aynı zamanda demir-çelik gibi yüksek enerjili sanayi kollarında da ham madde ya da yakıt olarak kullanılmaktadır. Türkiye gibi ülkelerde de kömür, elektrik üretiminde önemli bir paya sahip olup, yerli kömür üretimi enerji bağımsızlığı açısından stratejik görülmektedir. Elektrik üretiminde kömür santralları genellikle “temel yük” (base-load) görevini üstlenmiş olup, yani enerji talebinin yüksek ve değişken olmadığı zamanlarda sürekli çalışabilen sistemlerdir. Bu yönüyle enerji şebekesinin güvenilirliği açısından kritik bir bileşendir (Balat, 2008).

1.2.3. Karbon Yoğunluğu ve Gelecek Zorlukları

Kömürün sahip olduğu bu önemli pozisyona rağmen, enerji sektöründeki kullanımı, çevre ve iklim değişikliği açısından ciddi sorunlar barındırmaktadır. Kömür yakıtlı santraller, diğer fosil yakıtlara göre birim enerji üretimi başına daha yüksek karbon dioksit ve diğer sera gazı emisyonları üretmektedir. Ayrıca, birçok ülke “kömürden çıkarılma” ya da “kömür kullanımının azaltılması” stratejilerini uygulamaya başlamıştır. Bu geçiş süreci, enerji altyapısında oldukça büyük değişiklikler gerektirmekte ve kömür temelli sistemlerin modernizasyonu ya da aşamalı kapatılması gibi adımları içermektedir (IEA, 2023).

1.2.4. Teknolojik Adaptasyon ve Gelecek Perspektifi

Enerji sektöründe kömürün yerini koruması ya da dönüşmesi bağlamında, bazı teknolojik çözümler gündemdedir. Örneğin, daha verimli santral teknolojileri, karbon yakalama ve depolama (CCS) sistemleri, biyoyakıta geçiş ya da kömür-yakıtlı santrallerin yenilenebilir enerji ile hibrit çalışması gibi yaklaşımlar tartışılmaktadır. Bu bağlamda, kömür enerji

sisteminden birdenbire çıkarılmasından ziyade, aşamalı bir geçişin hem enerji arz güvenliğini koruyarak hem de çevresel etkileri azaltarak daha gerçekçi olduğu düşünülmektedir (IPCC, 2005).

2. KARBON AYAK İZİ

Karbon ayak izi, bir birey, kurum, ürün ya da faaliyet sonucunda atmosfere salınan toplam sera gazı miktarının, karbondioksit (CO₂) eşdeğeri olarak hesaplanmasıdır. Bu kavram yalnızca CO₂ emisyonlarını değil; metan (CH₄), diazot monoksit (N₂O) ve florlu gazlar gibi diğer sera gazlarını da kapsar. Bu nedenle karbon ayak izi, küresel ısınma potansiyeli (Global Warming Potential – GWP) değeri kullanılarak hesaplanır ve tüm gazlar CO₂ eşdeğeri cinsine dönüştürülür (IPCC, 2006). Şekil 2’de yer alan karbon ayak izi yaklaşımının genel çerçevesi emisyon kaynaklarının birlikte ele alınmasının gerekliliğini ortaya koymaktadır.



Şekil 2. Karbon Ayak İzi (WRI & WBCSD, 2004)

Madencilik faaliyetleri süresince geçirilen aşamalar söz konusu karbon ayak izi kaynaklarına doğrudan ve dolaylı yoldan etki etmektedir. Tablo 1’de madencilik faaliyetleri boyunca

karbon ayak izinin doğrudan ve dolaylı bileşenleri özetlenmektedir.

Tablo 1. Madencilikte Karbon Ayak İzi Bileşenleri (Global Methane Initiative, 2016)

Süreç Aşaması	Karbon Ayak İzi Kaynağı	Türü
Madencilik	Metan kaçakları (CH ₄), iş makinelerinde dizel tüketimi	Doğrudan
Taşımacılık	Kömürün tren, kamyon veya gemi ile taşınması	Dolaylı
Yakma/Elektrik Üretimi	CO ₂ , SO ₂ , NO _x emisyonları	Doğrudan
Atık ve kül yönetimi	Depolama alanlarından çıkan sera gazları	Dolaylı
Enerji tüketimi (elektrik, su, kimyasal)	Dolaylı karbon ayak izi (Scope 2 & 3)	Dolaylı

Bu zincirin çevresel analizi, Yaşam Döngüsü Analizi (Life Cycle Assessment – LCA) yöntemiyle yapılmakta olup, birçok çalışmada en yüksek sera gazı salımının maden kaynaklı metan emisyonlarından geldiği bildirilmektedir. Kömür üretiminden kaynaklanan karbon ayak izini azaltmak için çevre mühendisliği uygulamaları büyük önem taşır. Enerji verimliliği, metan geri kazanımı, yenilenebilir enerji entegrasyonu, karbon yakalama ve depolama (CCS) sistemlerinin entegrasyonu ve LCA temelli izleme sistemleri başlıca stratejileridir. Dünya Bankası (2021) “Climate-Smart Mining” girişimi kapsamında madencilik faaliyetlerinin iklim dostu teknolojilerle yeniden yapılandırılmasını önermektedir (Burchart-Korol, 2013).

3. KÖMÜR ÜRETİM SÜREÇLERİ

Kömür üretiminde kullanılan iki temel yöntem olan açık ocak madenciliği ve yeraltı madenciliği yalnızca ekonomik ve teknik açıdan değil, aynı zamanda karbon ayak izi açısından da farklı çevresel etkiler oluşturur. Karbon ayak izi, bu süreçlerde açığa çıkan karbondioksit (CO₂), metan (CH₄), dizel tüketimi, taşımacılık emisyonları ve enerji kullanımı gibi tüm sera gazı

kaynaklarını kapsar. Türkiye’de kömür üretimi verileri TÜİK, Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı (ETKB) ve EÜAŞ raporlarından elde edilmektedir. Bu veriler, açık ocak ve kapalı ocak işletmelerinin enerji tüketim farklılıklarını da ortaya koymaktadır (IPCC, 2006).

3.1. Açık Ocak Madenciliği ve Karbon Ayak İzi

Açık ocak yöntemi, yüzeye yakın kömür damarlarının çıkarılmasında kullanılan yüksek mekanizasyonlu bir yöntemdir. Karbon ayak izi açısından bu yöntemin temel özellikleri şunlardır: Açık ocak madenciliğinde başlıca karbon kaynakları Tablo 2’de özetlenmiştir.

Tablo 2. Açık Ocak Madenciliğinde Karbon Kaynakları ve Etkileri (Setiawan vd., 2018)

Karbon Kaynağı	Açıklama ve Etkileri	
Dizel Yakıt Tüketimi	Ekskavatör, dozer, kamyon ve delici makineler tarafından yoğun yakıt tüketimi	CO ₂ emisyonu
Toprak ve Bitki Örtüsünün Kaldırılması	Karbon tutma kapasitesine sahip toprak ve bitki örtüsünün yok edilmesi	Karbon yutaklarının azalması
Patlatma İşlemleri	Patlayıcı kullanımı	N ₂ O (diazot monoksit) ve CO ₂ Salınımı
Taşımacılık	Kömürün uzun mesafelerde taşınması	Yakıt tüketimine bağlı dolaylı emisyonlar
Rehabilitasyon Eksikliği	Arazinin yeniden ağaçlandırılmaması halinde karbon depolama potansiyelinde kayıp	

Açık ocak madenciliği, yakıt tüketimi, taşıma ve patlatma gibi faaliyetler nedeniyle CO₂ ağırlıklı emisyon kaynaklarının öne çıktığı; metan emisyonlarının ise jeolojik ve işletme koşullarına bağlı olarak yeraltı madenciliğine kıyasla genellikle daha düşük olduğu bir üretim biçimidir (U.S. EPA, 2021).

3.2. Yeraltı Madenciliği ve Karbon Ayak İzi

Yeraltı (kapalı ocak) madenciliği, kömür damarlarının yüzeyden derinlerde bulunduğu durumlarda tercih edilir. Bu yöntem karbon ayak izi açısından farklı riskler taşır. Yeraltı madenciliğine ilişkin başlıca karbon kaynakları ve etkileri Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 3. Yeraltı Madenciliğinde Karbon Kaynakları ve Etkileri (Burchart-Korol, 2013)

Karbon Kaynağı	Açıklama ve Etkileri	
Metan Gazı (CH ₄)	Kömür damarları ve çevre kayaçlardaki metan, kazı sırasında atmosfere salınır. CH ₄ , CO ₂ 'den 28 kat daha güçlü sera gazıdır	
Havalandırma	Metanı uzaklaştırmak için kullanılan yüksek enerjili fanlar	Elektrik tüketimi ve dolaylı CO ₂ emisyonları
Dizel Kullanımı	Yer altı taşıma ekipmanları	CO ₂ ve NO _x gazları
Yangın ve Patlama Riski	Kontrolsüz metan veya kömür tozu patlamaları	Ek emisyon ve güvenlik riski
Yeraltı Su Seviyesi Değişimleri	Su boşaltımı için enerji kullanımı	Dolaylı emisyonlar

Yeraltı madenciliğinde metan kaynaklı karbon ayak izi önemli bir etkidir. Bu nedenle yeraltı kömür üretiminin iklim değişikliği üzerindeki etkisinin değerlendirilmesinde metan emisyonlarının ölçülmesi, raporlanması ve azaltılması kritik öneme sahiptir. Yeraltı ve açık ocak işletmelerinin emisyon profilleri Tablo 4'te karşılaştırılmıştır. (IPCC, 2006).

