

EUROASIA

Matematik, Mühendislik, Doğa ve Tıp Bilimleri Dergisi
Journal of Mathematics, Engineering, Natural & Medical Science

Araştırma Makalesi

e-ISSN: 2667-6702

<https://doi.org/10.5281/zenodo.20515814>

Petrokimyasal ve Üretilmiş Suların Elektrokimyasal Arıtımında Matris Bağımlılığı, Mekanizma Kaymaları ve Hibrit Sistem Yaklaşımları

Turan HAJILI^{1*}, Recep BONCUKCUOĞLU¹, Alper Erdem YILMAZ²

¹ İstanbul Üniversitesi – Cerrahpaşa, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Çevre Mühendisliği Bölümü, İstanbul

² Atatürk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Erzurum

Sorumlu yazar (Corresponding author) E-mail: turan.hajili@ogr.iuc.edu.tr

Makale Tarihi

Geliş: 05.02.2026

Kabul: 16.03.2026

Anahtar Kelimeler

Elektrokimyasal Arıtma
Üretilmiş Su
Matris Etkisi
Elektrooksidasyon
Hibrit Sistemler

Özet: Petrokimyasal ve üretilmiş suların elektrokimyasal yöntemlerle arıtılabilirliğini yalnızca giderim verimleri üzerinden değil, matris etkileri, reaksiyon mekanizmaları ve sistem tasarımı bağlamında ele alan eleştirel bir literatür değerlendirmesi sunan bu çalışmada; makale arama motorlarında gerçekleştirilen tarama sonucunda belirlenen kriterlere uygun 26 çalışma detaylı olarak analiz edilmiştir. Saptanan literatür bulguları, elektrooksidasyon (EO) ve elektro-Fenton (EF) proseslerinin yüksek KOİ giderim potansiyeline sahip olduğunu, ancak bu performansın büyük ölçüde atıksu matrisine bağlı olarak değiştiğini göstermektedir. Özellikle yüksek tuzluluk ve klorür içeren sistemlerde oksidasyon mekanizması hidroksil radikali ($\bullet\text{OH}$) temelli reaksiyonlardan aktif klor türlerinin baskın olduğu rejimlere kaymakta; bu durum toksik yan ürün oluşumu ve eksik mineralizasyon açısından önemli riskler doğurmaktadır. Elektrokoagülasyon (EC) ise yağ, askıda katı madde ve kolloidal kirleticilerin gideriminde etkili olmakla birlikte, çözünmüş ve refrakter organiklerin parçalanmasında sınırlı kalmaktadır. İncelenen çalışmalar, tekil elektrokimyasal proseslerin kompleks petrokimyasal ve üretilmiş su matrisleri için doğrudan genellenebilir bir çözüm sunmadığını göstermektedir. Buna karşılık biyolojik, adsorptif ve fiziksel süreçlerle desteklenen hibrit sistemler, giderim verimi ve süreç kararlılığı açısından daha güçlü sonuçlar üretmektedir. Bununla birlikte bu sistemlerin başarısı da elektrot malzemesi, reaktör tasarımı ve işletme parametrelerine bağlıdır. Dolayısıyla elektrokimyasal arıtmanın geleceği, matris özelliklerini dikkate alan, enerji tüketimini ve yan ürün riskini kontrol eden, farklı prosesleri tamamlayıcı biçimde birleştiren entegre sistem mimarilerinin geliştirilmesine bağlıdır.

Matrix Dependence, Mechanism Shifts, and Hybrid System Approaches in the Electrochemical Treatment of Petrochemical and Produced Waters

Article Info

Received: 05.02.2026

Accepted: 16.03.2026

Keywords

Electrochemical
Treatment
Produced Water
Matrix Effect
Electrooxidation
Hybrid Systems

Abstract: This study presents a critical literature review that examines the treatability of petrochemical and manufactured waters using electrochemical methods, not only in terms of removal efficiencies but also in the context of matrix effects, reaction mechanisms, and system design. Based on a search of articles in search engines, 26 studies meeting specified criteria were analyzed in detail. The literature findings indicate that electrooxidation (EO) and electro-Fenton (EF) processes have high COD removal potential, but this performance largely depends on the wastewater matrix. In systems with high salinity and chloride content, the oxidation mechanism shifts from hydroxyl radical ($\bullet\text{OH}$)-based reactions to regimes dominated by active chloride species; this poses significant risks in terms of toxic byproduct formation and incomplete mineralization. Electrocoagulation (EC), while effective in removing oil, suspended solids, and colloidal pollutants, is limited in the decomposition of dissolved and refractory organics. The studies reviewed demonstrate that individual electrochemical processes do not offer a directly generalizable solution for complex petrochemical and manufactured water matrices. In contrast, hybrid systems supported by biological, adsorptive, and physical processes produce stronger results in terms of removal efficiency and process stability. However, the success of these systems also depends on the electrode material, reactor design, and operating parameters. Consequently, the future of electrochemical treatment depends on the development of integrated system architectures that consider matrix properties, control energy consumption and byproduct risk, and combine different processes in a complementary manner.

1. Giriş

Petrokimyasal endüstriye ait atıksular, yüksek organik yük, tuzluluk ve çok bileşenli kirletici yapısı nedeniyle arıtımı en zor sistemler arasında yer almaktadır. Son yıllarda EO, EF ve EC gibi elektrokimyasal yöntemler, yüksek giderim verimleri sunmaları nedeniyle bu alanda öne çıkmıştır. Bununla birlikte mevcut literatür incelendiğinde, bu proseslerin çoğunlukla idealize edilmiş koşullarda ve birbirinden bağımsız biçimde değerlendirildiği görülmektedir. Örneğin elektrooksidasyon süreçleri yüksek hız ve giderim verimleri ile dikkat çekerken, performansın pH ve matriks bileşimine güçlü biçimde bağlı olduğu gösterilmiştir (Mirshafiee vd., 2024). Benzer şekilde bor katkılı elmas anotlar ile yüksek mineralizasyon sağlanabilmesine rağmen, bu tür sistemlerin yalnızca düşük yükte ve ön arıtılmış atıksular için uygun olduğu belirtilmektedir (Li vd., 2020). Elektro-Fenton süreçleri daha yüksek oksidasyon kapasitesi sunmasına rağmen, performansın pH, H₂O₂ ve Fe²⁺ konsantrasyonu gibi parametrelere son derece duyarlı olduğu ve enerji ile kimyasal tüketimin birlikte değerlendirilmesi gerektiği vurgulanmaktadır (Jiad ve Abbar, 2023; Alturki vd., 2024). Elektrokoagülasyon ise özellikle yağ, askıda katı ve kolloidal kirleticilerin gideriminde etkili olmakla birlikte, çözünmüş ve refrakter organiklerin parçalanmasında sınırlı kalmaktadır (Naser vd., 2023; Mohamed vd., 2026). Bu bulgular birlikte değerlendirildiğinde, elektrokimyasal proseslerin tek başına evrensel bir çözüm sunmadığı, aksine performansın büyük ölçüde atıksu matriksine ve işletme koşullarına bağlı olduğu açıkça ortaya çıkmaktadır. Nitekim aynı prosesin farklı matrikslerde tamamen farklı mekanizmalar üzerinden çalıştığı ve yüksek giderim verimlerinin her zaman gerçek mineralizasyonu temsil etmediği de gösterilmiştir (Yang vd., 2023; Tawabini ve Basaleh, 2025). Bu durum, literatürde rapor edilen performans değerlerinin gerçek sistemlere doğrudan genellenabilirliğini tartışmalı hale getirmektedir. Bu sınırlılıklar doğrultusunda son yıllarda hibrit sistemlerin geliştirilmesine yönelik önemli bir eğilim ortaya çıkmıştır. Elektrokimyasal proseslerin biyolojik, adsorptif veya diğer oksidatif süreçlerle entegre edilmesi, performansı artırmakla birlikte sistemlerin çok aşamalı ve karmaşık bir yapıya evrilmesine neden olmuştur (Dehboudeh vd., 2020; Feizi vd., 2023; Treviño-Reséndez vd., 2025). Ancak bu çalışmalar dahi çoğu zaman prosesler arası etkileşimleri, mekanizma kaymalarını ve enerji-verim dengesini bütüncül biçimde ele almamaktadır. Gerçekleştirilen araştırmanın bu doğrultudaki temel amacı da petrokimyasal endüstriye ait atıksuların elektrokimyasal yöntemlerle arıtılabilirliğinin, sadece giderim verimleri üzerinden değil de ek olarak da matris etkileri, reaksiyon mekanizmaları, enerji gereksinimleri ve proses entegrasyonları bağlamında değerlendirilmesidir. Bu doğrultuda da özellikle 2020 sonrası mevcut ve güncel literatürdeki elektrooksidasyon, elektro-Fenton ve elektrokoagülasyon süreçlerinin genellikle bağımsız olarak incelendiği anlaşılmaktadır. Buna karşın gerçek atıksu matrisi koşullarının süreç performansına etkisi ile prosesler arası etkileşimlerin sınırlı düzeyde ele alındığı görülebilmektedir. Buna istinaden de literatürde ortaya konulan performans değerlerinin gerçek sistemlere genellenebilirliğinin tartışmalı olduğu söylenebilecektir. Tam olarak bu noktada, bu çalışmada;

- Elektrokimyasal proseslerin karşılaştırmalı performans değerlendirmeleri yapılmıştır.
- Petrokimyasal atıksuların karakteristik özelliklerinin reaksiyon mekanizmaları ve giderim verimleri üzerindeki belirleyici rolü incelenmiştir.
- Farklı proseslerin birlikte kullanıldığı sistemlerin, tekil proseslere kıyasla sağladığı katkılar entegrasyon perspektifiyle değerlendirmeye alınmıştır.
- Elektrot pasivasyonu, yan ürün oluşumu ve enerji tüketimi gibi operasyonel sınırlılıklar tartışılmıştır.

1.1. Petrokimyasal ve Üretilmiş Suların Özellikleri

Petrol ve doğal gaz üretim süreçlerinde ortaya çıkan en büyük hacimli atıksu akımı “üretilmiş su (produced water)” olarak tanımlanmaktadır. Üretim faaliyetleri sırasında rezervuardan çıkarılan hidrokarbonlarla birlikte gelen bu su, hem doğal oluşum suyu hem de üretim sürecinde

sisteme enjekte edilen suyun geri kazanımı sonucunda oluşmaktadır. Günümüzde küresel ölçekte üretilmiş su miktarının, petrol üretimine kıyasla kat kat daha yüksek olduğu ve su/yağ oranının ortalama 3:1 seviyelerinde gerçekleştiği bilinmektedir (Matheswaran ve Raju, 2010). Bu durum ise yalnızca kirletici türü açısından değil, aynı zamanda hacimsel yük açısından da ciddi bir arıtım problemi ortaya çıkarmaktadır. Petrokimyasal ve rafineri atıksuları ile üretilmiş suların en belirgin özelliği, oldukça karmaşık ve çok bileşenli bir matrise sahip olmalarıdır. Bu atıksular genellikle yüksek konsantrasyonda çözünmüş tuzlar (TDS), yağ ve gres (oil ve grease), fenolik bileşikler, aromatik hidrokarbonlar, yüzey aktif maddeler ve çeşitli ağır metaller içermektedir. Özellikle tuzluluk seviyesi, birçok durumda 1000 mg/L'den başlayarak 400.000 mg/L gibi son derece yüksek değerlere ulaşabilmekte olup, bu durum söz konusu sistemleri klasik kentsel atıksulardan tamamen farklı bir kategoriye taşımaktadır. Bu yüksek iyonik yük, yalnızca arıtım verimini değil, aynı zamanda reaksiyon mekanizmalarını da doğrudan etkileyen temel bir parametre olarak öne çıkmaktadır. Üretilmiş suların bir diğer kritik özelliği ise kirleticilerin yalnızca askıda veya emülsifiye formda değil, aynı zamanda çözünmüş halde de bulunmasıdır. Küçük boyutlu yağ damlacıkları, stabil emülsiyon yapıları ve çözünmüş organik bileşikler, fiziksel ve kimyasal arıtma yöntemleri ile etkin biçimde uzaklaştırılmamakta; bu durum arıtım süreçlerinde ciddi performans sınırlılıklarına yol açmaktadır. Ayrıca fenoller ve aromatik bileşikler gibi refrakter organikler, biyolojik olarak zor parçalanabilir yapıları nedeniyle klasik biyolojik sistemlerde düşük giderim verimleri ile sonuçlanmaktadır. Bu tür atıksuların çevresel etkileri de oldukça kritiktir. Yüksek organik yük, toksik bileşenler ve tuzluluk, alıcı ortamlarda ekosistem dengesinin bozulmasına, sucul yaşamın zarar görmesine ve uzun vadede insan sağlığı açısından risk oluşturabilecek birikimlerin ortaya çıkmasına neden olabilmektedir. Özellikle deniz ortamlarında meydana gelen petrol türevli kirlilikler, hem yüzeysel yayılım hem de çözünmüş kirleticiler yoluyla geniş alanlara etki edebilmektedir. Tüm bu özellikler birlikte değerlendirildiğinde de petrokimyasal ve üretilmiş suların arıtımının yalnızca kirletici konsantrasyonlarının düşürülmesine yönelik bir işlem olmadığı; aksine yüksek tuzluluk, çoklu kirletici etkileşimleri ve kompleks kimyasal yapı nedeniyle ileri düzey mühendislik yaklaşımları gerektiren bir problem olduğu açıkça ortaya çıkmaktadır. Bu doğrultuda söz konusu atıksuların arıtımında kullanılacak teknolojilerin yalnızca giderim verimlerine göre değil, aynı zamanda bu kompleks matriksin süreç davranışı üzerindeki etkilerini dikkate alacak şekilde değerlendirilmesi gerekmektedir.

