



SU VE ATIKSU ARITIMINDA ELEKTROFLOTASYON PROSESİ

Fuat ÖZYONAR^{1,*} 

¹ Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, 58140, Sivas, Türkiye

ÖZET

Flotasyon prosesi madencilik endüstrisinde mineral zenginleştirmede uygulanan yerçekimi kuvveti yardımıyla gerçekleşen bir ayırma (yüzdürme) işlemidir. Son yıllarda su ve atıksu arıtımında yaygın olarak kirleticilerin ayrımında kullanılmaktadır. Flotasyon prosesleri üretilen kabarcık metoduna göre isimlendirilir. Dağılmış-hava flotasyonu, çözülmüş-hava flotasyonu ve son yıllarda elektrokimyasal arıtma proseslerinden biri olan elektroflotasyon (Ef) prosesi örnek flotasyon prosesleri olarak verilebilir. Bu çalışmada literatür araştırması yapılarak, Ef prosesinin ağır metal, organik ve inorganik kirleticilerin, yağ ve ürünlerinin, boyar maddelerin, deterjanların, vb. kirleticilerin su ve atıksudan gideriminde uygulanması ile elde edilen sonuçlara odaklanılmıştır. Bu çalışmaların sonuçlarına göre; Ef prosesinin sağladığı bazı avantajlar sayesinde su ve atıksu arıtımında ve suyun geri kazanımında tatmin edici sonuçlar elde edilmiştir.

Anahtar kelimeler: Elektroflotasyon, Flotasyon, Ayırma, Su ve atıksu arıtımı.

ELECTROFLotation PROCESS IN WATER AND WASTEWATER TREATMENT

ABSTRACT

The flotation process is a gravitational separation (flotation) process applied at mineral processing in mine industries. In recent years, water and wastewater treatment is widely used in the separation of pollutants. Flotation processes are named according to the bubble method produced. Dispersed-air flotation, dissolved-air flotation and electroflotation (Ef) process, which is one of the electrochemical treatment processes in recent years, can be given as sample flotation processes. In this study, literature research was conducted and the results obtained by applying Ef process in the removal of heavy metal, organic and inorganic pollutants, oil and products, dyes, detergents, etc. from water and wastewater were focused on. In the results of these studies, some advantages of electroflotation process have provided satisfactory results in water and wastewater treatment or water recovery.

Keywords: Electroflotation, Flotation, Separation, Water and wastewater treatment.

1. GİRİŞ

Flotasyon (yüzdürme) bir sıvı fazdan katı ve sıvı partikülleri ayırmak için kullanılan bir işlemdir. Flotasyon prosesi özellikle madencilik ve sanayi hammadde ilişkisinde dünya ekonomisine önemli katkılarda bulunmaktadır. Flotasyon prosesinde ayırma işlemi sıvıda oluşturulan gaz kabarcıkları ile gerçekleştirilmektedir. Ayrıca eklenen surfaktanlar ile sulu çözeltiden giderilmek ya da ayrılmak istenen maddeler gaz kabarcıkları vasıtasıyla sudan ayrılmaktadır. Bu gaz kabarcıklarına yapışan ve yüzdürme kuvveti artan parçacıklar içindeki sıvıdan daha ağır olsalar da su yüzeyine çıkabilirler. Böylelikle sıvı fazdan kolaylıkla ayrılabilirler [1, 2, 3, 4].

Bugün dünya genelinde birçok endüstride flotasyon prosesleri kullanılmaktadır. Örneğin madencilikte metal kazanımında, su ve atıksu arıtımında ve atıksuyun geri kullanımı gibi uygulamalarda kullanılmaktadır. Kullanılan flotasyon yöntemlerine alternatif olarak son yıllarda su ve atıksu arıtımında yaygın bir araştırma konusu olan elektrokimyasal proseslerden biri olan elektroflotasyon (Ef) prosesi göze çarpmaktadır. Bu süreçte sıvı içerisinde oluşturulan gaz kabarcıkları suyun elektrolizi ile oluşturulmaktadır. Ef yöntemi gaz, sıvı ve katı kirleticilerin buldukları yerlerde uygulanabilmekte ve çeşitli türde endüstriyel üniterlerden oluşan kirleticilerin minerilazasyonunda, arıtımında ve uzaklaştırılmasında yeni bir proses olarak kullanılmaktadır. Bu yöntemin sağladığı bazı avantajlar şu şekilde sıralanabilir; ana reaktif maddesinin elektron olması, elektrokimyasal işlemler neticesinde yeni ürünlerin oluşması ve/veya ortamdaki kirleticilerin giderilmesi veya zararsız hale dönüşmesini sağlayarak çevrenin dengesinin bozulmasını engellemektedir. Elektrokimyasal işlemler yüksek elektron verimi ile nitelendirildiğinden ve kimyasalların eklenmesi genellikle gerekli olmadığından, kimyasal olarak bu işlem yeşil kimya olarak sınıflandırılmıştır [1].