Tablo 4. Açık Ocak ve Yeraltı Ocaklarının Karşılaştırması (Hartman & Mutmansky, 2002)

Özellik/Yöntem	Açık Ocak	Yeraltı
Baskın Emisyon Türü	CO ₂ (yakıt, taşımacılık, patlatma)	CH ₄ (metan gazı kaynaklı)
Enerji Tüketimi	Daha yüksek makine gücü, düşük havalandırma masrafı	Havalandırma, su tahliyesi ve güvenlik sistemleri ile daha fazla elektrik tüketimi
Arazi Kullanımı	Yüksek yüzey tahribatı ve ekosistem kaybı	Yüzey bozulması sınırlı
Karbon Ayak İzi Düzeyi	Yüksek CO ₂ , orta düzey toplam etki	Daha düşük CO ₂ ancak yüksek CH ₄ □ Küresel ısınma etkisi daha büyük olabilir

4. KÖMÜR KAYNAKLI SERA GAZI EMİSYONLARI

Kömür, fosil yakıtlar arasında birim enerji başına en fazla sera gazı emisyonuna neden olan kaynaktır. Hem üretim sürecinde hem de enerji üretimi amacıyla yakıldığında atmosfere ciddi miktarda karbondioksit (CO₂), metan (CH₄), diazot monoksit (N₂O) ve diğer ikincil kirleticiler salınmaktadır. Bu nedenle kömür, küresel iklim değişikliğinin en önemli insan kaynaklı sebeplerinden biri olarak kabul edilmektedir (IEA, 2023).

4.1. Sera Gazı Türleri ve Kaynakları

CO₂ (Karbondioksit) □ Kömürün yakılması, taşımacılık ve enerji tüketimi sonucu oluşur.

CH₄ (Metan) □ Yeraltı madenlerinden doğal metan sızıntısı (grizu), terk edilmiş madenlerde oluşur. CO₂'ye göre 28 kat daha güçlüdür.

N₂O (Diazot Monoksit) □ Patlatma işlemleri ve yüksek sıcaklıkta gerçekleşen yanma süreçleri sonucunda meydana gelir. CO₂'ye göre 265 kat daha güçlüdür.

SO₂, NO_x Partikülleri □ Kömür yanması sonucu oluşur; doğrudan sera gazı değildir ancak iklim ve hava kalitesini etkiler (Setiawan vd., 2018)

4.2. Kömürün Yakılması ve Elektrik Üretimindeki Emisyonlar

Kömürün termik santrallerde yakılması, emisyonların en yoğun olduğu aşamadır.

- 1 kWh elektrik üretimi için ortalama 820 g CO₂-eq emisyon oluşur (IEA).

- Bu değer doğal gazda ~400 g, rüzgâr enerjisinde ~12 g civarındadır.

Kömür yakıldığında ayrıca kükürt dioksit (SO₂), azot oksitler (NO_x) ve partikül madde (PM) de atmosfere karışır; bunlar iklim etkisinin yanı sıra asit yağmurları ve hava kirliliğine neden olur (U.S EPA, 2022)

5. KARBON AYAK İZİ HESAPLAMA YÖNTEMLERİ

Karbon ayak izi, bir ürün, süreç, kurum veya bireyin atmosfere saldıgı sera gazlarının toplamıdır ve genellikle karbondioksit eşdeğeri (CO₂-eq) cinsinden ifade edilir. Kömür madenciliği ve enerji üretimi gibi sektörlerde bu hesaplamalar hem çevresel etkilerin değerlendirilmesi hem de iklim politikalarının geliştirilmesi açısından büyük önem taşır. Karbon ayak izi hesaplamasında kullanılan yöntemler genel olarak standartlaştırılmış uluslararası protokollere dayanır (WRI VE WBCSD, 2004)



Şekil 3. Karbon Ayak İzi Hesaplama Adımlarının Şematik Gösterimi

5.1. Doğrudan Hesaplama (Activity-Based Calculation)

Bu yöntem, bir faaliyette kullanılan yakıt miktarı, enerji tüketimi veya emisyon yapan faaliyetlerin doğrudan ölçümü üzerine kuruludur.

Formül:

$$E = A \times EF$$

Burada; E: toplam emisyon miktarını (ton CO₂e), A: faaliyet verisini (örneğin yakıt tüketimi, üretilen kömür miktarı) ve EF: emisyon faktörünü (kg CO₂e/birim faaliyet) temsil etmektedir (U.S. EPA, 2022)

Örneğin:

- Bir maden sahasında kullanılan dizel miktarı (litre) × Dizel için IPCC emisyon faktörü
- Kömür yakıtlı santralde yanmış kömür miktarı (ton) × Kömür CO₂ emisyon faktörü (U.S. EPA, 2022)

5.2. Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi (LCA – Life Cycle Assessment)

Bu yöntem, bir ürün veya sürecin ham madde çıkarımından, üretim, kullanım ve bertarafına kadar olan tüm aşamalarındaki emisyonlarını değerlendirir. Madencilik sektöründe LCA, enerji kullanımı, yakıt türleri, patlatma faaliyetleri ve taşıma aşamalarının çevresel etkilerini bütüncül şekilde analiz etmeyi sağlar (Burchart-Korol, 2013).

Kömür için LCA sürecinde değerlendirilen aşamalar:

- **Madencilik (açık ocak/yeraltı):** CH₄ sızıntıları, dizel tüketimi
- **Taşımacılık:** Tren, kamyon, gemi emisyonları
- **Yakma:** Elektrik üretimindeki CO₂, NO_x, SO₂ emisyonları
- **Atık (kül) yönetimi:** Depolama alanlarından sızan gazlar

Yalnızca yanma değil, tüm süreçleri kapsadığı için en gerçekçi karbon ayak izi yöntemidir. ISO 14040 ve ISO 14044 standartlarına dayanır. Burchart-Korol (2013), Polonya'daki kömür madenciliğinde LCA yöntemiyle yaptığı analizde, CH₄ emisyonlarının toplam karbon ayak izinin %65'ine kadar çıkabildiğini belirtmiştir. Nieto & Carranza (2020), açık ocak madenciliğinin kapalı ocak yöntemine göre %30 daha yüksek CO₂ emisyonuna neden olduğunu bildirmiştir. Haque vd. (2014), Madencilik sektöründe karbon azaltım stratejilerinin enerji verimliliği ve proses optimizasyonu temelli olması gerektiğini vurgulamıştır.

5.3. Kurumsal Karbon Ayak İzi – GHG Protocol (Scope 1,2,3)

Kurumsal düzeyde karbon ayak izinin hesaplanması için Greenhouse Gas Protocol (WRI & WBCSD) tarafından geliştirilmiş standarttır. Kurumsal karbon ayak izi hesaplamasında kullanılan kapsamlar Tablo 5'te özetlenmiştir.

**Tablo 5. Kurumsal Karbon Ayak İzi Kapsamları (Scope 1, 2, ve 3)
(WRI & WBCSD, 2004)**

Kapsam (Scope)	Tanım	Kömür/Enerji Sektöründe Örnek
Scope 1	Doğrudan emisyonlar	Maden makinelerinde yakıt kullanımı, metan kaçakları
Scope 2	Dolaylı enerji kaynaklı emisyonlar	Madencilikte kullanılan elektrik tüketimi
Scope 3	Tüm diğer dolaylı emisyonlar	Kömür taşımacılığı, tedarik zinciri, kül bertarafı

- Şirketlerin karbon raporlamasında uluslararası kabul görmüş en yaygın yöntemdir
- COP, CDP, ISO 14064 gibi raporlama uygulamaları ve programları GHG Protocol ile birlikte veya onunla uyumlu çerçeveler kullanabilmektedir (WRI & WBCSD, 2004)

5.4. Emisyon Faktörlerine Dayalı Ulusal Hesaplama (IPCC Yöntemi)

IPCC (Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli), ülkelerin ulusal sera gazı raporlamalarında kullanabileceği bir metodoloji sunar. Bu metodoloji 3 seviyeye ayrılır ve IPCC'nin metodolojik yaklaşımındaki Tier seviyeleri Tablo 6'da karşılaştırılmıştır.