1.2. Konvansiyonel Arıtma Yöntemlerinin Sınırlılıkları

Petrokimyasal ve üretilmiş suların arıtımında uzun yıllardır fiziksel, kimyasal ve biyolojik temelli konvansiyonel yöntemler kullanılmaktadır. Ancak bu yöntemlerin, söz konusu atıksuların yüksek tuzluluk, kompleks organik içerik ve çok bileşenli yapısı karşısında önemli sınırlılıklar taşıdığı literatürde açık biçimde ortaya konmuştur (McGhee ve Steel, 1991; Dallbauman ve Sirivedhin, 2005; Renou vd., 2008). Özellikle yağ ve su fazlarının ayrılmasına dayalı fiziksel prosesler, büyük partiküllerin uzaklaştırılmasında etkili olmakla birlikte, emülsifiye yağlar ve çözünmüş organik kirleticiler üzerinde yetersiz kalmaktadır (Huggins vd., 2009). Kimyasal arıtma yöntemleri ise koagülasyon, flokülasyon ve oksidasyon gibi mekanizmalar üzerinden belirli bir giderim performansı sağlayabilmektedir. Bununla birlikte bu süreçler genellikle kirleticilerin tamamen parçalanmasından ziyade faz transferine dayanmakta, yani kirleticilerin sıvı fazdan katı faza aktarılması ile sonuçlanmaktadır. Bu durum, yüksek miktarda çamur oluşumuna neden olmakta ve ikincil kirlilik problemlerini beraberinde getirmektedir (Ahmadi vd., 2017). Ayrıca kimyasal katkı maddelerinin kullanımı hem maliyetleri artırmakta hem de prosesin çevresel sürdürülebilirliğini sınırlamaktadır. Biyolojik arıtma yöntemleri de özellikle yüksek tuzluluk içeren sistemlerde ciddi performans kayıpları göstermektedir. Yüksek iyonik kuvvet ve toksik bileşenler, mikroorganizmalar üzerinde inhibitör etki oluşturarak biyolojik aktivitenin baskılanmasına neden olmaktadır (Tellez ve Nirmalakhandan, 1992). Bu tür ortamlarda yalnızca halofilik mikroorganizmaların

kullanılabilmesi mümkün olmakla birlikte, bu mikroorganizmaların düşük büyüme hızları ve uzun bekleme süreleri gerektirmesi, prosesin pratik uygulanabilirliğini sınırlamaktadır. Dolayısıyla biyolojik sistemler, özellikle yüksek tuzluluk ve refrakter organik içeren petrokimyasal atıksular için çoğu zaman yeterli bir çözüm sunamamaktadır. Bunun yanı sıra konvansiyonel yöntemlerin önemli bir diğer sınırlılığı, çözünmüş ve biyolojik olarak zor parçalanabilir (refrakter) organik bileşiklerin etkin şekilde giderilememesidir. Fenoller, aromatik hidrokarbonlar ve çeşitli yüzey aktif maddeler gibi bileşikler, hem fiziksel hem de biyolojik sistemlerde dirençli davranmakta ve arıtım verimini önemli ölçüde sınırlamaktadır (Becker, 2000). Bu durum, özellikle ileri arıtım gereksiniminin ortaya çıktığı durumlarda konvansiyonel yöntemlerin tek başına yeterli olmadığını göstermektedir. Tüm bu sınırlılıklar birlikte değerlendirildiğinde de petrokimyasal ve üretilmiş suların arıtımında kullanılan geleneksel yaklaşımların, yüksek maliyet, düşük verim, ikincil kirlilik üretimi ve sınırlı mineralizasyon gibi temel problemler taşıdığı görülmektedir. Bu bağlamda literatürde giderek artan bir şekilde, daha esnek, kontrol edilebilir ve kompleks kirletici yapılarıyla başa çıkabilecek alternatif teknolojilere yönelim olduğu dikkat çekmektedir. Bu alternatifler arasında elektrokimyasal arıtma süreçleri, özellikle operasyonel esneklikleri ve geniş uygulama potansiyelleri nedeniyle öne çıkan yöntemler olarak değerlendirilmektedir.

1.3. Elektrokimyasal Arıtma Proseslerinin Temelleri

Petrokimyasal ve üretilmiş suların arıtımında son yıllarda öne çıkan yaklaşımlardan biri, elektrokimyasal yöntemlerdir. Bu yöntemler, kirleticilerin doğrudan elektrot yüzeyinde oksidasyonu veya indirgenmesi ile ya da elektrokimyasal olarak üretilen reaktif türler aracılığıyla parçalanmasına dayanmaktadır. Elektrokimyasal sistemlerin temel avantajı, reaksiyonların dışarıdan kimyasal dozlamaya ihtiyaç duyulmadan, yalnızca elektrik enerjisi kullanılarak kontrol edilebilir biçimde yürütülebilmesidir (El-Desoky vd., 2010; Matheswaran ve Raju, 2010). Bu özellik, söz konusu prosesleri hem operasyonel esneklik hem de otomasyon açısından avantajlı hale getirmektedir.

Elektrokimyasal arıtma süreçleri EO, EF ve EC olmak üzere genel olarak üç ana başlık altında incelenmektedir. Bu proseslerin her biri farklı mekanizmalar üzerinden çalışmakta ve farklı kirletici gruplarına karşı etkinlik göstermektedir.

- Elektrooksidasyon prosesi, kirleticilerin anot yüzeyinde doğrudan oksidasyonu veya elektrot yüzeyinde oluşan güçlü oksidan türler aracılığıyla dolaylı olarak parçalanmasına dayanmaktadır. Bu süreçte özellikle hidroksil radikali ($\bullet\text{OH}$) gibi yüksek reaktif türler, organik kirleticilerin non-selektif oksidasyonunu sağlayarak mineralizasyona kadar ilerleyebilen reaksiyonlar oluşturabilmektedir. Bununla birlikte, elektrolit içeriğine bağlı olarak özellikle klorür iyonu açısından zengin sistemlerde aktif klor türlerinin (Cl_2 , HOCl , ClO^-) oluşumu da söz konusu olmakta ve bu durum oksidasyon mekanizmasının doğasını değiştirebilmektedir. Dolayısıyla elektrooksidasyon, tek bir reaksiyon yolu üzerinden değil, sistem koşullarına bağlı olarak değişen çoklu mekanizmalar üzerinden ilerleyen bir proses olarak değerlendirilmektedir.

- Elektro-Fenton prosesi ise elektrokimyasal ve kimyasal reaksiyonların birlikte gerçekleştiği bir ileri oksidasyon yöntemidir. Bu sistemde katotta oksijen indirgenmesi ile hidrojen peroksit (H_2O_2) üretilmekte ve çözeltide bulunan Fe^{2+} iyonları ile reaksiyona girerek hidroksil radikali ($\bullet\text{OH}$) oluşturmaktadır. Bu radikaller, özellikle aromatik ve refrakter organik bileşiklerin parçalanmasında yüksek etkinlik göstermektedir. Elektro-Fenton prosesinin en önemli avantajlarından biri, klasik Fenton reaksiyonuna kıyasla reaktif türlerin sistem içinde sürekli olarak üretilebilmesidir. Ancak proses performansı büyük ölçüde pH, demir konsantrasyonu ve akım yoğunluğu gibi parametrelere bağlıdır ve bu durum sistemin hassas bir denge içinde çalışmasına neden olmaktadır.

- Elektrokoagülasyon prosesi ise diğer elektrokimyasal yöntemlerden farklı olarak oksidatif parçalanma yerine koagülasyon ve faz transferi mekanizmalarına dayanmaktadır. Bu süreçte anoddan çözünen Al^{3+} veya Fe^{3+} iyonları, çözeltide hidroksit türleri oluşturarak

kirleticilerin destabilizasyonunu ve flokleşmesini sağlamaktadır. Aynı zamanda katotta oluşan hidrojen gazı kabarcıkları, elektroflotasyon etkisi ile oluşan flokların yüzeye taşınmasına katkıda bulunmaktadır. Bu mekanizma özellikle askıda katı maddeler, kolloidal kirleticiler ve yağ fazı için oldukça etkilidir. Ancak çözülmüş organik kirleticilerin parçalanması açısından elektrokoagülasyonun sınırlı kaldığı bilinmektedir.

Bu üç temel proses birlikte ele alındığında da elektrokimyasal arıtma yöntemlerinin tek bir mekanizmaya indirgenemeyecek kadar karmaşık olduğu görülmektedir. Kirleticilerin uzaklaştırılması ya doğrudan oksidasyon, ya reaktif türler aracılığıyla kimyasal dönüşüm ya da koagülasyon ve faz transferi yoluyla gerçekleşmektedir. Bu durum, elektrokimyasal proseslerin yalnızca bir arıtım yöntemi değil, farklı mekanizmaların bir arada çalıştığı çok bileşenli sistemler olarak değerlendirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır. Ayrıca bu süreçlerin performansı yalnızca kullanılan proses türüne bağlı değildir. Elektrot malzemesi, elektrolit bileşimi, akım yoğunluğu ve pH gibi işletme parametreleri, sistemde hangi reaktif türlerin baskın olacağını ve dolayısıyla hangi reaksiyon mekanizmasının gerçekleşeceğini doğrudan belirlemektedir.

1.4. Matris Etkisi

Elektrokimyasal arıtma süreçlerinin performansına bakıldığında yalnızca kullanılan proses türü veya elektrot materyali ile açıklanabilecek bir olgu olmadığı görülmektedir. Literatürdeki çalışmalar, bu sistemlerin davranışının büyük ölçüde işletme parametreleri ve atıksu matrisinin özellikleri tarafından belirlendiğini göstermektedir (Khorram vd., 2023). Bu durum, elektrokimyasal proseslerin sabit mekanizmalarla çalışan sistemler olmadığını, aksine çevresel koşullara duyarlı ve dinamik yapılar sergilediğini ortaya koymaktadır. Elektrokimyasal sistemlerde en belirleyici parametrelerden biri pH'tır. pH değeri, hem reaktif türlerin oluşumunu hem de elektrot yüzey reaksiyonlarını doğrudan etkilemektedir. Özellikle elektro-Fenton prosesinde asidik koşullar ($\text{pH} \approx 3$), $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ döngüsünün etkinliği açısından kritik öneme sahiptir. Benzer şekilde elektrooksidasyon süreçlerinde pH, hidroksil radikali oluşumu ile aktif klor türleri arasındaki dengeyi belirleyen temel faktörlerden biridir. Nötr ve alkali koşullarda aktif klor türlerinin stabilitesi artarken, asidik ortamda daha güçlü oksidatif türler oluşabilmektedir. Akım yoğunluğu ise elektrokimyasal reaksiyonların hızını belirleyen en önemli parametrelerden biridir. Artan akım yoğunluğu, reaktif tür üretimini artırarak giderim verimini yükseltebilmektedir. Ancak bu artış belirli bir eşik değerine kadar geçerlidir. Daha yüksek akım yoğunluklarında parasitik reaksiyonlar (oksijen evolüsyonu, hidrojen oluşumu gibi) baskın hale gelmekte ve akım verimi düşmektedir (Khorram vd., 2023). Bu durum, elektrokimyasal sistemlerde performans ile enerji tüketimi arasında doğrudan bir denge bulunduğunu göstermektedir. Destek elektrolit türü ve konsantrasyonu da sistem davranışını belirleyen kritik unsurlar arasındadır. Özellikle klorür iyonlarının varlığı, elektrooksidasyon prosesinde oksidasyon mekanizmasını köklü biçimde değiştirmektedir. Klorür içeren ortamlarda hidroksil radikali temelli oksidasyon yerine aktif klor türlerinin baskın olduğu dolaylı oksidasyon mekanizmaları gelişmektedir. Bu durum, bazı kirleticiler için daha hızlı giderim sağlasa da, klorlu yan ürünlerin oluşumu nedeniyle proses güvenliğini tartışmalı hale getirmektedir. Reaksiyon süresi ve karıştırma hızı gibi hidrodinamik parametreler de elektrokimyasal süreçlerde önemli rol oynamaktadır. Özellikle elektrooksidasyon sistemlerinde reaksiyonların çoğu kütle transferi ile sınırlı olduğundan, kirleticilerin elektrot yüzeyine taşınması sistem performansını doğrudan etkilemektedir. Yetersiz karıştırma koşullarında, elektrot yüzeyinde oluşan reaktif türlerin çözelti fazına geçişi sınırlanmakta ve bu durum reaksiyon kinetiğini yavaşlatmaktadır. Elektrot aralığı ise sistem direnci ve enerji tüketimi açısından belirleyici bir parametredir. Daha küçük elektrot mesafeleri ohmik kayıpları azaltarak enerji verimliliğini artırırken, aşırı dar aralıklar akış ve kütle transferini olumsuz etkileyebilmektedir. Bu nedenle elektrot aralığı, hem elektriksel hem de hidrodinamik koşullar dikkate alınarak optimize edilmelidir. Tüm bu parametrelerin ötesinde, elektrokimyasal arıtma