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: fozyonar@cumhuriyet.edu.tr
 Geliş / Received: 29.11.2019 Kabul / Accepted: 19.05.2020 doi: 10.28948/ngmuh.653062

Yeşil kimya kriterlerinin başında, kimyasal madde eklenmemesi, yüksek atom verimi, işlem basitliği, mevcut malzemelerin uygulanması ve çevresel kabulü gelmektedir [1].

Ef prosesi genel olarak yalnız başına değil de diğer elektrokimyasal prosesle birlikte kullanılmaktadır. Katot ve anot elektrotlarından açığa çıkan gaz kabarcıklarının (H_2 , O_2) kirleticileri adsorbe ederek yüzeye çıkarması ile kirleticinin ortamdan ayrılması esasına dayanan bir prosestir. Elektrokoagülasyon (EC) prosesi süresince gerçekleşen ve flotasyon (yüzdürme) metodu olarak anılmaktadır. Elektroflotasyon prosesinde flotasyon gereği olarak eklenmesi gereken gaz, elektroliz sonucu belli bir ölçüde suyun indirgenmesi ile gerçekleşmektedir [3, 4].

Ef yönteminin endüstriyel uygulamalarda çok fazla kullanım alanı olmamasına rağmen literatürde çok çeşitli atıksu ve suyun arıtımında, hatta maden zenginleştirmede uygulanan laboratuvar ölçekli çalışmalara rastlanmaktadır. Bu prosesin geliştirilmesi ve büyük ölçekli kullanımının uygun hale getirilmesi için konuyla ilgili daha çok araştırmaya ihtiyaç vardır. Bu kapsamda, çalışma dâhilinde, Ef yönteminin mekanizması, uygulandığı atıksu tip ve özellikleri ayrıntılı bir biçimde değerlendirilerek, prosesin avantaj ve dezavantajları irdelenip; ileride konu ile ilgili yapılacak çalışmalara yol göstermesi açısından önemli bir kaynak olacağı düşünülmektedir.

1.1 Elektroflotasyon Prosesinin Mekanizması

Ef prosesi suyun elektroliz ile üretilen oksijen ve hidrojen gaz kabarcıklarının sudan ayrılması ile atıksudaki kirleticilerin ayrılmasını sağlayabilir. Şekil 1'de Ef prosesinin mekanizması şematik olarak gösterilmiştir. İnert elektrot malzemesi kullanılarak kirlenmemiş bir suyun elektrolizinde aşağıdaki reaksiyonlar gerçekleşebilir[2, 3, 4, 5, 6];

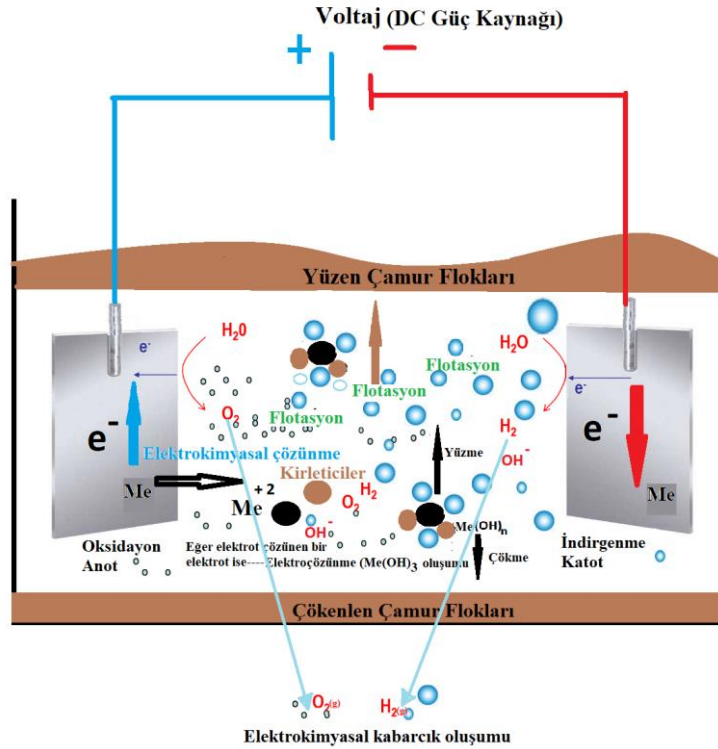
Katotta;