Tablo 6. IPCC Tier Seviyeleri (IPCC, 2006)

Tier Seviyesi	Açıklama
Tier 1	Standart IPCC emisyon faktörleri kullanılır
Tier 2	Ülkeye/tesise özgü faktörler kullanılır
Tier 3	Doğrudan ölçüm, modelleme ve yüksek doğruluklu veri

Türkiye, TÜİK aracılığıyla ulusal sera gaz envanterini genellikle Tier 1 ve Tier 2 düzeyinde hazırlamaktadır. Ancak Madencilik sektörüne ilişkin özel emisyon faktörleri çoğu zaman bulunmadığından, IPCC'nin genel katsayıları kullanılmaktadır (IPCC, 2006)

6. KARBON AZALTIM STRATEJİLERİ

Kömür madenciliğinde sera gazı emisyonlarının azaltılması, çevresel etkilerin sınırlandırılması ve daha sürdürülebilir üretim süreçlerinin geliştirilmesi açısından önem taşımaktadır. Bu kapsamda enerji tüketiminin azaltılması, yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanılması, metan emisyonlarının kontrolü ve düşük karbonlu teknolojilerin uygulanması başlıca azaltım yaklaşımlarını oluşturmaktadır. Kömür madenciliğinde karbon azaltım stratejileri dört ana başlıkta incelenebilir:

6.1. Teknolojik Stratejiler

Kömür madenciliğinde sera gazı emisyonlarının azaltılmasında teknolojik gelişmeler önemli bir araçtır. Gelişmiş madencilik ekipmanları, enerji verimli sistemler ve emisyon kontrol teknolojilerinin kullanılması, işletmelerin karbon ayak izinin azaltılmasına katkı sağlamaktadır.

6.1.1. Karbon Yakalama, Kullanım ve Depolama (CCS / CCUS)

Karbon yakalama ve depolama (CCS) teknolojilerinin uygulanması, metan gazı geri kazanımı ve yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelim, emisyonların azaltılmasında etkili olacaktır. Ayrıca çevresel denetimlerin artırılması ve sürdürülebilir madencilik politikalarının yaygınlaştırılması uzun vadede karbon nötr hedeflerine katkı sağlayacaktır.

- Kömür yakan enerji santrallerinden çıkan CO₂'nin yakalanarak yeraltı jeolojik formasyonlarına enjekte edilmesi veya sanayide kullanılmasıdır.
- Karbondioksitin %90'a kadar tutulması mümkündür (IPCC, 2005).
- Uygulama aşamaları:

1. **Yakalama:** Oxy-fuel, post-combustion, pre-combustion yöntemleri
2. **Taşıma:** Boru hatları ile
3. **Depolama:** Tükenmiş petrol-doğalgaz sahaları, tuzlu akiferler (IPCC, 2005)

6.1.2. Metan Gazı Yakalama ve Enerjiye Dönüşüm (CMM/AMM)

Yeraltı madenlerdeki metan (CH_4), CO_2 'den 28 kat daha güçlü sera gazıdır.

- Havalandırma yoluyla atmosfere bırakmak yerine:
 - o Enerji üretimi için yakılır (CMM).
 - o Elektrik üretiminde gaz motorlarında kullanılır.
 - o Terk edilmiş maden metanı (AMM) toplanıp enerjiye çevrilebilir (U.S. EPA & Global Methane Initiative, 2021).

Yüksek Verimli Termik Santral Teknolojileri

Yüksek verimli termik santral teknolojilerine ilişkin karşılaştırma Tablo 7'de verilmiştir.

Tablo 7. Yüksek Verimli Termik Santral Teknolojilerinin Karşılaştırılması (IEA, 2023)

Teknoloji	Enerji Verimi	Emisyon Azaltımı
Konvansiyonel	%33–35	Referans
Süperkritik	%38–40	%10–15 daha az CO_2
Ultra Süperkritik	%42–45	%20–25 daha az CO_2
IGCC (Gazlaştırma)	%45–50	CCS ile entegre edilebilir

6.1.3. Operasyonel ve Madencilik Kaynaklı Azaltım Stratejileri

- Elektrikli makine ve düşük emisyonlu dizel kullanımı
- Patlatmasız kazı teknikleri (continuous miner, shearer)
- Lojistik optimizasyonu ve yakıt tüketiminin azaltılması
- Enerji verimli havalandırma sistemleri
- Yeraltı madenlerinde metan sensörleri ve otomatik tahliye sistemleri (Global Methane Initiative, 2016)

6.1.4. Ekolojik ve Arazi Rehabilitasyon Stratejileri

- Maden sahalarının kapatıldıktan sonra ağaçlandırılması (reclamation): Karbon yutak kapasitesi yeniden oluşturulur.
- Toprak geri yayılımı ve organik madde kazandırma: Toprak karbon tutumunu artırır.
- Doğal ekosistemlerin geri kazanımı: Sulak alan, mera, orman ekosistemleri yeniden kurulur (World Bank, 2018).

6.1.5. Politika ve Ekonomik Mekanizmalar

Karbon azaltımına yönelik politika ve ekonomik mekanizmalar Tablo 8’de özentlenmiştir.

Tablo 8. Karbon Azaltımına Yönelik Politika ve Ekonomik Mekanizmalar (IEA, 2023)

Strateji	Açıklama
Karbon Vergisi	CO ₂ emisyonuna fiyat koyulur (örn: İsveç, Kanada)
Emisyon Ticaret Sistemi (ETS)	AB Emisyon Ticareti, işletmelere emisyon kotası tanımlar
Paris Anlaşması Ulusal Katkı Beyanları (NDC)	Türkiye ve diğer ülkeler emisyon azaltım hedefi belirler
Yenilenebilir Enerji Teşvikleri	Güneş, rüzgar, biyokütle ile kömürün enerji payının azaltılması

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Kömür üretim süreçlerinin karbon ayak izi, sera gazı emisyon kaynakları ve yaşam döngüsü perspektifi çerçevesinde değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgular, kömürün çevresel etkilerinin yalnızca yakma aşamasında ortaya çıkan CO₂ emisyonlarıyla sınırlı olmadığını; madencilik, enerji tüketimi, yakıt kullanımı, metan salımı, taşımacılık ve atık yönetimi gibi üretim zincirinin farklı aşamalarında önemli miktarda sera gazı emisyonu oluştuğunu göstermektedir. Bu nedenle kömür üretiminin çevresel performansının değerlendirilmesinde üretim zincirinin bütün aşamalarını kapsayan sistematik bir yaklaşımın benimsenmesi gerekmektedir. Özellikle yeraltı kömür madenciliğinde açığa çıkan metan (CH₄) emisyonlarının karbon ayak izinin önemli bileşenlerinden biri olduğu, açık ocak madenciliğinde ise emisyonların büyük ölçüde dizel yakıt tüketimi, iş makineleri, taşıma faaliyetleri ve enerji kullanımından kaynaklandığı sonucuna ulaşılmıştır. Bu durum, madencilik yönteminin emisyon profili üzerinde belirleyici olduğunu ve karbon azaltım stratejilerinin işletmelerin teknik ve üretim özellikleri dikkate alınarak oluşturulması gerektiğini ortaya koymaktadır. Ayrıca kömür üretiminden kaynaklanan emisyonların doğrudan ve dolaylı kaynaklar şeklinde ayrıştırılması, azaltım önceliklerinin daha doğru belirlenmesine olanak sağlamaktadır. Madencilik işletmelerinin enerji ihtiyacının mümkün olduğunca yenilenebilir enerji kaynaklarından karşılanması da karbon emisyonlarının azaltılması açısından önemli bir seçenek olarak değerlendirilmelidir. Özellikle güneş ve rüzgâr enerjisinin uygun saha koşullarında madencilik işletmelerinin enerji sistemlerine entegre edilmesi, elektrik kaynaklı dolaylı emisyonların azaltılmasına katkı sağlayabilir. Bununla birlikte, karbon yakalama ve depolama gibi teknolojilerin uygulanabilirliği; teknik kapasite, ekonomik maliyet, jeolojik koşullar ve uzun

dönemli depolama güvenliği açısından ayrıca değerlendirilmelidir.

Çalışma sonuçları doğrultusunda, kömür madenciliğinde karbon ayak izinin azaltılmasına yönelik öncelikli uygulamanın metan emisyonlarının etkin biçimde izlenmesi, kontrol edilmesi ve mümkün olan durumlarda geri kazanılması olduğu değerlendirilmektedir. Bunun yanı sıra, madencilik faaliyetlerinde kullanılan araç ve ekipmanların enerji verimliliğinin artırılması, fosil yakıt tüketiminin azaltılması ve elektrikli veya düşük emisyonlu ekipmanların kullanımının yaygınlaştırılması önemli katkılar sağlayacaktır.