süreçlerinin performansını belirleyen en kritik unsur atıksu matrisidir. Petrokimyasal atıksular, yüksek tuzluluk, kompleks organik bileşikler, yüzey aktif maddeler, ağır metaller ve çeşitli inorganik iyonları içeren çok bileşenli sistemlerdir. Bu bileşenler yalnızca reaksiyon hızını değil, aynı zamanda reaksiyon mekanizmasını da değiştirebilmektedir. Örneğin yüksek tuzluluk, sistem iletkenliğini artırarak enerji avantajı sağlarken, aynı zamanda oksidasyon mekanizmasını hidroksil radikali temelli reaksiyonlardan aktif klor kimyasına kaydırabilmektedir. Bu bağlamda elektrokimyasal arıtma süreçleri, klasik anlamda deterministik sistemler olarak değil, matris koşullarına bağlı olarak davranış değiştiren kompleks reaksiyon ağları olarak değerlendirilmelidir. Aynı elektrokimyasal sistem, farklı atıksu kompozisyonlarında tamamen farklı performans ve mekanizmalar sergileyebilmektedir. Bu nedenle elektrokimyasal arıtma çalışmalarında, işletme parametrelerinin optimizasyonu ile birlikte matris etkisinin sistematik olarak değerlendirilmesi gerekmektedir. Aksi takdirde elde edilen yüksek giderim verimleri, gerçek sistemlere genellenebilir sonuçlar sunmaktan uzak kalacaktır.

1.5. Elektrokimyasal Proseslerde Sınırlılıklar

Elektrokimyasal arıtma süreçleri temel özellikleri nedeniyle yüksek giderim verimleri ve geniş kirletici spektrumuna uygulanabilirliği nedeniyle ileri arıtım teknolojileri arasında önemli bir yer edinmiştir. Bununla birlikte literatür incelendiğinde, bu proseslerin performansının çoğu zaman ideal laboratuvar koşullarında elde edildiği ve gerçek sistemlere doğrudan aktarımında ciddi sınırlılıklar bulunduğu görülmektedir (Khorram vd., 2023; Brillas ve Martínez-Huitle, 2015). Bu durum, elektrokimyasal arıtmanın yalnızca bir reaksiyon sistemi değil, aynı zamanda ölçeklenebilirlik ve mühendislik optimizasyonu problemi olduğunu ortaya koymaktadır.

Elektrokimyasal proseslerin en temel sınırlılıklarından biri yüksek enerji tüketimidir. Özellikle EO sistemlerinde, yüksek akım yoğunluğu altında hızlı oksidasyon kinetikleri elde edilmesine rağmen, bu durum önemli ölçüde enerji girdisi gerektirmektedir (Panizza ve Cerisola, 2009). Akım yoğunluğunun artması ile birlikte hidroksil radikali üretimi hızlanmakta, ancak aynı zamanda oksijen evölüsyonu gibi parasitik reaksiyonlar da artarak enerji verimini düşürmektedir (Martínez-Huitle ve Brillas, 2009). Bu nedenle elektrokimyasal sistemlerde performans ile enerji tüketimi arasında doğrudan bir denge söz konusudur.

Elektrot stabilitesi ve yüzey davranışı da önemli bir sınırlayıcı faktördür. Elektrokimyasal sistemlerde anot ve katot yüzeylerinde zamanla pasivasyon, yüzey kaplanması ve korozyon gibi problemler ortaya çıkmaktadır (Radjenović ve Sedlak, 2015). Özellikle EC sistemlerinde kullanılan kurban anotlar sürekli çözünerek tüketilmekte, bu durum hem işletme maliyetlerini artırmakta hem de sistem kararlılığını sınırlamaktadır. Benzer şekilde elektrooksidasyon sistemlerinde anot yüzeyinde oluşan oksit tabakaları, aktif yüzey alanını azaltarak reaktif tür üretimini sınırlandırabilmektedir (Comninellis ve Chen, 2010).

Yan ürün oluşumu da elektrokimyasal arıtmanın en kritik çevresel sınırlılıklarından biridir. Özellikle klorür içeriği yüksek atıksularda elektrooksidasyon süreçleri sırasında aktif klor türlerinin (Cl_2 , HOCl, ClO^-) oluşumu, klorlu organik yan ürünlerin meydana gelmesine neden olmaktadır (Oturam ve Aaron, 2014). Trihalometanlar (THMs), haloasetik asitler (HAAs) ve diğer adsorblanabilir organik halojen bileşikler (AOX), bu süreçlerin önemli yan ürünleri arasında yer almakta ve arıtılmış suyun toksisite profilini olumsuz yönde etkileyebilmektedir (Khorram vd., 2023). Bu durum, yüksek KOİ giderimlerinin her zaman gerçek mineralizasyon anlamına gelmediğini açıkça göstermektedir.

EF sistemlerinde ise kimyasal bağımlılık önemli bir sınırlamadır. Bu süreçlerde hidrojen peroksit (H_2O_2) ve Fe^{2+} iyonlarının varlığı, hidroksil radikali üretimi için gereklidir. Ancak bu reaktiflerin sürekli olarak sisteme beslenmesi gerekliliği, proses maliyetini artırmakta ve operasyonel kontrolü zorlaştırmaktadır (Brillas vd., 2005). Ayrıca EF sistemlerinde oluşan demir çamuru, ek bir ayırma ve bertaraf aşaması gerektirmektedir. Bu durum, prosesin sürdürülebilirliğini sınırlayan önemli bir faktördür.

Elektrokoagülasyon proseslerinde de benzer şekilde çamur oluşumu önemli bir dezavantajdır. Koagülasyon sonucu oluşan metal hidroksit flokları, kirleticilerin uzaklaştırılmasını sağlarken aynı zamanda önemli miktarda çamur üretmektedir (Mollah vd., 2004). Bu çamurun yönetimi, özellikle endüstriyel ölçekte ciddi bir operasyonel yük oluşturmaktadır.

Elektrokimyasal proseslerin bir diğer temel sınırlılığı ise literatürdeki çalışmaların önemli bir kısmının sentetik veya basitleştirilmiş model çözümler üzerinde gerçekleştirilmiş olmasıdır. Gerçek petrokimyasal atıksuların içerdiği kompleks bileşenler (yağlar, fenoller, yüzey aktif maddeler, çözünmüş tuzlar ve metaller), elektrokimyasal reaksiyon mekanizmalarını doğrudan etkilemektedir (Khorram vd., 2023). Bu nedenle laboratuvar ölçeğinde elde edilen sonuçların gerçek sistemlere genellenebilirliği sınırlı kalmaktadır.

Ölçek büyütme (scale-up) problemi de elektrokimyasal arıtma teknolojilerinin önündeki en önemli engellerden biridir. Laboratuvar ölçeğinde homojen akım dağılımı ve yüksek yüzey alanı/ hacim oranı sağlanabilirken, endüstriyel sistemlerde bu koşulların korunması oldukça zordur (Radjenović ve Sedlak, 2015). Büyük ölçekli reaktörlerde akım dağılımının heterojen hale gelmesi, elektrot yüzeylerinin etkin kullanılmasını engellemekte ve proses verimini düşürmektedir. Ayrıca kütle transferi sınırlamaları, özellikle difüzyon kontrollü elektrooksidasyon süreçlerinde reaksiyon kinetiğini belirleyen ana faktör haline gelmektedir. Tüm bu hususlar birlikte ele alındığında da elektrokimyasal arıtma teknolojilerinin tek başına evrensel bir çözüm sunmadığı açıkça görülmektedir. Bu sistemler, yüksek esnekliklerine rağmen, işletme parametrelerine, atıksu matrisine ve mühendislik tasarımına son derece bağımlıdır (Khorram vd., 2023). Bu nedenle güncel literatürde odak noktası, tekil proseslerin geliştirilmesinden ziyade, enerji verimliliği yüksek, yan ürün oluşumu kontrol altında olan ve farklı proseslerle entegre çalışabilen hibrit sistemlerin tasarlanmasına kaymıştır.

2. Materyal ve Yöntem

Yapılandırılmış ve eleştirel bir literatür taraması olarak tasarlanan bu çalışmada, Web of Science, Scopus, ScienceDirect ve SpringerLink veritabanlarında araştırma yapılmış ve bu süreç içinde aşağıda belirtilen anahtar kelime kombinasyonları kullanılmıştır.

electrochemical treatment AND petrochemical wastewater
electrooxidation OR electro-Fenton OR electrocoagulation AND refinery wastewater

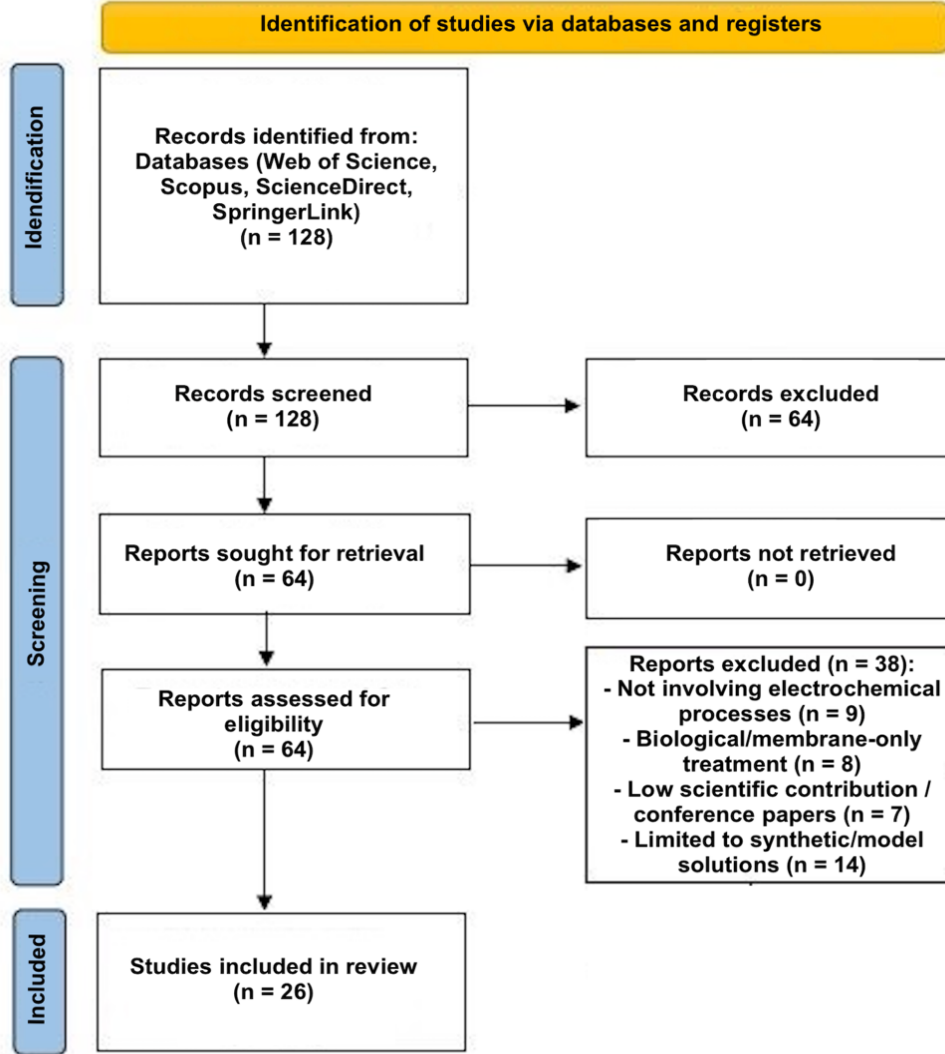
Bu anahtar kelimeler doğrultusunda tarama yapılırken ulaşılan çalışmaların dahil edilme kriterleri aşağıda belirtilmiştir.