Anotta;



Genel Redoks Reaksiyon;

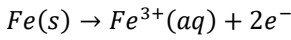
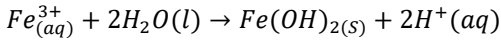


Şekil 1. Elektroflotasyon prosesinin mekanizması ve şematik görünüşü.

SU VE ATIKSU ARITIMINDA ELEKTROFLOTASYON PROSESİ

Eğer su içerisinde çeşitli safsızlıklar varsa kimyasal reaksiyon sonucu başka gazlar oluşabilir. Örneğin su içerisinde klor (Cl) varlığında anotta klor gazı (Cl₂) kabarcıkları oluşabilir. Ef'da kabarcıklar, elektroliz ile genellikle atıksuyun kendi iletkenliği ya da gerekli görüldüğü durumlarda ise yardımcı bir elektrolit katkısı ile üretilirler. Elektrotlarda üretilen kabarcıklar çok küçük ve uniformdurlar. Buna ilaveten çok yavaş bir şekilde yükselirler [2, 3, 7]. Küçük olan kabarcıkların askıda kalma kabiliyetlerinin büyük olanlara göre daha düşük olması nedeniyle, bunların yüzeye doğru hareketleri büyük kabarcıklara göre daha yavaştır. Bu olgu, onların yağ damlacıkları vb. maddelerle çarpışma ihtimallerini artırır [3]. Su ve atıksuda çözünmemiş halde bulunan maddelerin ortamdan uzaklaştırılması için; çökeltme, koagülasyon/flokülasyon (pıhtılaştırma/yumaklaştırma) gibi proseslerden biri flotasyondan önce uygulanmalıdır.

Elektrot olarak çözünen bir metal kullanıldığında demir ve alüminyum gibi suda metal hidroksit flokları oluşabilir. Bu da kirleticilerin gideriminde oldukça yararlı olan Me(OH)₃ floklarıdır [4, 5, 6].

Anotta:**Katotta:****Genel Redoks Reaksiyon;**

Ef prosesinde hedef, kirletici küçük partiküllere sahip süspansiyonlar ve yağ emülsiyonlarıdır. Ef işleminde, taneciklerin yükü ve kararlılığı, dengeyi etkileyen önemli bir faktör olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu amaçla Ef uygulanmasında önce, emülsiyonlar ve benzeri kirleticilerin kararlı yapılarının bozulması ve sistemin kararlı halden uzaklaştırılması verim açısından son derece önemlidir [1, 2, 3].

Elektrolitik olarak üretilmiş kabarcıkların yüklerinin ve boyutlarının elektrot türünden etkilendiği bilinmektedir. Maksimum flotasyon hızına, kabarcık ve partiküllerin zeta potansiyelleri, zıt işarete sahip olduğu zaman erişilebilmektedir [3, 4, 5]. Kabarcık boyutunu etkileyen parametreler arasında ortamın pH değeri, akım yoğunluğu, sıcaklık, elektrot malzemesi ve elektrot bağlantı tipi gibi pek çok faktörün etkisi olmasına rağmen bunlar arasında en etkili olanlar elektrot malzemesi ve ortamın pH'ıdır. [2, 3, 4, 5]. Alkali şartlarda ve katottan küçük kabarcıklar, asidik çözeltilerde ise anottan gaz oluşumları gerçekleşmektedir. Kabarcık yoğunluğunun artması kabarcıkların çarpışma, toplanma ve uzaklaşma olasılığını artırır. Ayrıca küçük kabarcıklar, daha yüksek yüzey/hacim oranına sahip olmaları nedeniyle, kabarcık ve kirletici parçacıkları arasında daha büyük bir toplam yüzey etkileşimi meydana getirir [2, 3].