Sonuç olarak, kömür üretiminin enerji arz güvenliği açısından taşıdığı önem devam etmekle birlikte, yüksek karbon yoğunluğu ve özellikle metan emisyonları nedeniyle çevresel açıdan sürdürülebilir bir üretim yaklaşımının geliştirilmesi zorunludur. Kömür madenciliğinde karbon ayak izinin azaltılması, tek bir teknolojik uygulamaya bağlı olmayıp enerji verimliliği, metan yönetimi, yenilenebilir enerji kullanımı, emisyon izleme, yaşam döngüsü değerlendirmesi, arazi rehabilitasyonu ve etkin çevre politikalarının birlikte uygulanmasını gerektirmektedir. Bu doğrultuda, kömür sektöründe kısa ve orta vadede emisyonların azaltılmasına yönelik teknik iyileştirmeler gerçekleştirilirken, uzun vadede düşük karbonlu ve yenilenebilir enerji sistemlerine geçişi destekleyen politikaların geliştirilmesi, enerji arz güvenliği ile çevresel sürdürülebilirlik arasındaki dengenin sağlanması açısından önem taşımaktadır.

KAYNAKLAR

- Balat, H. (2008). Role of coal in sustainable energy development. *Energy Exploration & Exploitation*, 26(3), 197–219.
- Burchart-Korol, D. (2013). Life cycle assessment of underground coal mining in Poland. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 18(4), 758–768.
- Global Methane Initiative. <https://www.globalmethane.org>
- Hartman, H. L., & Mutmansky, J. M. (2002). *Introductory Mining Engineering*. Wiley.
- Singh, Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2006). *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*.
- International Energy Agency (IEA). (2023). *CO₂ Emissions from Fuel Combustion*. *International Journal of Cleaner Production*, 256, 120–133.
- Energy Agency (IEA). (2023). *Coal and the Global Energy System*. International Energy Agency (IEA). <https://www.iea.org>
- R. (2020). Life cycle greenhouse gas assessment of coal-based power generation. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2005). *Special Report on Carbon Capture and Storage (CCS)*.
- Setiawan, I., et al. (2018). Pollution due to coal mining activity and its impact on environment. *Sriwijaya Journal of Environment*, 3(2), 45–52.
- Shongwe, B. (2018). *The Impact of Coal Mining on the Environment and Community*. Master's Thesis, University of Cape Town.
- U.S. Energy Information Administration (EIA). <https://www.eia.gov>

- U.S. Environmental Protection Agency (EPA). (2021). *Greenhouse Gas Emissions from Coal Mining and Mine Fires*.
- U.S. Environmental Protection Agency (EPA). (2022). *Emission Factors & Greenhouse Gas Inventories*.
- U.S. Environmental Protection Agency (EPA). <https://www.epa.gov>
- U.S. EPA & Global Methane Initiative (2021). *Coal Mine Methane Capture and Use*. United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC). (2015). *Paris Climate Agreement – Nationally Determined Contributions (NDCs)*.
- World Bank. (2018). *Mine Closure and Environmental Reclamation Guidelines*. World Coal Association (2020). *Coal Mining and the Environment*.
- World Coal Association. <https://www.worldcoal.org>
- World Resources Institute (WRI) & World Business Council for Sustainable Development (WBCSD). (2004). *The Greenhouse Gas Protocol: Corporate Accounting and Reporting Standard*.

SUSTAINABLE POLLUTION CONTROL AT THE INTERSECTION OF GREEN CHEMISTRY AND ENVIRONMENTAL ENGINEERING

Zeynep YÜCESOY^{1*}

Çiğdem KALKAN AKTAN²

1. INTRODUCTION

The increase in environmental pollution necessitates not only the removal of pollutants from the environment but also the reduction of pollution at its source and the limitation of the environmental burden of the processes used. While traditional pollution control mostly focuses on treating pollutants that have already formed, the sustainable approach also considers the prevention of pollution before it occurs as a fundamental goal (Corominas et al., 2020; Pesqueira et al., 2020). This approach requires that environmental engineering practices be evaluated not only in terms of treatment performance but also in terms of resource and energy use, waste generation, and environmental impacts (Corominas et al., 2013; Lundie et al., 2004; Ribeiro et al., 2024).

Green chemistry offers an approach that aims to design chemical products and processes to be less hazardous and to reduce environmental impacts as much as possible at the source (Anastas and Eghbali, 2009). The combination of green chemistry and green engineering allows for the development of a more

¹ Araştırma Görevlisi Dr., Bitlis Eren Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, Kimya Bölümü, ORCID: 0000-0002-5547-2211.

² Araştırma Görevlisi Dr., Marmara Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, ORCID: 0000-0002-4162-5803.

holistic understanding of sustainability, from the design of chemical processes to the production and use stages (Mulvihill et al., 2011).

A similar transformation is seen in the field of wastewater treatment. Treatment plants are not only systems where pollutants are removed; wastewater treatment plants have begun to be considered as resource centers where water, energy, and nutrients can be recovered (Yadav et al., 2021). This transformation necessitates considering the environmental impacts of resource recovery and evaluating technological options from a life cycle perspective (Rashid et al., 2023; Rufi-Salís et al., 2022).

Therefore, it is not enough for a treatment technology to simply provide high removal rates. Energy and chemical consumption, secondary wastes generated, potential environmental impacts, and the extent to which resources can be recovered must also be evaluated (Pesqueira et al., 2020). Life cycle assessment is one of the important tools in making this comparison (Lundie et al., 2004; Rashid et al., 2023).

This section addresses sustainable pollution control at the intersection of green chemistry and environmental engineering; preventing pollution at the source, developing safer processes, the environmental performance of wastewater treatment technologies, and resource recovery are evaluated together.

2. FUNDAMENTAL PRINCIPLES OF GREEN CHEMISTRY AND ENVIRONMENTAL ENGINEERING

2.1. The Concept and Basic Principles of Green Chemistry

Green chemistry is an approach that aims to reduce the negative impacts of chemical products and processes on the

environment and human health and to achieve this at the design stage rather than intervening after pollution occurs. Therefore, the basis of green chemistry is not only to create less waste but also to prevent waste generation as much as possible, to use fewer hazardous substances, and to utilize resources more efficiently (Clarke et al., 2018). The twelve principles described by Anastas and Eghbali (2009) encompass basic design criteria such as waste prevention, atom economy, less hazardous syntheses, safer chemicals, safer solvents, energy efficiency, use of renewable raw materials, reduction of unnecessary derivatizations, catalysis, biodegradable product design, real-time analysis, and safer chemistry. These principles are not considered as independent applications but as a framework that should be evaluated together throughout the life cycle of chemical products and processes (Anastas and Eghbali, 2009).

2.2. Pollution Prevention Approach in Environmental Engineering

The importance of green chemistry in environmental engineering stems from the fact that pollution control is not limited only to the removal of existing pollutants. Green chemistry and green engineering address the increase in efficiency and the reduction of hazards to human health and the environment together during the development of technologies (Anastas and Zimmerman, 2007; Corominas et al., 2020). The design phase is important in this approach because the raw materials used, energy requirements, chemical properties, and the effects that may occur at the end of the process can be considered from the outset (Mulvihill et al., 2011). Thus, instead of simply transferring the environmental loads that arise in the treatment or control phase to another environment, the aim is to reduce them at the source.

This perspective forms an important basis for sustainable pollution control. For a technology to be more environmentally acceptable, not only the pollutant removal capacity but also material and energy efficiency, toxicity, and waste generation must be considered. It is stated that green chemistry principles and life cycle assessment are complementary tools in such assessments (Clarke et al., 2018; Hessel et al., 2022; Mulvihill et al., 2011). While green chemistry primarily guides the design of new products and processes, life cycle assessment helps compare the environmental impacts of existing options. Therefore, the use of the green chemistry approach in environmental engineering applications makes it possible to evaluate pollution control within a broader framework of resource efficiency and environmental performance (Tabone et al., 2010).

3. POLLUTION PREVENTION AT THE SOURCE AND GREEN PROCESSES

3.1. Safer Chemicals and Alternative Substances

Preventing pollution at the source requires re-evaluating the substances and processes used in the production process before subsequently treating the pollutants that have already formed (Pesqueira et al., 2020). The fundamental approach of green chemistry is the design of chemicals and processes that pose a lower risk to human health and the environment. In this approach, simply replacing an existing chemical with a less hazardous substance is not considered sufficient; the effects of the alternative on the entire process must also be evaluated (Jessop, 2011; Winterton, 2016).

Solvents used in chemical processes are a particularly important area of evaluation. It is stated that solvent losses can cause significant amounts of organic pollution, and the removal of solvents can lead to high energy consumption (Hessel et al.,

2022; Jessop, 2011; Sheldon, 2005). Therefore, solvent selection should be made by considering criteria such as toxicity, environmental impact, energy requirements, recoverability, and economic feasibility together. Renewable solvents, ionic liquids, deep eutectic solvents, and supercritical fluids are among the alternatives investigated in this context (Clarke et al., 2018). However, simply defining a solvent as "green" is not enough. Its life cycle, from production to use and disposal, needs to be evaluated (Capello et al., 2007).

3.2. Reducing Waste Generation and Chemical Consumption

Preventing waste before it is generated holds a fundamental place in the principles of green chemistry. This approach sets a more advanced goal than simply reducing waste generated during the treatment or disposal phase. Designing processes to use fewer raw materials, energy, and auxiliary chemicals has the potential to reduce both resource consumption and environmental burden (Kundu et al., 2022; McCarty et al., 2011; Ribeiro et al., 2024; Shehata et al., 2023).