- Elektrokimyasal arıtma süreçlerini (elektrooksidasyon, elektro-Fenton, elektrokoagülasyon veya bunların kombinasyonları) içermesi
- Petrokimyasal, rafineri veya produced water kaynaklı atıksulara odaklanması
- Deneysel bulgular veya mekanistik açıklamalar sunması
- Gerçek atıksu çalışmaları öncelikli olmak üzere, uygulama temsiliyeti yüksek olması
- Güncel literatürü temsil etmesi (2020 ve sonrası)
- Alan açısından kabul gören dergilerde yayımlanmış olması

Aşağıdaki özellikleri taşıyan çalışmalar ise değerlendirme dışında bırakılmıştır.

- Elektrokimyasal süreç içermeyen arıtma yöntemleri
- Yalnızca biyolojik veya membran temelli sistemlere odaklanan çalışmalar
- Deneysel katkı sunmayan veya sınırlı özgünlük içeren tekrar niteliğindeki yayınlar
- Konferans bildirimleri ve düşük bilimsel katkı düzeyine sahip çalışmalar

- Gerçek atıksu davranışını temsil etmeyen, yalnızca basit model çözümlerle sınırlı çalışmalar
- Literatür tarama ve çalışmaların seçim süreci PRISMA 2020 akış diyagramı ile Şekil 1’de sunulmuştur.



Şekil 1. Akış Diyagramı

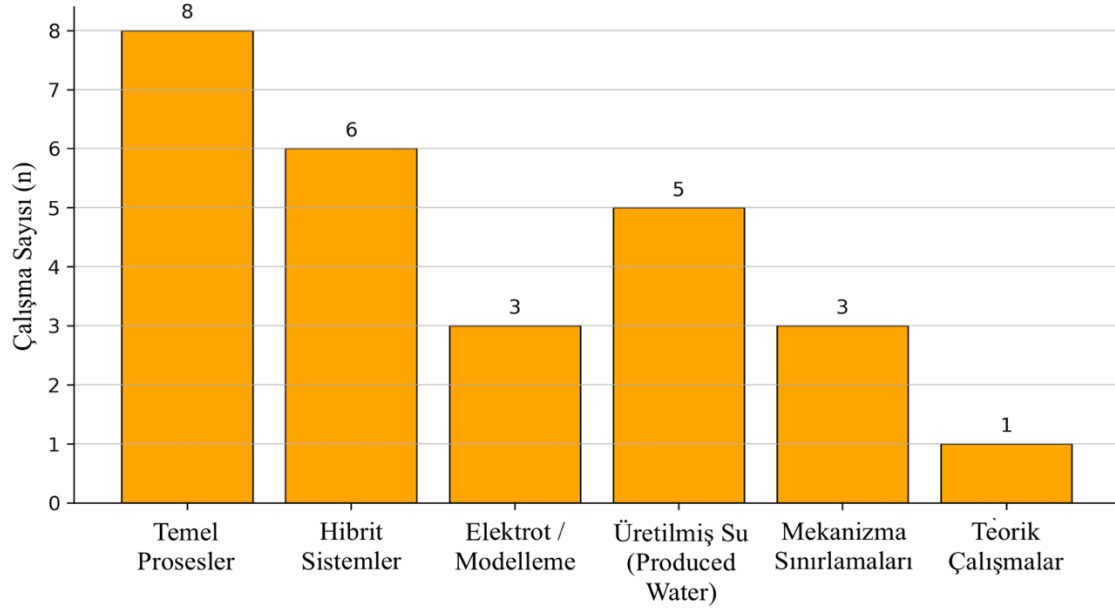
Gerçekleştirilen literatür taraması sonucunda, belirlenen anahtar kelime kombinasyonları kullanılarak toplam 128 yayına ulaşılmıştır. Elde edilen bu kayıtlar başlık ve özet düzeyinde taranmış ve bu aşamada konu kapsamı dışında kalan, elektrokimyasal süreç içermeyen veya metodolojik katkısı sınırlı olan 64 çalışma değerlendirme dışı bırakılmıştır. Kalan 64 çalışmanın tam metinlerine erişilmiş ve ayrıntılı uygunluk değerlendirmesine tabi tutulmuştur. Tam metin incelemesi sonucunda, elektrokimyasal süreç içermeyen (n = 9), yalnızca biyolojik veya membran temelli sistemlere odaklanan (n = 8), düşük bilimsel katkı düzeyine sahip veya konferans bildirisi niteliğinde olan (n = 7) ve yalnızca sentetik/model çözümlerle sınırlı kalan (n = 14) toplam 38 çalışma daha elenmiştir. Bu süreç sonunda, belirlenen dahil etme ve hariç tutma kriterlerini karşılayan toplam 26 çalışma ayrıntılı analiz için seçilmiştir. Son aşamada kalan çalışmalarda göz önünde bulundurulmuş temel gerekçeler; hem güncel literatürü temsil edecek kalitede olmaları hem de elektrokimyasal proseslerin farklı boyutlarını (proses türü, matris etkisi, hibrit sistemler ve operasyonel sınırlılıklar) kapsayacak şekilde olmalarıdır.

3. Bulgular ve Tartışma

3.1. Analiz Sonuçları

Son aşamaya kalan 26 çalışma, elektrokimyasal arıtma süreçlerinin farklı boyutlarını değerlendirebilmek amacıyla tematik olarak sınıflandırılmıştır.

- Öncelikli olarak elektrooksidasyon, elektro-Fenton ve elektrokoagülasyon süreçlerinin performans ve mekanizma temelli analizine odaklanan çalışmalar ele alınmış ve bu kapsamda da Mirshafiee vd. (2024) ve Li vd. (2020) elektrooksidasyon süreçlerinin farklı anot malzemeleri altındaki davranışlarını ortaya koyarken, Sandhwar vd. (2021) elektro-Fenton ve elektrooksidasyon süreçlerini karşılaştırmalı olarak değerlendirdiği görülmüştür. Feizi vd. (2023) ve Dehboudeh vd. (2020) ise hibrit yapıların performans üzerindeki etkisini inceleyen çalışmalar ortaya koyarken, Fatehbasharzad vd. (2021) spesifik kirletici giderimi üzerinden elektro-Fenton sürecinin etkinliğini göstermiştir. Naser vd. (2023) ise elektrokoagülasyon sürecini reaktör tasarımı üzerinden ele alarak süreç performansını mühendislik boyutu bağlamında incelemiştir.
- Çalışmanın ikinci boyutunu ise tekil elektrokimyasal süreçlerin sınırlılıklarını aşmaya yönelik geliştirilen hibrit sistemler oluşturmuş ve bu doğrultuda da Abuduaini vd. (2025, 2026) tarafından geliştirilen güneş enerjisi destekli elektrokoagülasyon sistemleri ile doğal koagülant entegrasyonunun enerji verimliliği ve sürdürülebilirlik açısından önemli katkılar sunduğu anlaşılmıştır. Chabani vd. (2024) ise elektrokoagülasyon ve adsorpsiyon süreçlerinin birlikte kullanımını incelerken, Treviño-Reséndez vd. (2025) elektrokoagülasyon, biyolojik arıtım ve elektrooksidasyonun entegre edildiği çok aşamalı sistemleri inceleyerek proses entegrasyonunun gerekliliği üzerinde durmuştur.
- Diğer açıdan ise elektrot malzemesi, reaktör konfigürasyonu ve sistem optimizasyonu gibi mühendislik parametreleri de çalışmanın önemli bir bileşenini oluşturmuştur. Bu kapsamda Mohamed vd. (2026) elektrokoagülasyon sürecine ilişkin modelleme ve çamur karakterizasyonu üzerinden süreç optimizasyonuna katkı sunacak bir çalışma ortaya koyarken, Zhao vd. (2023) ise yeni nesil elektrot malzemelerinin elektro-Fenton performansı üzerindeki etkilerini incelemiştir. Jiad ve Abbar (2023) ise enerji tüketimi ve proses verimliliğini birlikte ele alarak elektrokimyasal sistemlerin uygulanabilirliği üzerinden bir çalışma yürütmüştür.
- Petrokimyasal atıksuların karakteristik özelliklerinin süreç performansı üzerindeki rolüne bakıldığında ise özellikle “produced water” çalışmaları üzerinden ele alındığı görülmektedir. Tawabini ve Basaleh (2025) pilot ölçekli uygulamalar üzerinden elektrooksidasyonun gerçek sistemlerdeki performansını ortaya koyarken, Yang vd. (2023) elektrokimyasal süreçlerde oluşan yan ürünlerin doğasını inceleyerek proses güvenliği açısından önemli bir boşluğu doldurmayı amaçlamıştır. de Aguiar Pedott vd. (2024) elektrokimyasal oksidasyon süreçlerinin temel prensiplerini ve sınırlılıklarını değerlendirirken, Abdulgani vd. (2022) yüksek tuzluluğun reaksiyon mekanizmaları üzerindeki etkisini incelemiştir. Pahlevani vd. (2020) ise anot modifikasyonlarının süreç performansına etkisini deneysel olarak göstermiştir.
- Elektrokimyasal arıtma süreçlerinin operasyonel sınırlılıkları da kapsam dahilinde ele alınırken; elektrot pasivasyonu problemi Ibrahim vd. (2020) tarafından incelenirken, Joag vd. (2024) elektrot korozyonu ve elektrokimyasal sistem davranışı arasındaki ilişkiyi ortaya koymuştur. Druskovic vd. (2022) ise ön arıtım uygulamalarının elektrokimyasal süreç performansı üzerindeki etkisini inceleyerek sistem tasarımında çok boyutlu bir yapının gerekliliği üzerinde durmuştur.
- Son olarak da çalışmanın teorik çerçevesi Khorram vd. (2023) tarafından sunulan kapsamlı tarama üzerinden yapılandırılmıştır. Seçilen çalışmalar tematik olarak sınıflandırıldığında, araştırmaların büyük ölçüde temel prosesler ve hibrit sistemler üzerinde yoğunlaştığı görülmektedir (Şekil 2).



Şekil 2. Tematik Dağılım

Tablo 1. Petrokimyasal, Rafineri ve Üretilmiş Suların Elektrokimyasal Arıtımına İlişkin Seçilmiş Çalışmaların Özeti

Çalışma	Atıksu türü	Proses	Amaç	Sistem / Elektrot	Bulgu	Mekanizma	Sınırlılık
Mirshafie vd., 2024	Petrokimyasal (gerçek)	EO	Hızlı arıtım	MMO (RuO ₂ -IrO ₂ -TiO ₂)	%79 KOİ giderimi (6 dk)	Aktif klor + •OH	Yüksek enerji, eksik mineralizasyon
Li vd., 2020	Petrokimyasal (biyolojik arıtılmış)	EO	Son arıtım	BDD	%83.5 KOİ giderimi, düşük enerji	•OH oksidasyonu	Düşük yüklü atıksularla sınırlı
Dehboudeh vd., 2020	Petrokimyasal (gerçek)	EF + IFAS	Biyobozunabilirlik artırımı	EF + biyofilm	Yüksek toplam giderim	Ardışık oksidasyon + biyobozunma	Kimyasal gereksinimi, sistem karmaşıklığı
Feizi vd., 2023	Petrokimyasal (gerçek)	EC + EO	Hibrit verim artışı	Al/Fe + EO varyasyonları	%80 KOİ giderimi	Sinerjik süreçler	Sistem karmaşıklığı
Sandhwar vd., 2021	Sentetik	EF / EO	Karşılaştırma	Grafit	EF, EO'dan daha yüksek giderim sağladı	•OH oksidasyonu	Sentetik matris
Fatehbash arzad vd., 2021	Sentetik	EF	Sülfid giderimi	Fe	%97 giderim	•OH radikalleri	Gerçek atıksu yok
Naser vd., 2023	Rafineri (gerçek)	EC	Reaktör tasarımı	Tübüler Al	%73 KOİ giderimi	Koagülasyon / flotasyon	Mineralizasyon yok