Kimyasal arıtma yöntemi olarak iyi bir alternatif olan Ef prosesinde, kabarcık boyutu ve miktarı uygulanan elektrik potansiyeli/akım değiştirilerek kolaylıkla yapılabilir. Atıksuya pıhtılaştırıcı ve yumaklaştırıcı kimyasalların eklenmesini içeren kimyasal prosesler, hem pahalı hem de geri kazanılamayan çamur üretmektedir. Buna karşılık elektrokimyasal yöntemlerin çoğu ve Ef prosesi kimyasal madde eklemesi gerekmeden uygulanabilen çevreci arıtma proseslerindedir.

1.2. Elektroflotasyon Prosesine Etki Eden Parametreler**1.2.1 Elektrot materyali**

Elektrokimyasal arıtmanın türünü ve verimini belirleyen en önemli parametre elektrot türüdür. Elektrokimyasal arıtmada olduğu gibi elektroflotasyonda da performans ve istenilen verim, kullanılan elektrot malzemesine bağlıdır. Anotta kullanılan elektrotlar genel olarak inert ve aktif olarak iki kategoride ele alınabilir. İnert elektrotlar oksijen oluştururken, aktif elektrotlar ise elektroliz ile çözünürler ve bu elektrotların oksijen kabarcıkları oluşturma potansiyelleri düşüktür [4, 5]. Metal, karbon, grafit malzemeler ve metallerin oksitleri gibi iletken metal bileşikleri ve yarı iletkenler ile metaller içerisinde platin ve altın, hem bazik hem de asidik çözeltilere uygulanabilir özelliklere sahiptir [6, 7]. Platin, titanyum, platin-iridyum, titanyum-talanyum, titanyum-kalayoksit vb. elektrotlar; korozyona karşı dirençli homojen fizikokimyasal özellikler göstermelerine rağmen, pahalı olmaları, bu tür elektrotların kullanımını sınırlamaktadır [8, 9].

Son yıllarda inert elektrotlar, genellikle çeşitli metallerin üzerlerine kaplanarak çeşitli türlerde üretilmektedir. Bu elektrotlar çoğunlukla titanyum üzerine kaplanmaktadır. Titanyum üzerine kaplanan metaller; Pb, Sb, Zr, Sn, Ta ve Ru gibi metal oksit türleri olabilir [8]. Bu elektrotlar ile ilgili literatürde yapılmış çalışmalarda; yağlı atıksuların arıtmada PbO₂-Ti elektrotlar [10],

F. Özyonar

radyoaktif atıksuların arıtımında RuO₂-Ti elektrotlar [9], seramik üretim tesisi atıksularının arıtımında Ti-TiO₂ elektrotlar [11], sızıntı suyunun arıtımında Ti-RuO₂ elektrotlar kullanılmıştır [12].

Elektrokimyasal arıtmada aktif yani çözünen elektrotlar olarak, en yaygın Al ve Fe elektrotlar kullanılmaktadır. Bu elektrotlar elektroliz sonucu çözünerek çözeltiye Al³⁺ ve Fe²⁺, Fe³⁺ iyonları bırakmaktadır. Bu iyonlar suda elektroliz sonucu oluşan hidroksil iyonları ile birleşerek çok az çözünebilir Al(OH)₃, Fe(OH)₂ ve Fe(OH)₃ gibi metal hidroksit formları oluşturmaktadır. Elektrokoagülasyon anında oluşan metal hidroksit partiküllerinin adsorbsiyon özellikleri çok yüksektir. Elektrokimyasal reaksiyonlar sonucu koagülasyonu gerçekleştiren koagülant maddeler (Fe ve Al gibi), atıksularda bulunan askıda ve kolloid maddeleri, diğer kirleticileri ve suda çözünmüş iyonları (anyon-kasyon) kendilerine doğru çekerek metal hidroksit floklarına hapsederler. Oluşan metal hidroksit flokları çökelmekte veya Ef ile oluşan gaz kabarcıkları yardımıyla su yüzeyine taşınmaktadır. Bu yöntemle, tekstil atıksuları [13, 14], mezbahane atıksuları [5, 15], evsel atıksular [16], metal kesim atıksuları [17], çamaşırhane atıksuları [18], metal giderimi (Cd, Cr, Cu Mn, Pb, Zn gibi.) [19, 20, 21, 22] kolloid ve süspansiyon partikül giderimi [23, 24], yağ ve gres giderimi [25] ile ilgili çalışmalarda yüksek kirletici giderme verimleri elde edilmiştir.