A similar approach is gaining importance in wastewater management. While the primary goal in traditional wastewater treatment is the removal of pollutants from water, the current sustainability approach focuses on recovering energy and nutrients in addition to water (Mannina et al., 2022; Rani et al., 2022; Yadav et al., 2021). Rufi-Salís et al. (2022) demonstrate that considering energy and nutrient recovery together in wastewater treatment plants can contribute to reducing environmental impacts. Thus, treatment plants can transform from systems that only control waste into systems that re-evaluate resources.

3.3. Green Solvents and Sustainable Production Processes

For a sustainable process, in addition to the selection of alternative chemicals, the entire process must be evaluated. Winterton (2016) states that for an alternative to be considered more environmentally friendly, not only the properties of the chemical but also stages such as scaling up, economic feasibility, energy use, and subsequent separation processes should be considered. Jin et al. (2017) also emphasize that in the evaluation of green solvents, criteria such as energy efficiency, recyclability, waste generation, toxicity, and biodegradability should be considered together. Therefore, the green process approach should aim to reduce the environmental burden throughout the entire production and usage chain, rather than simply replacing a single chemical.

4. SUSTAINABLE WASTEWATER TREATMENT AND POLLUTION CONTROL TECHNOLOGIES

Sustainability in wastewater treatment is not limited to achieving high pollutant removal efficiency. The energy and chemicals used, the sludge and other by-products generated, the operating conditions of the process, and the reusability of resources should also be considered in technology selection (Corominas et al., 2020; Rashid et al., 2023). Since the composition of industrial wastewaters varies significantly depending on the sector, a single treatment technology is not expected to be suitable for all wastewaters. Therefore, it is important to create appropriate treatment combinations by evaluating the characteristics of physical, biological, and chemical processes together (Kumar et al., 2024; Tarpani and Azapagic, 2018).

3.2. Biological Treatment and Natural Treatment Approaches

Biological treatment is widely used, especially in the removal of organic matter and pollutants such as nitrogen. Activated sludge, anaerobic processes, membrane bioreactors, and biofilm systems are considered within this scope. However, the energy requirement of traditional activated sludge processes, especially due to aeration, is an important issue in terms of sustainability (Longo et al., 2016; McCarty et al., 2011).) Zhang and Liu (2022) state that in current biological nitrogen removal systems, a significant portion of the energy is spent on the oxidation of ammonium, and in this process, the nitrogen present in the wastewater is mostly converted into nitrogen gas instead of being recovered.

Nature-based solutions, on the other hand, are among the alternatives that can provide wastewater treatment with lower resource requirements (Gallego-Schmid and Tarpani, 2019; Kundu et al., 2022; Massoud et al., 2009). In particular, artificial wetlands are applied in the treatment of municipal wastewater using different designs and plant species. A recent systematic review examining full-scale systems has shown that different types of artificial wetlands can be used in the removal of organic matter and nutrients (Silva et al., 2026). The performance of these systems varies depending on design and operating characteristics such as hydraulic loading, surface area, substrate used, and plant species.

3.3. Adsorption and Low Environmental Impact Adsorbents

Adsorption is an important physical treatment method used especially in the removal of certain organic and inorganic pollutants (Pesqueira et al., 2020; Yadav et al., 2021). Activated carbon is widely used due to its high specific surface area and

applicability to a large number of pollutants. However, the high cost of activated carbon and the need for regeneration are issues that need to be considered in terms of the sustainability of the method (Rawat et al., 2023). Low-cost adsorbents obtained from agricultural and industrial wastes are therefore being investigated as alternatives.

This approach can transform the adsorption process from being merely a pollutant removal process into one that allows for the utilization of wastes as secondary resources. However, the preparation of the adsorbent, its service life, regeneration, and the management of the waste generated after use should be evaluated together.

3.4. Membrane Technologies and Resource Efficiency

Membrane technologies are used in water and wastewater treatment with different processes such as microfiltration, ultrafiltration, nanofiltration, and reverse osmosis. One of the important advantages of these systems is the selective separation of pollutants of different sizes and characteristics (Kato and Kansha, 2024; Shehata et al., 2023). However, membrane fouling, energy requirements, operating costs, and the lifespan of membranes are significant limitations in terms of sustainability (Mannina et al., 2022; Yadav et al., 2021).

Current studies in membrane technologies are directed not only towards increasing treatment performance but also towards the reuse of membranes, reducing waste, and recovering resources from water. Re-evaluating end-of-life membranes in other membrane processes and membrane-based zero-liquid discharge applications are examples of this approach (Shehata et al., 2023; Yusuf et al., 2020). Therefore, when evaluating the sustainability of membrane systems, not only the quality of treated water but also the entire process from membrane production to end-of-use should be considered.

4.4. Advanced Oxidation and Photocatalytic Processes

Advanced oxidation processes are among the chemical treatment approaches used in the conversion of biologically difficult-to-decompose organic pollutants (Rufí-Salís et al., 2022). Fenton processes, ozonation, photocatalysis, and various combinations thereof are considered within this scope. While Fenton processes are effective in pollutant removal, energy and chemical consumption, as well as the resulting iron-containing sludge, can pose significant problems in terms of sustainability (Kato and Kansha, 2024; Pesqueira et al., 2020). Ribeiro et al. (2024), who examined life cycle assessments of Fenton processes, showed that energy and chemical use are among the main sources of environmental impact. Therefore, the sustainability of advanced oxidation processes should not be evaluated solely on the basis of pollutant removal efficiency; energy source, chemical consumption, and products that may be formed at the end of the process should also be considered.

4.5. Resource Recovery from Waste and By-Products

One of the important changes in sustainable wastewater management is that wastewater is considered not only as waste that needs to be removed but also as a resource containing water, energy, and nutrients (Zhang and Liu, 2022). The recovery of energy, nitrogen, phosphorus, water, and various valuable products from wastewater presents a significant opportunity for transitioning from a linear treatment approach to a circular system (Kundu et al., 2022; Yadav et al., 2021).

In this context, anaerobic processes can be used to obtain energy from organic matter, membrane processes to separate water and nutrients, and chemical and biological processes to recover nitrogen and phosphorus. Zhang and Liu (2022) emphasize that future wastewater treatment plants should be designed not only as facilities that remove pollutants but also as

systems that achieve water, energy, and resource recovery together. Similarly, Rufí-Salís et al. (2022) have shown that considering energy and nutrient recovery together can reduce the environmental impact of treatment plants.

Therefore, the fundamental goal in sustainable pollution control can be considered as a shift from a “pollutant removal” approach to a “safely transforming the pollutant and, where possible, recovering the source” approach. However, in this transformation, the energy, chemical, cost, and environmental impacts of each technology must be examined together, and the technology selection should be made considering the entire life cycle of the system (Corominas et al., 2020; Gallego-Schmid and Tarpani, 2019; Pesqueira et al., 2020).

5. EVALUATION OF POLLUTION CONTROL FROM A SUSTAINABILITY PERSPECTIVE

Evaluating a pollution control technology solely based on the extent to which it removes pollutants is insufficient from a sustainability perspective. The energy and chemicals used during treatment, the sludge or other by-products formed, the materials required for the plant's installation, and the emissions generated after treatment must also be considered (Lundie et al., 2004; Pesqueira et al., 2020). Therefore, life cycle assessment (LCA) is considered an important tool in determining the environmental performance of wastewater treatment systems today, along with technical and economic evaluations. LCA allows for the evaluation of not only the effects of a treatment system during the operation phase but also the direct and indirect environmental impacts that occur throughout the system's life cycle (Corominas et al., 2020, 2013; Gallego-Schmid and Tarpani, 2019).

The main goal in a sustainable pollution control system is to strike a suitable balance between high treatment efficiency and

low environmental load (Rashid et al., 2023). A technology removing pollutants at a higher rate does not, by itself, mean that it is more sustainable. For example, the environmental burden created during the treatment phase due to high chemical consumption or high energy requirements can reduce the removal advantage obtained. Therefore, in technology selection, treatment performance, energy and chemical consumption, resource use, waste generation, and environmental impacts throughout the life cycle should be evaluated together (Emmerson et al., 1995; Ribeiro et al., 2024; Yadav et al., 2021).

3.2. Energy, Chemical Consumption and Secondary Wastes

Energy consumption is one of the key factors determining the environmental performance of wastewater treatment plants (Rani et al., 2022). Energy consumption can constitute a significant environmental burden, especially in biological treatment systems requiring intensive aeration. Therefore, in sustainable pollution control, it is important not only to use energy-efficient equipment but also to design the entire process to require less energy. Zhang and Liu (2022) state that conventional activated sludge processes require a significant amount of energy, and aeration, in particular, has a significant share in in-plant energy consumption. Another study showed that instead of simply replacing equipment, automated dissolved oxygen control and process operation design optimization could achieve net savings of 20-36% in aeration tank energy (Panepinto et al., 2016).