Abuduaini vd., 2025	Petrokimyasal (gerçek)	EC (güneş enerjili)	Enerji azaltımı	Al + güneş sistemi	Yaklaşık %53 KOİ giderimi	Koagülasyon	Sınırlı giderim
Abuduaini vd., 2026	Petrokimyasal (gerçek)	EC + biyokoagülant	Performans artışı	Al + PBC	Yaklaşık %62 KOİ giderimi	Adsorpsiyon + koagülasyon	Oksidasyon yok
Chabani vd., 2024	Rafineri (gerçek)	EC + adsorpsiyon	Kombine giderim	Al + PAC	%82 KOİ giderimi	Adsorpsiyon	Gerçek parçalanma yok
Treviño-Reséndez vd., 2025	Rafineri (gerçek)	EC + AS + EO	Tam arıtım	Entegre sistem	%90'ın üzerinde giderim	Ardışık süreçler	Yüksek karmaşıklık
Mohamed vd., 2026	Rafineri (gerçek)	EC	Modelleme	Al	Yüksek bulanıklık giderimi	Flok oluşumu	Çözünmüş tür giderimi sınırlı
Zhao vd., 2023	Yağlı atıksu	EF	Elektrot geliştirme	Fe-metalik cam	%77 KOİ giderimi	Fe ²⁺ katalizi	Kimyasal bağımlılık
Jiad ve Abbar, 2023	Rafineri	EF	Enerji optimizasyonu	Hava katodu	%91 KOİ giderimi	H ₂ O ₂ üretimi	Kimyasal kullanımı
Alturki vd., 2024	Rafineri	EF	Optimizasyon	SS/Fe	%93 giderim	Parametre etkileşimi	Laboratuvar ölçeği
Jasim ve AlJaberi, 2023	Yağlı	EC	Konfigürasyon	Al	Yüksek KOİ giderimi	Akım dağılımı	Sınırlı enerji verisi
Tawabini ve Basaleh, 2025	Produced water	EO	Pilot ölçek uygulama	EO ünitesi	Kararlı giderim	Aktif klor	Yan ürünler belirsiz
Yang vd., 2023	Produced water (simüle)	EO	Yan ürün analizi	Ti/IrO ₂	Toksik yan ürün oluşumu	Klor temelli yollar	Gerçek matris değil
de Aguiar Pedott vd., 2024	Produced water	EO (derleme)	Değerlendir.	Çeşitli	Yüksek potansiyel	Matris etkisi	Ölçek büyütme sorunları
Al-Ameri vd., 2023	Produced water	EO ve EF	Optimizasyon	Grafit / Fe	EF'de %98 KOİ giderimi	•OH oksidasyonu	Çamur, pH
Abdulgani vd., 2022	Produced water	EO	Tuzluluk etkisi	Ti/IrO ₂	%79 KOİ giderimi	Aktif klor	Yan ürün oluşumu
Pahlevani vd., 2020	Produced water	EO	Elektrot modifikasyonu	Ti/SnO ₂ -GO	Yaklaşık %60 KOİ giderimi	•OH + Cl	Sınırlı giderim
Ibrahim vd., 2020	Produced water	EC	Pasivasyon kontrolü	Delikli elektrotlar	Yüksek giderim	Hidrodinamik etki	Sentetik sistem
Joag vd., 2024	Hipersalin produced water	EC	Mekanizma incelemesi	Al	Yüksek Si giderimi	Korozyon etkileri	Sertlik giderimi sınırlı
Druskovic vd., 2022	Yağlı atıksu	EF + EC	Ön arıtım etkisi	Çok aşamalı sistem	%98 KOİ giderimi	Sinerji	Karmaşık sistem

Khorram vd., 2023	Produced water ve yağlı atıksular	Derleme	Genel değerlerdir	Çeşitli	Hibrit süreçler daha başarılı	Matris bağımlılığı	Maliyet, ölçekleme
--------------------------	-----------------------------------	---------	-------------------	---------	-------------------------------	--------------------	--------------------

3.1.1. Tekil Elektrokimyasal Proseslerin Performans Sınırları

Elektrokimyasal arıtma prosesleri, özellikle EO ve EF, petrokimyasal atıksuların arıtımında yüksek giderim verimleri sunabilen ileri teknolojiler olarak öne çıkmaktadır. Bununla birlikte, literatürde yer alan deneysel bulgular, bu proseslerin performansının intrinsik özelliklerinden ziyade, büyük ölçüde atıksu matrisine ve işletme koşullarına bağlı olduğunu açıkça göstermektedir.

Mirshafiee vd. (2024) çalışmasında, MMO anot kullanılarak yalnızca 6 dakika gibi kısa bir sürede %79 KOİ giderimi elde edilmesi, elektrooksidasyonun kinetik açıdan son derece hızlı bir proses olduğunu ortaya koymaktadır. Ancak aynı çalışmada alkaline koşullarda verimin dramatik biçimde düşmesi, proses performansının pH ve matris bileşimi tarafından belirleyici şekilde kontrol edildiğini göstermektedir. Bu durum, elektrooksidasyonun evrensel bir çözüm olmadığını, aksine koşula bağımlı bir teknoloji olduğunu ortaya koymaktadır. Benzer şekilde, Li vd. (2020) tarafından gerçekleştirilen çalışmada bor katkılı elmas (BDD) anot kullanımı ile %83.5 KOİ giderimi ve 30 mg/L seviyesinde çıkış suyu kalitesi elde edilmiştir. Ancak bu yüksek performansın yalnızca biyolojik arıtma sonrası düşük yükteki atıksular için geçerli olması, elektrooksidasyonun tek başına bir arıtım çözümü olmaktan ziyade proses zincirinin bir parçası olarak değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir.

Elektro-Fenton prosesi ile elektrooksidasyonun doğrudan karşılaştırıldığı çalışmalar da benzer bir tabloyu ortaya koymaktadır. Sandhwar vd. (2021) çalışmasında elektro-Fenton prosesi %66 KOİ giderimi sağlarken elektrooksidasyon %56 seviyesinde kalmıştır. Bununla birlikte iki prosesin enerji tüketimleri arasında anlamlı bir fark bulunmaması, daha yüksek performansın doğrudan daha ekonomik bir çözüm anlamına gelmediğini göstermektedir.

EC prosesine ilişkin çalışmalar ise farklı bir sınırlılığı ortaya koymaktadır. Naser vd. (2023) tarafından geliştirilen tübüler reaktör tasarımında %73 KOİ giderimi elde edilmesine rağmen, bu giderimin büyük ölçüde flok oluşumu ve faz transferine dayandığı, gerçek anlamda bir mineralizasyon gerçekleşmediği görülmektedir. Bu durum, elektrokoagülasyonun oksidatif bir proses değil, ön arıtım basamağı olarak değerlendirilmesi gerektiğini açıkça ortaya koymaktadır.

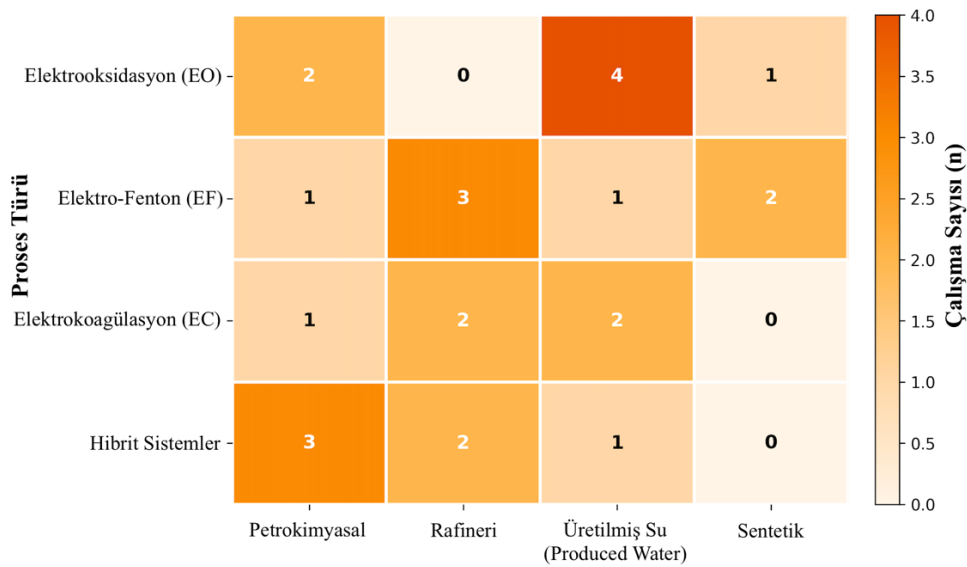
Bu çalışmalar birlikte değerlendirildiğinde ise elektrooksidasyon ve elektro-Fenton proseslerinin yüksek giderim potansiyeline sahip olduğu, ancak bu performansın sistematik ve genellenebilir olmadığı görülmektedir. Elektrokoagülasyon ise partikül ve koloidal kirleticiler için etkili olmakla birlikte çözünmüş ve refrakter organiklerin gideriminde yetersiz kalmaktadır.

3.1.2. Matris Etkisi ve Mekanizma Kaymaları

Petrokimyasal atıksuların elektrokimyasal yöntemlerle arıtımında performansı belirleyen temel faktör, kullanılan elektrot materyali veya proses türünden ziyade, atıksu matrisinin kimyasal ve fiziksel özellikleridir. Literatürdeki çok sayıda çalışma, aynı elektrokimyasal sistemin farklı atıksu kompozisyonlarında tamamen farklı mekanizmalar üzerinden çalıştığını ve bu durumun giderim verimleri ile birlikte proses güvenliğini de doğrudan etkilediğini göstermektedir.

Proses–matris etkileşimi literatürdeki çalışmalar üzerinden nicel olarak değerlendirildiğinde (Şekil 3) özellikle yüksek tuzluluk içeren sistemlerde, elektrooksidasyon prosesinin klasik hidroksil radikali ($\bullet\text{OH}$) temelli mekanizmasından saparak aktif klor türlerinin (Cl_2 , HOCl , ClO^-) baskın olduğu bir oksidasyon rejimine geçtiği açıkça ortaya konmuştur. Yang vd. (2023) çalışmasında, fenol tamamen giderilmiş olmasına rağmen çok sayıda toksik klorlu yan ürünün (trihalometanlar, haloasetik asitler ve diğer adsorblanabilir organik halojen bileşikler) oluştuğu gösterilmiştir. Bu durum, yüksek giderim verimlerinin her zaman gerçek mineralizasyon

anlamına gelmediğini açıkça ortaya koymaktadır. Benzer şekilde, pilot ölçekli elektrooksidasyon uygulamalarında da yüksek iletkenliğin enerji avantajı sağladığı, ancak bu durumun oksidasyon mekanizmasını radikal temelli reaksiyonlardan aktif klor kimyasına kaydıracağı gözlemlenmiştir. Tawabini ve Basaleh (2025) tarafından gerçekleştirilen çalışma, produced water gibi klorürce zengin ortamlarda elektrooksidasyonun performansının arttığını, ancak bu artışın seçici olmayan klorinasyon reaksiyonlarına dayandığını ortaya koymaktadır. Bu durum, prosesin çevresel güvenliği açısından ciddi belirsizlikler yaratmaktadır. Bu mekanizma kayması yalnızca yan ürün oluşumu açısından değil, bununla beraber reaksiyon kinetiği ve oksidasyon seçiciliği açısından da kritik sonuçlar doğurmaktadır. Hidroksil radikali temelli oksidasyon süreçleri genellikle non-selektif ve yüksek mineralizasyon kapasitesine sahipken, aktif klor türleri daha seçici reaksiyonlar oluşturarak ara ürün birikimine neden olabilmektedir. Bu durum, özellikle aromatik ve refrakter bileşiklerin parçalanmasında sistem performansını sınırlayan temel faktörlerden biri olarak değerlendirilmektedir.



Şekil 3. Proses – Matris Etkileşimi Isı Haritası

Matris etkisinin bir diğer önemli boyutu ise çoklu kirletici etkileşimleridir. Petrokimyasal atıksular genellikle yağ, fenoller, yüzey aktif maddeler, çözünmüş iyonlar ve ağır metallerin birlikte bulunduğu kompleks sistemlerdir. Mohamed vd. (2026) çalışmasında, elektrokoagülasyon prosesinin bulanıklık gideriminde %93'ün üzerinde performans göstermesine rağmen çözünmüş kalsiyum gideriminde %36 seviyesinde kalması, aynı sistemin farklı kirletici türlerine karşı farklı mekanizmalarla ve farklı verimlerde çalıştığını göstermektedir. Bu durum, elektrokimyasal proseslerin tek bir kirletici üzerinden değerlendirilmesinin metodolojik olarak yetersiz olduğunu ortaya koymaktadır.