1.2.2 Akım yoğunluğu

Ef prosesinde akım yoğunluğu, reaksiyon oranının kontrolünde önemli sistem parametrelerinden birisidir. Ef prosesinde akım yoğunluğu doğrudan kontrol edilebilir tek işletme parametresidir [26, 27, 28, 29]. Akım yoğunluğu elektrokimyasal proseslerde koagülant dozajını, kabarcık üretim hızını, flok boyutu ve büyüklüğünü belirler. Bunlar elektrokimyasal proseslerin arıtma verimliliğini belirleyen etkilere [27].

Faraday yasasına göre, Eşitlik 7’de verildiği gibi elektrotlardan açığa çıkan gazın (H₂ ve O₂) veya metal iyonun (Al veya Fe gibi aktif metal) kütlesi C_m (g); uygulanan elektrik akımı I (A) ve elektroliz süresi t (sn veya sa) ile doğru orantılıdır. Burada M_w elektrotun molekül ağırlığı (g/mol), z transfer edilen elektron sayısı, F Faraday sabitidir (96500 C/mol) ve θ arıtılan su/atıksu miktarıdır (m³).

$$C_m = \frac{I \times t \times M_w}{z \times F \times \theta} \quad (7)$$

Sonuç olarak, uygulanan akım/akım yoğunluğu çözelti içerisinde gerçekleşen elektrokimyasal reaksiyonları kontrol eder. Elektrotların çözünme hızı, kabarcık oluşum miktarı ve büyüklüğü gibi parametreler akım yoğunluğuna bağlıdır. Bununla birlikte sürenin ve akım miktarının artması, enerji tüketimini orantılı olarak artırır [30, 31]. Bazı araştırmacılar yaptıkları çalışmalarda, Ef prosesiyle kabarcık boyutunun akım yoğunluğu ile arttığını rapor etmişlerdir. Ancak bazı çalışmalarda [32, 33] ise akım yoğunluğunun artmasıyla küçük kabarcıkların birbirleriyle birleşerek kendilerinden daha büyük kabarcıklara dönüştüğü ifade edilmiştir. Bu da kabarcık yüzey alanını azalttığı için verim düşüşüne neden olmaktadır. Dolayısıyla, deneysel çalışma ile bir optimum akım yoğunluğuna bağlı olarak kabarcık boyutu verim ilişkisi kurulmalıdır [34].

Genel olarak elektrokimyasal proseslerde olduğu gibi Ef prosesinde de doğru akım kullanılır [35, 9]. Ancak doğru akımın kullanılması, elektrotların yüzeyinde zamanla oksit katmanların, kirleticilerin ve elektrokimyasal reaksiyon sonucu oluşan bazı maddelerin (özellikle katot) birikmesine yol açmakta ve bu da anodik ve katodik elektrot yüzeyinde bir izolasyonun oluşmasına sebep olmaktadır. Bu olaydan dolayı elektrotlar pasif hale gelerek, elektroflotasyonun ve diğer elektrokimyasal proseslerin gerçekleşmesini sınırlar. Alternatif akımın kullanımı veya bir anot-katod değiştirici ile kutup değiştirmek pasifizasyonu sınırlayıp ortadan kaldırabilir [36, 37].

1.2.3 Başlangıç pH değeri

Çözeltinin pH’ı elektrokimyasal proseslerde önemli bir rol oynamaktadır. pH değeri; Ef prosesinde oluşan kabarcık formunu ve boyutunu etkiler. Ayrıca harcanan elektrot kullanıldığında oluşan metal hidroksit türleri de pH ile değişiklik gösterir. Araştırmacıların yaptıkları çalışmalarda, aynı elektrot malzemesi kullanılarak oluşturulan gaz kabarcıklarının, asidik koşullarla karşılaştırıldığında nötral ve bazik koşullarda daha küçük H₂ gaz kabarcıkları oluşturduğu gözlemlenmiştir [32, 33, 38]. Bu sebeplerden dolayı, Ef prosesinde oluşan H₂ ve O₂ kabarcıklarının büyüklüğü ve formu, optimum işletme koşullarının belirlenmesinde önemli rol oynayacağı için, genel bir pH değeri değil de su ve atıksu için uygun performans verimini sunan, çözelti pH değerinin belirlenmesi gerekmektedir.