Energy consumption is also an important evaluation criterion in advanced oxidation processes. A review of studies on Fenton processes by Ribeiro et al. (2024) revealed that energy was the primary environmental hotspot in 77% of studies evaluating conventional homogeneous Fenton processes. In

hybrid and heterogeneous Fenton processes, while energy remains a significant factor, the share of chemical consumption in environmental impacts becomes more pronounced. This indicates that the same treatment technology can produce different environmental results under different operating conditions.

Chemical consumption should also be considered separately in sustainability assessments (Corominas et al., 2020). Life cycle assessments of Fenton processes have reported that hydrogen peroxide and chemicals used for pH adjustment make significant environmental contributions. Ribeiro et al. (2024), by compiling the Life Cycle Assessment (LCA) literature, confirms that chemical consumption is one of the most critical environmental load centers in Fenton processes and that in 58% of studies examining hybrid and heterogeneous Fenton processes, the greatest environmental load originates from chemical consumption. In particular, H_2O_2 constitutes a significant greenhouse gas emission and global warming potential due to its high energy requirement in industrial synthesis (~ 1200 kWh/ton H_2O_2) and dependence on fossil fuels (Pesqueira et al., 2020). In contrast, the contribution of low-dose, non-toxic $FeSO_4$ to total greenhouse gas emissions is generally less than 1%; the majority of the chemical load comes from H_2O_2 and pH regulators (Ribeiro et al., 2024). Therefore, a process that provides higher removal efficiency needs to be re-evaluated from a sustainability perspective if it achieves this through high chemical consumption.

In addition to chemical consumption, secondary waste generation is also important. For example, in the classic Fenton process, the continuous loss of iron and sludge formation are considered significant disadvantages (Kato and Kansha, 2024; Zhang et al., 2019). Since the resulting sludge also needs to be managed, the removal of the pollutant from the water can become

a different waste management problem. Therefore, in a sustainable pollution control approach, "pollutant removal from water" and "pollutant management without creating an environmental burden" should not be considered the same concepts. In this respect, resource recovery constitutes an important alternative. Designing wastewater treatment plants not only as systems that remove pollutants but also as systems that recover water, energy, and nutrients has the potential to reduce the overall environmental impact of the treatment process (Mannina et al., 2022; Rufí-Salís et al., 2022; Zhang and Liu, 2022). Yadav et al. (2021) emphasize that the technical, economic, and environmental dimensions of resource recovery technologies should be evaluated together. A life cycle assessment by Rufí-Salís et al. (2022) also showed that the combined recovery of energy and nutrients (Total Resource Recovery-TRR) can reduce net environmental impacts of the plant in the categories of climate change, ecotoxicity, and cumulative energy demand compared to the baseline scenario, particularly by preventing the use of fertilizers and the release of nutrients into the aquatic environment. Therefore, in a sustainable treatment system, reducing energy consumption, limiting chemical use, preventing secondary waste generation, and recovering resources where possible should be considered together. Instead of focusing solely on the quality of the treated water, the entire life cycle of the treatment system should be evaluated when selecting technology.

3.3. Ecotoxicity, Life Cycle Assessment, and Sustainability Indicators

Life cycle assessment is one of the comprehensive methods that can be used to compare the environmental impacts of different pollution control technologies (Bare, 2011). In the field of wastewater treatment, the aim of LCA is to consider not only the direct emissions of a process but also different stages of

its life cycle, such as energy production, chemical production, production of facilities and equipment, operation, and disposal. Numerous studies have emphasized the importance of clearly defining the purpose and scope, appropriately determining the functional unit and system boundaries, and evaluating the quality of the inventory data used when applying LCA to wastewater treatment systems (Corominas et al., 2020; Pesqueira et al., 2020).

In particular, the determination of system boundaries can directly affect the interpretation of the results (Rashid et al., 2023; Tillman et al., 1994). Considering only the electricity consumption within the plant when evaluating a treatment technology may lead to neglecting the environmental impacts of the production of chemicals used or the plant's infrastructure. Corominas et al. (2020) emphasize that in wastewater treatment LCA studies, energy and chemical production, infrastructure and equipment, and substance flows from the treatment plant to the air, water, and soil should be evaluated within appropriate system boundaries.

Furthermore, relying solely on a single environmental indicator is inaccurate when interpreting LCA results. Different impact categories, such as climate change, eutrophication, acidification, resource depletion, and toxicity, can yield different results for the same process (Bare, 2011; Gallego-Schmid and Tarpani, 2019; Tarpani and Azapagic, 2018). Therefore, evaluating a process solely based on its carbon footprint or solely on its energy consumption may not be sufficient to explain its overall environmental performance. However, LCA should not be considered a method that determines technology selection alone. Corominas et al. (2020) state that LCA is a tool that provides decision-makers with information on environmental impacts, but it does not replace technical, economic, and social evaluations. Especially in the selection of wastewater treatment technologies,

investment cost, operating cost, treatment performance, space requirements, operating conditions, and environmental impacts should be evaluated together (Kalbar et al., 2013, 2012; Larrey-Lassalle et al., 2017). This approach is also important at the intersection of green chemistry and environmental engineering. The use of less hazardous chemicals, reduced energy requirements, prevention of waste generation, and resource recycling should be addressed not only at the laboratory level but throughout the entire process. Thus, pollution control can move beyond a final stage of removing existing pollutants and become a more holistic system that considers resource use and environmental impacts together. Consequently, treatment efficiency alone is not a sufficient measure in sustainability assessment. Energy consumption, chemical use, secondary waste generation, resource recovery, ecotoxicity, and other life cycle impacts must be evaluated together. Especially in the evaluation of new technologies, it is necessary to demonstrate not only high technical performance but also the resource consumption and environmental burden at which this performance is achieved. This approach reinforces the understanding in environmental engineering that "receiving the necessary treatment with a lower overall environmental burden" is better than "more treatment."

6. LIMITATIONS IN APPLICATION AND FUTURE PERSPECTIVES

The application of green chemistry and environmental engineering approaches to pollution control offers significant opportunities for removing pollutants with lower environmental burdens and converting waste into resources as much as possible (Anastas and Eghbali, 2009; Kundu et al., 2022; Mulvihill et al., 2011). However, transitioning sustainable treatment technologies from laboratory or pilot scale to full scale is not always easy. A

technology demonstrating high treatment efficiency under laboratory conditions does not mean that the same performance can be maintained under different wastewater characteristics, variable operating conditions, and economic constraints (Corominas et al., 2020; Ribeiro et al., 2024; Yadav et al., 2021). Therefore, in sustainable pollution control, economic feasibility, energy and chemical requirements, data quality, and environmental impacts must be evaluated together with technical performance.

3.2. Key Limitations in the Application of Sustainable Technologies

One of the major problems facing sustainable treatment technologies is that a significant portion of new technologies have not yet been implemented on a large scale. Evaluations of technologies for resource recovery show that while some applications are technically promising, they can yield different results in terms of economics and environmental aspects (Yadav et al., 2021). In particular, the quantity and quality of the target resource in the wastewater are important for resource recovery to be achieved (Kleerebezem et al., 2015; Rufí-Salís et al., 2022). If the substance to be recovered is present in low concentrations, the energy and operating costs spent to separate it can exceed the economic value of the obtained product (Mannina et al., 2022; Yadav et al., 2021; Zhang and Liu, 2022)

Membrane technologies are a good example of this situation (Mannina et al., 2022). Membrane processes offer significant opportunities for reuse and resource recovery by enabling the selective separation of different components in water and wastewater. However, high investment and operating costs are one of the main problems hindering the widespread adoption of these Technologies (Kato and Kansha, 2024; Yusuf et al., 2020). In addition, membrane fouling can increase operating and

maintenance costs and raise the energy requirements of the process (Shehata et al., 2023). Therefore, when evaluating the sustainability of membrane technologies, not only separation performance but also the membrane's service life, energy requirements, cleaning needs, and the management of the resulting concentrated stream should be considered.

A similar situation exists in advanced oxidation processes. These processes can be particularly effective in removing pollutants that are difficult to biodegrade (Kato and Kansha, 2024; Tarpani and Azapagic, 2018). However, high energy and chemical requirements can increase the overall environmental impact of the process. An evaluation by Ribeiro et al. (2024) shows that energy and chemical use are significant determinants of life cycle impacts in Fenton processes. In addition, the possibility that the conversion products formed during treatment may exhibit higher toxicity than the initial pollutant reveals that evaluations based solely on removal rate may be insufficient. Therefore, future studies should focus not only on the removal of the target pollutant but also on the properties and environmental impacts of the products formed at the end of the process.