Elektro-Fenton sistemlerinde de benzer bir matris bağımlılığı gözlenmektedir. Özellikle pH, H₂O₂ konsantrasyonu ve Fe²⁺ varlığı gibi parametrelerin küçük değişimleri dahi sistem performansında büyük farklılıklara neden olmaktadır. Bu durum, elektrokimyasal arıtma süreçlerinin doğrusal olmayan, çok değişkenli ve etkileşimli bir yapıya sahip olduğunu göstermektedir.

Bu noktada literatürün ortaya koyduğu en temel saptamaya göre; “elektrokimyasal arıtma prosesleri sabit bir mekanizma ile çalışmaz; matris koşullarına bağlı olarak mekanizma değiştiren dinamik sistemlerdir.” Bu çıkarım, elektrokimyasal arıtma çalışmalarında sıklıkla göz ardı edilen bir metodolojik soruna işaret etmektedir. Birçok çalışma, yüksek giderim

verimlerini doğrudan proses başarısı olarak yorumlamakta, ancak bu verimlerin hangi mekanizma üzerinden elde edildiğini ve yan ürün oluşum potansiyelini yeterince sorgulamamaktadır. Bu bağlamda, elektrooksidasyon süreçlerinde elde edilen yüksek KOİ giderimlerinin önemli bir kısmının gerçek mineralizasyonu değil, klorinasyon temelli dönüşümleri yansıttığı söylenebilir. Bu durum, özellikle klorür açısından zengin petrokimyasal atıksular için kritik bir risk oluşturmaktadır. Dolayısıyla giderim verimi, mineralizasyonu temsil etmez; çoğu durumda yalnızca kirleticinin kimyasal form değiştirdiğini gösterir.

3.1.3. Hibrit Sistemlerdeki Dönüşüm

Petrokimyasal atıksuların arıtımına yönelik literatür incelendiğinde tekil elektrokimyasal proseslerin sınırlılıklarının zamanla hibrit sistemlerin geliştirilmesine yol açtığı açıkça görülmektedir. Bu evrim, yalnızca performans artışı sağlama amacıyla değil, aynı zamanda farklı mekanizmaların birbirini tamamlaması gerekliliğinden doğmuştur.

Elektro-Fenton ve biyolojik proseslerin birlikte kullanıldığı çalışmalar, bu dönüşümün erken örneklerini oluşturmaktadır. Dehboudeh vd. (2020) çalışmasında elektro-Fenton prosesinin kompleks organik bileşikleri parçalayarak biyolojik olarak parçalanabilir hale getirdiği, ardından IFAS sisteminin bu bileşikleri mineralize ettiği gösterilmiştir. Bu durum, elektrokimyasal proseslerin nihai arıtım teknolojisi olmaktan ziyade, biyolojik süreçleri destekleyen bir ön işleme teknolojisi olarak yeniden konumlandırılması gerektiğini ortaya koymaktadır. Benzer şekilde, elektrokoagülasyon ve elektrooksidasyonun birlikte kullanıldığı hibrit sistemler, tekil proseslere kıyasla belirgin performans artışları sağlamaktadır. Feizi vd. (2023) çalışmasında elektrokoagülasyon ile yaklaşık %40 seviyesinde kalan KOİ giderimi, elektrooksidasyon ve yardımcı proseslerle entegre edildiğinde %80 seviyesine ulaşmıştır. Bu artış, sistemlerin doğrusal değil, sinerjik şekilde çalıştığını göstermektedir. Ancak hibrit sistemlerin evrimi yalnızca elektrokimyasal proseslerin kombinasyonu ile sınırlı kalmamış, adsorpsiyon ve doğal koagülantlar gibi destekleyici süreçlerin entegrasyonu da araştırılmıştır. Chabani vd. (2024) çalışmasında elektrokoagülasyon ve adsorpsiyonun birlikte kullanımı ile %82 KOİ giderimi elde edilmiştir. Bununla birlikte bu yüksek performansın büyük ölçüde kirleticilerin faz transferi ve adsorpsiyon yoluyla uzaklaştırılmasına dayandığı, gerçek anlamda bir mineralizasyon sağlamadığı görülmektedir. Bu durum, hibrit sistemlerin performans artışı sağlayabilse de, her zaman kalıcı bir çözüm sunmadığını göstermektedir.

Koagülasyon temelli hibrit yaklaşımların sınırlılıkları da daha sürdürülebilir alternatiflerin araştırılmasına da yol açmıştır. Güneş enerjili elektrokoagülasyon sistemleri ve biyokoagülant destekli uygulamalar, enerji tüketimini azaltma ve çevresel sürdürülebilirliği artırma açısından önemli katkılar sunmaktadır. Ancak Abuduaini vd. (2025; 2026) çalışmalarında görüldüğü üzere, bu tür sistemler genellikle %50–60 KOİ giderimi seviyelerinde kalmakta ve özellikle refrakter organiklerin parçalanmasında yetersiz kalmaktadır.

Bu noktada literatürde ortaya çıkan en ileri yaklaşım, çok aşamalı ve entegre sistemlerin geliştirilmesidir. Treviño-Reséndez vd. (2025) çalışmasında elektrokoagülasyon, aktif çamur ve elektrooksidasyon proseslerinin birlikte kullanılması ile %90'ın üzerinde KOİ giderimi elde edilmiş ve arıtılmış suyun yeniden kullanım kriterlerini sağladığı gösterilmiştir. Bu sistemde her bir proses, diğerinin zayıf yönünü tamamlayacak şekilde konumlandırılmıştır:

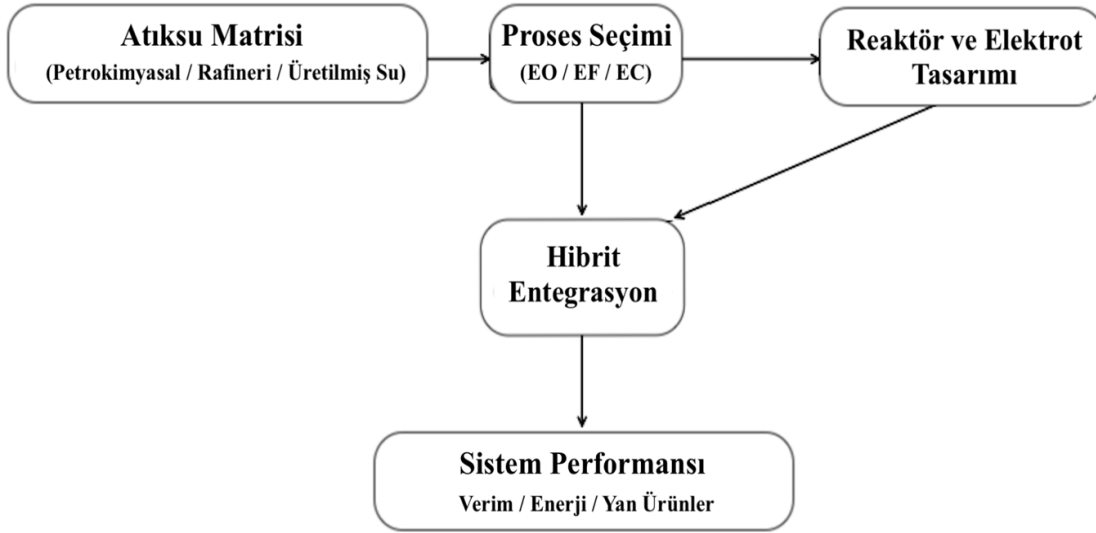
- Elektrokoagülasyon → askıda katı ve kolloidal kirleticilerin uzaklaştırılması
- Biyolojik proses → biyobozunur organiklerin giderimi
- Elektrooksidasyon → refrakter bileşiklerin parçalanması

Bu yapı ise elektrokimyasal arıtmanın tek bir proses seçimi değil, bir proses mimarisi problemi olduğunu açıkça ortaya koymaktadır. Hibrit sistemlerin bu şekilde evrilmesi, literatürde önemli bir paradigma değişimini işaret etmektedir. Başlangıçta elektrokimyasal prosesler “ileri ve tek başına yeterli teknolojiler” olarak değerlendirilirken, güncel çalışmalar bu proseslerin ancak diğer fiziksel ve biyolojik süreçlerle entegre edildiğinde etkin ve sürdürülebilir sonuçlar verebildiğini göstermektedir.

Bu bağlamda elde edilen en önemli çıkarıma göre; “elektrokimyasal prosesler tek başına bir çözüm değil, çok aşamalı arıtma sistemlerinin tamamlayıcı bileşenleridir.” Bu çıkarım, proses performansının yalnızca giderim verimleri üzerinden değil, sistem içindeki fonksiyonel rolü üzerinden değerlendirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır. Dolayısıyla elektrokimyasal arıtma teknolojilerinin geleceği, yeni bir proses geliştirmekten ziyade, mevcut proseslerin optimal şekilde entegre edildiği sistem mimarilerinin tasarlanmasına bağlıdır.

3.1.4. Sistem Tasarımı, Elektrot, Reaktör ve Enerji

Elektrokimyasal arıtma süreçlerinin performansı, yalnızca kullanılan proses türü ile açıklanabilecek bir olgu değildir. Literatürdeki güncel çalışmalar, sistem veriminin elektrot malzemesi, reaktör tasarımı, işletme parametreleri ve enerji girdisinin birlikte belirlediği çok boyutlu bir mühendislik problemi olduğunu açıkça ortaya koymaktadır.



Şekil 4. Kavramsal Model

a) Elektrot Malzemesi ve Reaktif Tür Üretimi

Elektrot materyali, elektrokimyasal sistemlerde üretilen reaktif türlerin doğasını ve yoğunluğunu doğrudan belirleyen temel parametrelerden biridir. Zhao vd. (2023) çalışmasında kullanılan Fe-bazlı amorf metalik cam elektrotların, klasik sistemlere kıyasla daha yüksek Fe^{2+} üretimi sağlayarak elektro-Fenton reaksiyonlarını hızlandırdığı gösterilmiştir. Bu durum, elektrot yüzey özelliklerinin yalnızca iletkenlik değil, aynı zamanda katalitik aktivite açısından da belirleyici olduğunu ortaya koymaktadır. Benzer şekilde, bor katkılı elmas (BDD) anotlar yüksek miktarda serbest hidroksil radikali ($\bullet OH$) üreterek güçlü ve non-selektif oksidasyon kapasitesi sunarken, MMO (RuO_2-IrO_2 bazlı) anotlar genellikle aktif klor türlerinin oluşumunu teşvik etmektedir. Bu fark, yalnızca performans değil, aynı zamanda reaksiyon mekanizması ve yan ürün oluşumu açısından da kritik sonuçlar doğurmaktadır.

Bu bağlamda görülmüştür ki; elektrot seçimi, yalnızca verimi değil, reaksiyon yolunu da belirler.

b) Reaktör Tasarımı ve Hidrodinamik Etkiler

Elektrokimyasal arıtma sistemlerinde sıklıkla ihmal edilen bir diğer kritik unsur, reaktör geometrisi ve elektrot konfigürasyonudur. Jasim ve AlJaberi (2023) çalışmasında, yalnızca elektrot yerleşiminin değiştirilmesi ile sistem performansında belirgin iyileşmeler elde edilmiştir. Bu durum, akım dağılımı ve kütle transferinin reaktör tasarımı tarafından doğrudan kontrol edildiğini göstermektedir. Naser vd. (2023) tarafından geliştirilen tübüler reaktör

sistemi ise, spiral anot tasarımı sayesinde kütle transferini artırarak klasik sistemlere kıyasla daha yüksek giderim verimleri sağlamıştır. Bu bulgular, elektrokimyasal proseslerin yalnızca elektrot malzemesi değil, aynı zamanda reaktör hidrodinamiği tarafından da şekillendirildiğini ortaya koymaktadır. Ayrıca karıştırma hızı, elektrot aralığı ve akış rejimi gibi parametreler, difüzyon kontrollü süreçlerde reaksiyon hızını belirleyen temel faktörlerdir. Özellikle elektrooksidasyon süreçlerinde, reaktif türlerin elektrot yüzeyinden çözelti fazına taşınması çoğu zaman kinetiği sınırlayan ana mekanizma olarak öne çıkmaktadır.