1.2.4 Elektriksel iletkenlik

Çözeltinin elektriksel iletkenliği, EF prosesi üzerine etkisi olan diğer bir parametredir. Elektriksel iletkenlik, atık suyun iyonik gücü ile ilgilidir ve Ef işleminin enerji tüketimi üzerinde büyük bir etkiye sahiptir [14, 34, 38]. Destekleyici elektrolit, çözeltinin iletkenliğini artırarak direnç düşüşüne sebep olur ve elektrik tüketimini azaltır. Elektrik enerjisi harcaması (C_{enerji}); aşağıdaki denklemde verildiği gibi uygulanan elektrik voltajına, akıma ve zamana bağımlı olarak hesaplanmaktadır (Eşitlik. 8).

SU VE ATIKSU ARITIMINDA ELEKTROFLOTASYON PROSESİ

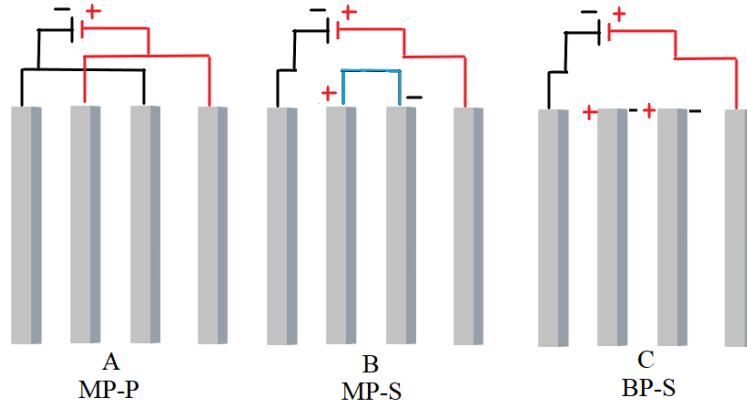
$$C_{enerji} = \frac{V \times I \times t_{ec}}{\vartheta} \quad (8)$$

Burada; V uygulanan voltaj, t_{ec} işletme süresi (sn veya sa), I akım (A) ve ϑ reaktördeki arıtılan su miktarıdır (m^3).

Bazı araştırmacılar, kullanılan destek elektrotlarının, elektrot yüzeyinde aşınmalara veya pasifizasyona neden olduğunu raporlamışlardır. Özellikle Cl anyonlu bir destek elektrotu kullanıldığında, elektrot yüzeyinde korozif özelliğinden dolayı bir aşınma meydana gelirken, enerji tüketimi daha düşük olmaktadır [38, 39, 40]. Ayrıca oluşan Cl_2 gazı organik kirletici ve dezenfektan özelliği göstermektedir. SO_4 anyonlu elektrolitler ise elektrot yüzeyinde belirli bir derişimden sonra birikimlere sebebiyet vererek pasifizasyona sebep olur [41]. Bu nedenle Ef prosesinde, enerji verimliliği ve elektrot performansı göz önüne alınarak, optimum elektriksel iletkenlik, çeşitli elektrolitler kullanılarak sağlanmalıdır.

1.2.5 Elektrot bağlantı türü

Ef prosesinde bağlantı türü sadece arıtma verimliliğini değil aynı zamanda enerji tüketim maliyetini de etkilemektedir. Elektrokimyasal proseslerde kullanılan en tipik bağlantı türleri; monopolar paralel (MP-P), monopolar seri (MP-S) ve bipolar seri (BP-S) bağlantı türleridir [42, 43]. Bu elektrot bağlantı düzenlemelerinin şematik gösterimi Şekil 2'de verilmiştir.



Şekil. 2. Elektroflotasyon hücrelerinde elektrot bağlantı türleri. (A) Monopolar paralel (B) Monopolar Seri ve (C) Bipolar Seri.