Natural treatment systems and other low-energy approaches also have significant advantages but are not equally applicable in all conditions (Gallego-Schmid and Tarpani, 2019; Silva et al., 2026). Factors such as land use, climatic conditions, and direct and indirect greenhouse gas emissions should be considered when evaluating the performance of these systems. In systems requiring large areas, it is important to include changes in land use in the life cycle assessment (Corominas et al., 2013; Hernández-Padilla et al., 2017). Therefore, “low energy consumption” alone is not sufficient to demonstrate that a technology is sustainable. Another important limitation is the adaptation of existing wastewater treatment plants to new sustainable Technologies (Kundu et al., 2022; Rashid et al.,

2023). A significant portion of traditional plants are primarily designed for pollutant removal. Transitioning to resource recovery may require the redesign of existing processes, the addition of new equipment, and in some cases, a change in the plant's operational approach. Yadav et al. (2021) emphasize that the implementation of resource recovery technologies requires coordination among public institutions, scientists, the private sector, operators, and end-users, as well as the redesign of existing plants.

6.2. Future Perspective

One of the key trends in sustainable pollution control in the future is to transform treatment plants from systems that merely remove pollutants into systems that recover resources (Corominas et al., 2013; Gallego-Schmid and Tarpani, 2019; Silva et al., 2026). This transformation involves the recovery of water, energy, nitrogen, phosphorus, and other valuable components. However, for this transformation to be truly environmentally beneficial, the additional energy and material requirements created by new technologies must also be considered (Zhang and Liu, 2022). Rufí-Salís et al. (2022) demonstrate that the environmental benefits of technological improvements towards resource recovery depend on the efficient and sustainable management of the resources used. Therefore, in future research, the development of integrated treatment systems rather than a single technology will gain importance. An appropriate combination of biological treatment, membrane processes, advanced oxidation, natural treatment, and resource recovery can enable the utilization of the advantages of different processes. However, since increasing the number of processes in such systems can lead to increased energy and chemical consumption, whether integration truly provides environmental advantages should be evaluated using a life cycle approach (Pesqueira et al., 2020; Ribeiro et al., 2024).

In the future, life cycle assessments need to be made more reliable and tailored to local conditions (Hernández-Padilla et al., 2017). A significant portion of current studies suffer from a lack of data, different system boundaries, and the use of different functional units, making comparison of results difficult (Pesqueira et al., 2020). Corominas et al. (2013) and Corominas et al. (2020) emphasize the importance of methodological consistency and transparent reporting of results in LCA studies. Gallego-Schmid and Tarpani, (2019) state that the lack of country- and region-specific databases, especially in developing countries, is a significant source of uncertainty. Determining data such as electricity generation mix, actual energy consumption, chemical use, and direct greenhouse gas emissions according to local conditions will increase the accuracy of future assessments. Furthermore, the use of uncertainty analysis is needed more frequently. The environmental performance of a treatment technology; The energy source, operating conditions, wastewater characteristics, and inventory data used depend on many variables (Rashid et al., 2023). Studies have reported that switching electricity consumption from a fossil fuel-based system to renewable sources reduces the environmental footprint by 81–86% (Ioannou-Ttofa et al., 2016). Therefore, instead of relying on a single scenario, evaluating different operating and energy scenarios can provide more reliable results. Gallego-Schmid and Tarpani, (2019) state that uncertainty and sensitivity analyses should be increased, especially for variables that have a significant impact on results, such as greenhouse gas emissions and electricity mix. Another important issue for sustainable pollution control in the future is the safety and acceptability of resource recovery products. The fact that a product obtained from wastewater can be technically recovered does not mean that it can be used economically directly (Kleerebezem et al., 2015; Mannina et al., 2022). The quality and safety characteristics of the product need to be determined, standardized, and its

application area needs to be established. In addition, consumer acceptance of recovered products is also important. Yadav et al. (2021) emphasize that for resource recovery technologies to be commercially successful, in addition to technical and economic conditions, the involvement of policymakers, operators, researchers, and society in the process is necessary. In this context, the sustainable pollution control systems of the future are not only technologies with higher removal efficiencies; Green chemistry systems should be evaluated as those that consume less energy and chemicals, generate less secondary waste, recover resources, and have a lower environmental impact throughout their life cycle. Integrating the green chemistry approach with environmental engineering processes is also a crucial part of this transformation. In particular, preventing waste generation at the very beginning of the process, selecting safer materials, reducing energy requirements, and reusing resources can transform pollution control from a final treatment process into a more holistic sustainability approach. Therefore, it is important that research in the coming period focuses not only on developing new treatment technologies but also on improving existing technologies to use fewer resources, integrating different processes under appropriate conditions, determining long-term performance on real wastewater, and evaluating environmental impacts throughout the life cycle. Such an approach will contribute to the development of systems that can provide both treatment performance and environmental, economic, and resource efficiency, instead of technically successful but high environmental cost processes.

7. CONCLUSION

When the approaches discussed in this section are considered together, it is seen that sustainable pollution control

cannot be achieved solely by improving treatment processes. To make pollution control more sustainable, it is necessary to focus on the point where the pollutant is generated, to re-evaluate the raw materials and chemicals used, and to design processes that generate as little waste as possible. Therefore, it is thought that the most appropriate approach in terms of sustainability should involve a shift from systems that try to remove pollution after it has occurred to systems that prevent the formation of pollution as much as possible. A similar approach should be adopted when evaluating wastewater treatment systems. Viewing wastewater only as a waste that needs to be removed leads to a significant loss of opportunity in terms of evaluating the water, energy, and nutrients it contains. Therefore, in the future, it would be more appropriate to design treatment plants not only as facilities that remove pollutants but also as systems where resources are recovered. Such a transformation can reduce the environmental burden of treatment plants while also contributing to the more efficient use of existing resources. The technologies evaluated in this study also show that there is no single solution for sustainable pollution control. Each technology has different energy requirements, chemical consumption, secondary waste generation, operating conditions, costs, and resource recovery potential. Therefore, a process's high removal efficiency alone is not sufficient to conclude that it is sustainable. It is believed that the true environmental value of a technology can only be determined by evaluating all resource and waste streams entering and exiting the process, along with its treatment performance. From this perspective, energy efficiency, low chemical use, low secondary waste generation, and resource recovery should be considered together in future treatment systems. In particular, water reuse, energy extraction from organic matter, and the recovery of components such as nitrogen and phosphorus can transform the treatment process from a purely removal stage into a more circular system. However, it should also be considered that

not every application aimed at recovery should automatically be considered sustainable. The energy and chemicals consumed for recovery must be evaluated together with the environmental gains achieved. One of the most important contributions of combining green chemistry and environmental engineering emerges at this point. While green chemistry focuses on designing safer materials and processes that consume fewer resources, environmental engineering makes it possible to apply and control this approach in real systems. Therefore, sustainable pollution control can be achieved more effectively not only by improving existing treatment technologies but also by considering the treatment, recovery, and reuse phases as a whole, starting from the design of the process. Consequently, the main goal of sustainable pollution control should not only be to remove pollutants from the environment but also to reduce pollution at the source, use fewer resources, recycle generated waste as much as possible, and reduce the environmental burden throughout the entire system. For this approach to be implemented, technologies should be considered not in isolation but in their interrelationships and their total impact on the system. The success of future treatment systems should be evaluated not only by their removal rates but also by the amount of energy and chemicals they use, the secondary waste they generate, their recovery capacity, and the total environmental burden they create throughout their life cycle. In this context, it can be concluded that the future of sustainable pollution control lies not in more complex and technologically advanced systems, but in systems that operate with fewer resources, reduce unnecessary inputs, retain resources within the cycle, and consider different environmental impacts together. The real transformation will begin not with more effective cleanup of existing pollution, but with a rethinking of the processes that cause pollution in the first place.

REFERENCES

- Anastas, P., Eghbali, N., 2009. Green chemistry: principles and practice. Chem. Soc. Rev. 39, 301–312.
- Anastas, P.T., Zimmerman, J.B., 2007. Design through the 12 principles of green engineering. IEEE Eng. Manag. Rev. 35, 16.
- Bare, J., 2011. TRACI 2.0: the tool for the reduction and assessment of chemical and other environmental impacts 2.0. Clean Technol. Environ. Policy 13, 687–696.
- Capello, C., Fischer, U., Hungerbühler, K., 2007. What is a green solvent? A comprehensive framework for the environmental assessment of solvents. Green Chem. 9, 927–934.
- Clarke, C.J., Tu, W.-C., Levers, O., Brohl, A., Hallett, J.P., 2018. Green and sustainable solvents in chemical processes. Chem. Rev. 118, 747–800.
- Corominas, L., Byrne, D.M., Guest, J.S., Hospido, A., Roux, P., Shaw, A., Short, M.D., 2020. The application of life cycle assessment (LCA) to wastewater treatment: A best practice guide and critical review. Water Res. 184, 116058.
- Corominas, L., Foley, J., Guest, J.S., Hospido, A., Larsen, H.F., Morera, S., Shaw, A., 2013. Life cycle assessment applied to wastewater treatment: state of the art. Water Res. 47, 5480–5492.
- Emmerson, R.H.C., Morse, G.K., Lester, J.N., Edge, D.R., 1995. The life-cycle analysis of small-scale sewage-treatment processes. Water Environ. J. 9, 317–325.
- Gallego-Schmid, A., Tarpani, R.R.Z., 2019. Life cycle assessment of wastewater treatment in developing