Bu nedenle reaktör tasarımının elektrokimyasal reaksiyonların gerçekleşme hızını belirleyen gizli parametre olduğu görülebilmektedir.

c) Enerji Tüketimi ve Proses Gerçekçiliği

Elektrokimyasal arıtma teknolojilerinin uygulanabilirliğini belirleyen en kritik faktörlerden biri, özgül enerji tüketimidir. Literatürde yüksek giderim verimlerine ulaşan birçok sistemin, enerji tüketimi açısından sürdürülebilir olmadığı görülmektedir. Mirshafiee vd. (2024) çalışmasında elektrooksidasyon ile kısa sürede yüksek KOİ giderimi sağlanmasına rağmen enerji tüketiminin 85–235 kWh/m³ aralığında olması, bu tür sistemlerin doğrudan uygulamasını sınırlamaktadır. Buna karşılık Li vd. (2020) çalışmasında BDD anot kullanımı ile daha düşük enerji tüketimi (~6.24 kWh/m³) elde edilmiş, ancak bu sistemin yalnızca düşük yükteki atıksular için uygun olduğu görülmüştür. Elektro-Fenton sistemlerinde ise enerji tüketimi ile kimyasal tüketim birlikte değerlendirilmelidir. Jiad ve Abbar (2023) çalışmasında %91'in üzerinde KOİ giderimi elde edilmesine rağmen, sistemin enerji ve kimyasal girdilere bağımlı olduğu görülmektedir. Bu durum, yüksek performansın tek başına yeterli bir kriter olmadığını açıkça göstermektedir.

Bu sonucun gösterdiği üzere elektrokimyasal proseslerin değerlendirilmesi de yalnızca giderim verimleri ile değil, enerji ve kimyasal tüketim ile birlikte yapılmalıdır.

d) İşletme Parametreleri ve Çok Değişkenli Sistem Davranışı

Elektrokimyasal arıtma süreçleri, doğrusal olmayan ve çok değişkenli sistemler olarak tanımlanmalıdır. Alturki vd. (2024) çalışmasında elektro-Fenton prosesinin pH, sıcaklık ve reaksiyon süresi gibi parametreler arasındaki etkileşimlere bağlı olarak değiştiği ve bu etkileşimlerin istatistiksel olarak modellenilebildiği gösterilmiştir. Özellikle pH, akım yoğunluğu ve elektrolit konsantrasyonu gibi parametreler, yalnızca bağımsız etkiler değil, aynı zamanda birbirleriyle etkileşimli sonuçlar üretmektedir. Bu durum, elektrokimyasal sistemlerin klasik “tek parametre optimizasyonu” yaklaşımı ile analiz edilmesinin yetersiz olduğunu göstermektedir. Bu nedenle de elektrokimyasal proses tasarımı, çok değişkenli ve etkileşim temelli bir optimizasyon yaklaşımı gerektirmektedir.

3.2. Tartışma

Petrokimyasal ve üretilmiş suların elektrokimyasal yöntemlerle arıtımında rapor edilen yüksek giderim verimlerinin, süreçlerin gerçek performansını yansıtmak açısından tek başına yeterli ve güvenilir bir gösterge olmadığı açık biçimde ortaya çıkmaktadır; zira EO ve EF gibi ileri oksidasyon süreçleri güçlü oksidan türlerin üretimi sayesinde kısa sürede yüksek KOİ giderimleri sağlayabilse de, bu performansın büyük ölçüde atıksu matrisine, özellikle de tuzluluk, pH ve iyonik kompozisyona bağlı olarak değiştiği ve farklı çalışma koşullarında tamamen farklı reaksiyon mekanizmalarının baskın hale gelebildiği görülmektedir (Mirshafiee vd., 2024; Li vd., 2020; Yang vd., 2023; Tawabini ve Basaleh, 2025). Özellikle klorürce zengin sistemlerde hidroksil radikali ($\bullet\text{OH}$) temelli non-selektif oksidasyon mekanizmalarının yerini aktif klor türlerinin (Cl_2 , HOCl , ClO^-) aldığı ve bu durumun hem reaksiyon kinetiğini hem de ürün dağılımını köklü biçimde değiştirdiği; dolayısıyla yüksek KOİ gideriminin çoğu durumda gerçek mineralizasyon yerine ara ürün oluşumu ve klorinasyon reaksiyonlarını temsil ettiği literatürde tutarlı biçimde rapor edilmektedir (Yang vd., 2023; Abdulgani vd., 2022). Bu bağlamda elektrooksidasyonun “yüksek verimli” olarak tanımlanan çıktılarının, proses güvenliği ve toksik yan ürün oluşumu açısından yeniden yorumlanması gerektiği

anlaşılmaktadır. Benzer şekilde elektro-Fenton prosesinin yüksek oksidasyon kapasitesine rağmen pH, Fe^{2+} ve H_2O_2 konsantrasyonlarına aşırı duyarlı olması ve enerji ile kimyasal tüketimin birlikte değerlendirilmesini gerektirmesi, bu yöntemin de doğrudan genellenebilir bir çözüm olmadığını göstermektedir (Jiad ve Abbar, 2023; Alturki vd., 2024). EC süreçleri ise özellikle askıda katı, yağ ve koloidal kirleticilerin gideriminde etkili olmakla birlikte, çözünmüş ve refrakter organiklerin parçalanmasında sınırlı kalmakta ve elde edilen yüksek giderimlerin büyük ölçüde faz transferi, floklaşma ve adsorpsiyon mekanizmalarına dayandığı görülmektedir (Naser vd., 2023; Mohamed vd., 2026). Bu durum, elektrokimyasal proseslerin performansının yalnızca proses türü ile değil, aynı zamanda kirletici türü ve matris özellikleri ile birlikte değerlendirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır. Ayrıca elektrot malzemesi, reaktör tasarımı ve işletme parametrelerinin reaktif tür üretimi, kütle transferi ve enerji verimliliği üzerindeki belirleyici rolü, elektrokimyasal arıtma süreçlerinin basit bir reaksiyon sistemi değil, çok değişkenli bir mühendislik problemi olduğunu göstermektedir (Zhao vd., 2023; Jasim ve AlJaberi, 2023). Bu çerçevede literatürde gözlenen en önemli eğilim, tekil proseslerin sınırlılıklarını aşmak amacıyla hibrit sistemlere yönelimdir; elektrokoagülasyon, biyolojik arıtım ve elektrooksidasyon gibi süreçlerin ardışık veya entegre biçimde kullanıldığı sistemlerin daha yüksek giderim verimleri ve daha kararlı işletme performansı sağladığı gösterilmiş olmakla birlikte (Feizi vd., 2023; Treviño-Reséndez vd., 2025), bu sistemlerin de enerji tüketimi, kimyasal bağımlılık, çamur oluşumu ve operasyonel karmaşıklık gibi yeni sınırlılıklar getirdiği görülmektedir. Dolayısıyla mevcut literatürün ortaklaştığı temel nokta, elektrokimyasal arıtma süreçlerinin sabit mekanizmalarla çalışan bağımsız teknolojiler olmadığı; aksine atıksu matrisine bağlı olarak davranış değiştiren, mekanizma kaymaları sergileyen ve performansı büyük ölçüde sistem entegrasyonu ile belirlenen dinamik yapılar olduğudur (Khorram vd., 2023). Buna göre elektrokimyasal arıtmanın geleceğinin yeni bir proses geliştirmekten ziyade, matris özelliklerini merkezine alan, enerji – verim – yan ürün dengesi gözetilmiş ve prosesler arası sinerjiyi optimize eden entegre sistem mimarilerinin geliştirilmesine bağlı olduğu güçlü biçimde anlaşılmıştır.

4. Sonuç ve Öneriler

Çalışma kapsamında incelemeye alınan literatür; petrokimyasal ve üretilmiş suların elektrokimyasal yöntemlerle arıtımında yüksek giderim verimlerinin tek başına yeterli bir başarı ölçütü olmadığını açık biçimde ortaya koymaktadır. EO ve EF prosesleri güçlü oksidasyon kapasiteleri sayesinde yüksek KOİ giderimi sağlayabilmekte; EC ise özellikle yağ, bulanıklık, askıda katı madde ve koloidal kirleticilerin uzaklaştırılmasında etkili sonuçlar verebilmektedir. Ancak bu performansların tüm atıksu tiplerine doğrudan genellenmesi mümkün değildir. Çalışmalar birlikte değerlendirildiğinde, elektrokimyasal proseslerin başarısının kullanılan proses türünden çok atıksu matrisinin kimyasal bileşimi, tuzluluk düzeyi, pH, elektrot malzemesi, reaktör konfigürasyonu ve enerji girdisi tarafından belirlendiği görülmektedir. Özellikle yüksek klorür içeren üretilmiş su ve rafineri atıksularında oksidasyon mekanizmasının hidroksil radikali temelli mineralizasyondan aktif klor türleri aracılığıyla gerçekleşen dolaylı oksidasyon rejimine kayması, yüksek giderim değerlerinin her zaman güvenli veya kalıcı bir arıtımı temsil etmediğini göstermektedir. Bu durum, “giderim” ile “mineralizasyon” arasındaki ayrımın elektrokimyasal arıtma çalışmalarında açık biçimde yapılması gerektiğini ortaya koymaktadır. Benzer şekilde EC proseslerinde yüksek KOİ veya bulanıklık giderimi elde edilse bile, bu giderimin çoğu zaman kirleticilerin parçalanmasından ziyade faz transferi, floklaşma veya adsorpsiyon yoluyla gerçekleştiği anlaşılmaktadır. Dolayısıyla tekil elektrokimyasal proseslerin kompleks, yüksek tuzluluklu ve çok bileşenli petrokimyasal atıksular için kalıcı ve genellenebilir bir çözüm sunmadığı sonucuna ulaşılmıştır. Literatürde son yıllarda hibrit sistemlere yönelimin artması da bu sınırlılığın doğal bir sonucu olarak değerlendirilebilir. EC, biyolojik arıtım, adsorpsiyon, EF ve EO gibi süreçlerin birlikte kullanıldığı çok aşamalı sistemler, tekil proseslere kıyasla daha yüksek giderim ve daha kararlı

işletme performansı sağlayabilmektedir. Bununla birlikte hibrit sistemlerin de enerji tüketimi, kimyasal gereksinimi, çamur oluşumu, yan ürün riski ve operasyonel karmaşıklık gibi sınırlılıkları bulunmaktadır. Bu nedenle elektrokimyasal arıtma, bağımsız bir “tek proses çözümü” olarak değil; atıksu matrisine göre kurgulanan, prosesler arası tamamlayıcılığı dikkate alan ve reaktör–elektrot–enerji dengesini birlikte değerlendiren bir sistem tasarımı problemi olarak ele alınmalıdır. Bu çalışmanın temel sonucu, petrokimyasal ve üretilmiş suların elektrokimyasal arıtımında gelecekteki başarının yeni bir prosesin tek başına geliştirilmesinden çok, matris odaklı, enerji açısından gerçekçi, yan ürün oluşumunu kontrol edebilen ve hibrit entegrasyona dayalı arıtma mimarilerinin geliştirilmesine bağlı olduğudur.