- countries: a review. *Water Res.* 153, 63–79.
- Hernández-Padilla, F., Margni, M., Noyola, A., Guereca-Hernandez, L., Bulle, C., 2017. Assessing wastewater treatment in Latin America and the Caribbean: enhancing life cycle assessment interpretation by regionalization and impact assessment sensibility. *J. Clean. Prod.* 142, 2140–2153.
- Hessel, V., Tran, N.N., Asrami, M.R., Tran, Q.D., Van Duc Long, N., Escribà-Gelonch, M., Tejada, J.O., Linke, S., Sundmacher, K., 2022. Sustainability of green solvents—review and perspective. *Green Chem.* 24, 410–437.
- Ioannou-Ttofa, L., Foteinis, S., Chatzisyneon, E., Fatta-Kassinos, D., 2016. The environmental footprint of a membrane bioreactor treatment process through Life Cycle Analysis. *Sci. Total Environ.* 568, 306–318.
- Jessop, P.G., 2011. Searching for green solvents. *Green Chem.* 13, 1391–1398.
- Jin, S., Byrne, F., McElroy, C.R., Sherwood, J., Clark, J.H., Hunt, A.J., 2017. Challenges in the development of bio-based solvents: a case study on methyl (2, 2-dimethyl-1, 3-dioxolan-4-yl) methyl carbonate as an alternative aprotic solvent. *Faraday Discuss.* 202, 157–173.
- Kalbar, P.P., Karmakar, S., Asolekar, S.R., 2013. Assessment of wastewater treatment technologies: life cycle approach. *Water Environ. J.* 27, 261–268.
- Kalbar, P.P., Karmakar, S., Asolekar, S.R., 2012. Technology assessment for wastewater treatment using multiple-attribute decision-making. *Technol. Soc.* 34, 295–302.
- Kato, S., Kansha, Y., 2024. Comprehensive review of industrial wastewater treatment techniques. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 31, 51064–51097.

- Kleerebezem, R., Joosse, B., Rozendal, R., Van Loosdrecht, M.C.M., 2015. Anaerobic digestion without biogas? Rev. Environ. Sci. Bio/Technology 14, 787–801.
- Kumar, M., Krushna, S., Kohli, K., Prajapati, R., Kirkham, B., Padhye, L.P., Pandey, A., Vithanage, M., 2024. Science of the Total Environment A review on value-addition to plastic waste towards achieving a circular economy ☆. Sci. Total Environ. 921, 171106. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.171106>
- Kundu, D., Dutta, D., Samanta, P., Dey, S., Sherpa, K.C., Kumar, S., Dubey, B.K., 2022. Valorization of wastewater: A paradigm shift towards circular bioeconomy and sustainability. Sci. Total Environ. 848, 157709.
- Larrey-Lassalle, P., Catel, L., Roux, P., Rosenbaum, R.K., Lopez-Ferber, M., Junqua, G., Loiseau, E., 2017. An innovative implementation of LCA within the EIA procedure: Lessons learned from two Wastewater Treatment Plant case studies. Environ. Impact Assess. Rev. 63, 95–106.
- Longo, S., d’Antoni, B.M., Bongards, M., Chaparro, A., Cronrath, A., Fatone, F., Lema, J.M., Mauricio-Iglesias, M., Soares, A., Hospido, A., 2016. Monitoring and diagnosis of energy consumption in wastewater treatment plants. A state of the art and proposals for improvement. Appl. Energy 179, 1251–1268.
- Lundie, S., Peters, G.M., Beavis, P.C., 2004. Life cycle assessment for sustainable metropolitan water systems planning.
- Mannina, G., Gulhan, H., Ni, B.-J., 2022. Water reuse from wastewater treatment: The transition towards circular economy in the water sector. Bioresour. Technol. 363, 127951.

- Massoud, M.A., Tarhini, A., Nasr, J.A., 2009. Decentralized approaches to wastewater treatment and management: applicability in developing countries. *J. Environ. Manage.* 90, 652–659.
- McCarty, P.L., Bae, J., Kim, J., 2011. Domestic wastewater treatment as a net energy producer—can this be achieved?
- Mulvihill, M.J., Beach, E.S., Zimmerman, J.B., Anastas, P.T., 2011. Green chemistry and green engineering: a framework for sustainable technology development. *Annu. Rev. Environ. Resour.* 36, 271–293.
- Panepinto, D., Fiore, S., Zappone, M., Genon, G., Meucci, L., 2016. Evaluation of the energy efficiency of a large wastewater treatment plant in Italy. *Appl. Energy* 161, 404–411.
- Pesqueira, J.F.J.R., Pereira, M.F.R., Silva, A.M.T., 2020. Environmental impact assessment of advanced urban wastewater treatment technologies for the removal of priority substances and contaminants of emerging concern: a review. *J. Clean. Prod.* 261, 121078.
- Rani, A., Snyder, S.W., Kim, H., Lei, Z., Pan, S.-Y., 2022. Pathways to a net-zero-carbon water sector through energy-extracting wastewater technologies. *NPJ Clean Water* 5, 49.
- Rashid, S.S., Harun, S.N., Hanafiah, M.M., Razman, K.K., Liu, Y.-Q., Tholibon, D.A., 2023. Life cycle assessment and its application in wastewater treatment: a brief overview. *Processes* 11, 208.
- Rawat, A., Srivastava, A., Bhatnagar, A., Gupta, A.K., 2023. Technological advancements for the treatment of steel industry wastewater: Effluent management and sustainable treatment strategies. *J. Clean. Prod.* 383,

135382.

- Ribeiro, J.P., Sarinho, L., Nunes, M.I., 2024. Application of life cycle assessment to Fenton processes in wastewater treatment—A review. *J. Water Process Eng.* 57, 104692.
- Rufi-Salís, M., Petit-Boix, A., Leipold, S., Villalba, G., Rieradevall, J., Moliné, E., Gabarrell, X., Carrera, J., Suárez-Ojeda, M.E., 2022. Increasing resource circularity in wastewater treatment: Environmental implications of technological upgrades. *Sci. Total Environ.* 838, 156422.
- Shehata, N., Egirani, D., Olabi, A.G., Inayat, A., Abdelkareem, M.A., Chae, K.-J., Sayed, E.T., 2023. Membrane-based water and wastewater treatment technologies: Issues, current trends, challenges, and role in achieving sustainable development goals, and circular economy. *Chemosphere* 320, 137993.
- Sheldon, R.A., 2005. Green solvents for sustainable organic synthesis: state of the art. *Green Chem.* 7, 267–278.
- Silva, J.R.M., Fernandes, R.B.A., Cirelli, G., Pereira, L.F., Borges, A.C., Marzo, A., 2026. Nature-based Solutions for municipal wastewater treatment: A systematic review on full-scale systems from the last 30 years (1995-2025). *Nature-Based Solut.* 100311.
- Tabone, M.D., Cregg, J.J., Beckman, E.J., Landis, A.E., 2010. Sustainability metrics: life cycle assessment and green design in polymers. *Environ. Sci. Technol.* 44, 8264–8269.
- Tarpani, R.R.Z., Azapagic, A., 2018. Life cycle environmental impacts of advanced wastewater treatment techniques for removal of pharmaceuticals and personal care products (PPCPs). *J. Environ. Manage.* 215, 258–272.
- Tillman, A.-M., Ekvall, T., Baumann, H., Rydberg, T., 1994.

- Choice of system boundaries in life cycle assessment. J. Clean. Prod. 2, 21–29.
- Winterton, N., 2016. Green chemistry: deliverance or distraction? Clean Technol. Environ. Policy 18, 991–1001.
- Yadav, G., Mishra, A., Ghosh, P., Sindhu, R., Vinayak, V., Pugazhendhi, A., 2021. Technical, economic and environmental feasibility of resource recovery technologies from wastewater. Sci. Total Environ. 796, 149022.
- Yusuf, A., Sodiq, A., Giwa, A., Eke, J., Pikuda, O., De Luca, G., Di Salvo, J.L., Chakraborty, S., 2020. A review of emerging trends in membrane science and technology for sustainable water treatment. J. Clean. Prod. 266, 121867.
- Zhang, M., Dong, H., Zhao, L., Wang, D., Meng, D., 2019. A review on Fenton process for organic wastewater treatment based on optimization perspective. Sci. Total Environ. 670, 110–121.
- Zhang, X., Liu, Y., 2022. Resource recovery from municipal wastewater: A critical paradigm shift in the post era of activated sludge. Bioresour. Technol. 363, 127932.

ÇEVRE BİLİMLERİ VE MÜHENDİSLİĞİ ALANINDA
GÜNCEL KONULAR VE
AKADEMİK DEĞERLENDİRMELER

yaz
yayınları

YAZ Yayınları
M.İhtisas OSB Mah. 4A Cad. No:3/3
İscehisar / AFYONKARAHİSAR
Tel : (0 531) 880 92 99
yazyayinlari@gmail.com • www.yazyayinlari.com