Gelecek çalışmalarda elektrokimyasal arıtma proseslerinin yalnızca giderim yüzdeleri üzerinden değerlendirilmesi yerine, giderimin hangi mekanizma ile gerçekleştiği, gerçek mineralizasyon sağlayıp sağlamadığı, yan ürün üretilip üretilmediği ve enerji açısından uygulanabilir olup olmadığı birlikte ele alınmalıdır. Özellikle yüksek tuzluluklu petrokimyasal ve üretilmiş su matrislerinde aktif klor türlerinin oluşumu nedeniyle klorat, perklorat, trihalometan, haloasetik asit ve AOX gibi yan ürünlerin düzenli biçimde izlenmesi gerekmektedir. Bu nedenle KOİ giderimi tek başına yeterli bir gösterge olarak kullanılmamalı; TOC giderimi, toksisite testleri, biyobozunabilirlik indeksi, yan ürün analizi ve özgül enerji tüketimi gibi göstergelerle birlikte raporlanmalıdır. Ayrıca literatürde hâlen çok sayıda çalışma sentetik veya basitleştirilmiş model çözeltiler üzerinden yürütüldüğünden, gerçek rafineri, petrokimyasal ve üretilmiş su örnekleriyle yapılan deneysel çalışmaların artırılması önem taşımaktadır. Proses tasarımında ise tekil EO, EF veya EC uygulamalarından çok, matrisin baskın özelliklerine göre kurgulanan ardışık ve hibrit sistemlere öncelik verilmelidir. Örneğin yağ, askıda katı madde ve kolloidal yükü yüksek atıksularda EC ön arıtım basamağı olarak konumlandırılabilir; biyolojik olarak parçalanabilir fraksiyonlar için biyolojik sistemler devreye alınabilir; refrakter organiklerin giderimi için ise EO veya EF son arıtım basamağı olarak kullanılabilir. Bununla birlikte hibrit sistemlerin yalnızca verim açısından değil, enerji tüketimi, kimyasal sarfıyatı, çamur yönetimi, elektrot ömrü ve işletme maliyeti açısından da değerlendirilmesi gerekir. Elektrot malzemesi seçimi, reaktör geometrisi, elektrot aralığı, akım yoğunluğu, pH ve karıştırma koşulları gibi parametrelerin birbirinden bağımsız değil, etkileşimli değişkenler olduğu dikkate alınmalı; bu nedenle klasik tek-parametre optimizasyonu yerine çok değişkenli deney tasarımları, modelleme yaklaşımları ve gerektiğinde makine öğrenmesi destekli optimizasyon yöntemleri kullanılmalıdır. Pilot ölçekli ve sürekli akışlı sistemlerin sayısı artırılmalı; laboratuvar ölçeğinde elde edilen performansların endüstriyel ölçekte korunup korunamayacağı özellikle kütle transferi, akım dağılımı, pasivasyon ve uzun dönem elektrot stabilitesi açısından test edilmelidir. Son olarak da elektrokimyasal arıtma teknolojilerinin sürdürülebilirliği yalnızca teknik başarı üzerinden değil, çevresel güvenlik ve ekonomik uygulanabilirlik üzerinden de değerlendirilmelidir. Bu doğrultuda gelecek araştırmaların, “en yüksek giderim verimi” hedefinden ziyade, “en düşük enerji tüketimiyle, en az yan ürün oluşturan, en kararlı ve matrise en uygun entegre sistem tasarımı” hedefi doğrultusunda planlanması daha gerçekçi ve uygulanabilir sonuçlar sağlayacaktır.

Kaynaklar

- Abdulgani, I., Escalona-Durán, F., de Araújo, D. M., dos Santos, E. V., Segundo, I. D. B., & Martínez-Huitle, C. A. (2022). The role of saline-related species in the electrochemical treatment of produced water using Ti/IrO₂-Ta₂O₅ anode. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 910, 116163.
- Abuduaini, R., Achagri, G., He, Y. L., Chen, Z., Aini, D., Halik, Ü., ... & Kadier, A. (2025). Treatment of wastewater from the petrochemical industry by a solar-powered electrocoagulation process: optimization of crucial operating parameters using response

- surface methodology. *Environmental Science: Water Research & Technology*, 11(7), 1704-1719.
- Abuduaini, R., Chen, Z., He, Y. L., Achagri, G., Wu, J., Halik, Ü., ... & Kadier, A. (2026). Enhanced pollutant removal from real petrochemical wastewater by the combination of solar-powered electrocoagulation and plant-based coagulants: Optimization and mechanistic study. *Cleaner Water*, 100217.
- Ahmadi, A., Qanat, O., Seyed Dorraji, M. S., Rasoulifard, M. H., & Vatanpour, V. (2017). Investigation of antifouling performance a novel nanofibrous S-PVDF/PVDF and S-PVDF/PVDF/GO membranes against negatively charged oily foulants, *Journal of Membrane Science*, 536, 86-97.
- Al-Ameri, W., Elhassan, A., & Maher, R. (2023). Optimization of electro-oxidation and electro-Fenton techniques for the treatment of oilfield produced water. *Water and Environment Journal*, 37(1), 126-141.
- Alturki, S. F., Suwaed, M. S., Ghareeb, A., AlJaberi, F. Y., & Hassan, A. A. (2024). Statistical analysis and optimization of mechanical-chemical electro-Fenton for organic contaminant degradation in refinery wastewater. *Journal of Engineering Research*.
- Becker, J. R. (2000). *The biological removal of phosphorus at the Clark County Sanitation District wastewater treatment plant*. University of Nevada, Las Vegas.
- Brillas, E., & Martínez-Huitle, C. A. (2015). Decontamination of wastewaters containing synthetic organic dyes by electrochemical methods. An updated review. *Applied catalysis b: environmental*, 166, 603-643.
- Brillas, E., Sirés, I., Arias, C., Cabot, P. L., Centellas, F., Rodríguez, R. M., & Garrido, J. A. (2005). Mineralization of paracetamol in aqueous medium by anodic oxidation with a boron-doped diamond electrode. *Chemosphere*, 58(4), 399-406.
- Chabani, M., Bouafia-Chergui, S., & Touil, A. (2024). Removal of chemical oxygen demand from real petroleum refinery wastewater through a hybrid approach: Electrocoagulation and adsorption. *Chemical Engineering and Processing-Process Intensification*, 196, 109680.
- Comninellis, C., & Chen, G. (Eds.). (2010). *Electrochemistry for the Environment* (Vol. 2015, p. 859). New York: Springer.
- Dallbauman, L., & Sirivedhin, T. (2005). Reclamation of produced water for beneficial use. *Separation science and technology*, 40(1-3), 185-200.
- de Aguiar Pedott, V., Della Rocca, D. G., Weschenfelder, S. E., Mazur, L. P., Gonzalez, S. Y. G., de Andrade, C. J., & Moreira, R. F. (2024). Principles, challenges and prospects for electro-oxidation treatment of oilfield produced water. *Journal of Environmental Management*, 370, 122638.
- Dehboudeh, M., Dehghan, P., Azari, A., & Abbasi, M. (2020). Experimental investigation of petrochemical industrial wastewater treatment by a combination of integrated fixed-film activated sludge (IFAS) and electro-Fenton methods. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 8(6), 104537.
- Druskovic, M., Vouk, D., Bolanca, T., & Posavcic, H. (2022). The influence of pretreatment on the efficiency of electrochemical processes in oily wastewater treatment. *Water*, 14(19), 2976.
- El-Desoky, H. S., Ghoneim, M. M., El-Sheikh, R., & Zidan, N. M. (2010). Oxidation of Levafix CA reactive azo-dyes in industrial wastewater of textile dyeing by electro-generated Fenton's reagent. *Journal of hazardous materials*, 175(1-3), 858-865.
- Fatehbasharhad, P., Aliasghari, S., Bazargan, A., & Moftakhari Anasori Movahed, S. (2021). Removing sulfide from spent caustic petrochemical wastewater with electro-Fenton treatment. *Journal of Applied Water Engineering and Research*, 9(4), 315-323.

- Feizi, R., Khavari Kashani, M. R., Jaafarzadeh, N., Varank, G., Bazipur, F., & Ghanbari, F. (2023). The combination of electrocoagulation and enhanced electrooxidation for the treatment of petrochemical wastewater: biodegradability studies. *Water, Air, & Soil Pollution*, 234(12), 777.
- Huggins, R. G., Drewes, J. E., Cath, T. Y., & Johnson, L. W. (2009, January). Evaluation of a Full Scale Hybrid Sequencing Batch/Membrane Bioreactor for Onsite Treatment of Domestic Wastewater. In *WEFTEC 2009* (pp. 6918-6928). Water Environment Federation.
- Ibrahim, M. H., Moussa, D. T., El-Naas, M. H., & Nasser, M. S. (2020). A perforated electrode design for passivation reduction during the electrochemical treatment of produced water. *Journal of water process engineering*, 33, 101091.
- Jasim, M. A., & AlJaberi, F. Y. (2023). Removal of COD from real oily wastewater by electrocoagulation using a new configuration of electrodes. *Environmental Monitoring and Assessment*, 195(6), 651.
- Jiad, M. M., & Abbar, A. H. (2023). Treatment of petroleum refinery wastewater by an innovative electro-Fenton system: Performance and specific energy consumption evaluation. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 8, 100431.
- Joag, S., Kiesewetter, J., & Chellam, S. (2024). Electrode corrosion, pH, and dissolved oxygen dynamics, and hardness/silicon removal during aluminum electrocoagulation of hypersaline produced water. *ACS ES&T Engineering*, 5(1), 86-102.
- Khorram, A. G., Fallah, N., Nasernejad, B., Afsham, N., Esmaelzadeh, M., & Vatanpour, V. (2023). Electrochemical-based processes for produced water and oily wastewater treatment: A review. *Chemosphere*, 338, 139565.
- Li, H., Kuang, X., Qiu, C., Shen, X., Zhang, B., & Li, H. (2020). Advanced electrochemical treatment of real biotreated petrochemical wastewater by boron doped diamond anode: performance, kinetics, and degradation mechanism. *Water Science and Technology*, 82(4), 773-786.
- Martínez-Huitle, C. A., & Brillas, E. (2009). Decontamination of wastewaters containing synthetic organic dyes by electrochemical methods: a general review. *Applied Catalysis B: Environmental*, 87(3-4), 105-145.
- Matheswaran, M., & Raju, T. (2010). Destruction of methylene blue by mediated electrolysis using two-phase system. *Process Safety and Environmental Protection*, 88(5), 350-355.
- McGhee, T. J., & Steel, E. W. (1991). *Water supply and sewerage* (Vol. 6). New York: McGraw-Hill.
- Mirshafiee, A., Nourollahi, M., & Shahriary, A. (2024). Application of electro oxidation process for treating wastewater from petrochemical with mixed metal oxide electrode. *Scientific Reports*, 14(1), 1760.
- Mohamed, Y. E., El-Gayar, D. A., Amin, N. K., & El-Ashtouky, E. S. (2026). Process modeling and sludge characterization of electrocoagulation for the removal of oil-in-water emulsions and calcium from petroleum refinery wastewater. *Scientific Reports*.
- Mollah, M. Y., Morkovsky, P., Gomes, J. A., Kesmez, M., Parga, J., & Cocke, D. L. (2004). Fundamentals, present and future perspectives of electrocoagulation. *Journal of hazardous materials*, 114(1-3), 199-210.
- Naser, G. F., Mohammed, T. J., & Abbar, A. H. (2023). Optimization of chemical oxygen demand removal from petroleum refinery wastewater by electrocoagulation using tubular electrochemical reactor with a novel design. *Desalination and Water Treatment*, 281, 204-216.
- Oturan, M. A., & Aaron, J. J. (2014). Advanced oxidation processes in water/wastewater treatment: principles and applications. A review. *Critical reviews in environmental science and technology*, 44(23), 2577-2641.

- Pahlevani, L., Mozdianfar, M. R., & Fallah, N. (2020). Electrochemical oxidation treatment of offshore produced water using modified Ti/Sb-SnO₂ anode by graphene oxide. *Journal of Water Process Engineering*, 35, 101204.
- Panizza, M., & Cerisola, G. (2009). Direct and mediated anodic oxidation of organic pollutants. *Chemical reviews*, 109(12), 6541-6569.
- Radjenovic, J., & Sedlak, D. L. (2015). Challenges and opportunities for electrochemical processes as next-generation technologies for the treatment of contaminated water. *Environmental science & technology*, 49(19), 11292-11302.
- Renou, S., Thomas, J. S., Aoustin, E., & Pons, M. N. (2008). Influence of impact assessment methods in wastewater treatment LCA. *Journal of cleaner production*, 16(10), 1098-1105.
- Sandhwar, V. K., Saxena, D., Verma, S., Garg, K. K., & Prasad, B. (2021). Comparison of COD removal from petrochemical wastewater by electro-Fenton and electro oxidation processes: optimization and kinetic analyses. *Separation Science and Technology*, 56(13), 2300-2309.
- Tawabini, B., & Basaleh, A. (2025). Treatment of produced water using a pilot-scale advanced electrochemical oxidation unit. *Molecules*, 30(6), 1272.
- Tellez, G. T., & Nirmalakhandan, N. (1992). Bioreclamation of oilfield produced wastewaters: characterization and feasibility study. In *Produced Water: Technological/Environmental Issues and Solutions* (pp. 523-533). Boston, MA: Springer US.
- Treviño-Reséndez, J., Razo-Negrete, M., Godínez, L. A., Meas, Y., & García-Espinoza, J. D. (2025). Integrated system of electrocoagulation, activated sludge, and electrooxidation for the treatment of oil refinery wastewater. *Chemical Engineering and Processing-Process Intensification*, 208, 110135.
- Yang, K., Abu-Reesh, I. M., & He, Z. (2023). Formation of oxidation byproducts during electrochemical treatment of simulated produced water. *Journal of Hazardous Materials*, 460, 132469.
- Zhao, B., Liu, Y., Zhang, H., Li, S., Ma, G., Zhang, S., ... & Zhu, Z. (2023). In-situ activation of Fe₇₈Si₉B₁₃ metallic glasses for electro-Fenton degradation of industrial oily wastewater. *Sustainable Materials and Technologies*, 35, e00539.