Monopolar elektrot düzenlemesinde, elektrotların her biri, elektrokimyasal hücredeki elektrik polaritesine bağlı olarak anot veya katot olarak çalışır. Şekil 2'den görüldüğü gibi her bir anot elektrot, monopolar paralel bağlantıda doğrudan anotta bağlanır, katotta hücreler de aynı şekilde doğrudan bağlanır. Monopolar seri bağlantıda ise iç elektrotlar dahili olarak birbirine bağlanırken, dışta kalanlar ise doğrudan anot ve katot elektrotuna bağlanır. Bipolar elektrot bağlantı türünde ise, monopolar olan dış elektrotlar dışında iç elektrotların her biri, önündeki elektrotun yüküne bağlı olarak yüklenir ve elektrot taraflarının her birinde farklı polarite gösterir. Bipolar bağlantı genellikle seri türde bağlanır. Bir seri bağlı elektrot düzenlemesi, aynı akımın tüm elektrotlar arasında dağıtılacağından dolayı devreyi tamamlamak için yüksek potansiyel farkına ihtiyaç duyacaktır. Dolayısıyla enerji gereksinimi artacaktır. Paralel bağlantıda ise elektrik akımı her bir elektrot arasında bölünmüştür. Bu da enerji tüketimi açısından bir avantaja neden olur. Bazı araştırmacılar da, elektrot bağlantı türünün elektrokimyasal arıtmada etkisini araştırmışlardır. Elde ettikleri sonuçlarda, MP-P bağlantı türünde diğer bağlantı türlerine göre yüksek giderme verimi ve düşük enerji tüketimi elde etmişlerdir [44, 45].

1.2.6 Elektrotlar arası mesafe

Elektrotlar arası mesafenin, anot ile katot arasında, direnç üzerinde doğrudan bir etkisi vardır. Ancak bu mesafe çok kısa olursa; koagülasyon, flotasyon ve çökme mekanizmalarını olumsuz yönde etkileyerek arıtım veriminin düşmesine sebep olur. Bu verim düşüşü, yüksek elektrostatik etkilenmeden dolayı, küçük parçacıkların çarpışmasını engelleyerek pıhtılaşma ile flok oluşumunu ve oluşan flokların çökmesini etkilemektedir [42]. Ayrıca çok fazla mesafe olması da flok oluşumunu azaltmaktadır. Dolayısıyla, en uygun mesafenin, flok oluşumu ve verim açısından bulunması gerekir [46, 47].

1.2.7 İşletme maliyetinin hesaplanması

Elektrokimyasal proseslerde işletme maliyeti, enerji harcamasını ve elektrot harcamasını dikkate alınarak hesaplanmaktadır. Enerji ve elektrot maliyetleri elektroflokasyon (Ef), elektrokoagülasyon (EC) ve elektrooksidasyon (EO) prosesleri için ayrı ayrı hesaplanabilir. Elektrot maliyeti, sadece elektrokoagülasyon prosesinde kullanılan demir ve alüminyum elektrotlar için, yani harcanan elektrotlar için hesaplanabilir. İşletme maliyeti \$/m³ arıtılmış atıksu olarak hesaplanmıştır [5, 15].

$$\text{İşletme maliyet EC, Ef veya EO} = A \times C_{\text{enerji}} + B \times C_{\text{elektrot}}$$

Burada C_{enerji}; m³ arıtılan atıksu başına harcanan kWh elektrik enerjisi ve C_{elektrot}; m³ arıtılan atıksu başına harcanan elektrot miktarıdır. A ve B; piyasadaki birim fiyat elektrik enerjisi veya elektrot değeridir. Enerji ve elektrot harcamaları, m³ arıtılan atıksu başına aşağıdaki eşitliklerden hesaplanmıştır [15].

$$C_{\text{enerji}} = \frac{V \times I \times t_{ec}}{\vartheta} \quad (9)$$

$$C_{\text{elektrot}} = \frac{I \times t_{ec} \times M_w}{z \times F \times \vartheta} \quad (10)$$

Burada V; uygulanan voltaj, t_{ec}; işletme süresi (saniye veya saat), I; akım (A), ϑ ; reaktördeki arıtılan su miktarı (m³), F; Faraday sabiti (96485 C/mol), M_w; Fe (56 g/mol) veya alüminyumun (27 g/mol) molekül ağırlığı ve z; elektron transfer katsayısıdır (Fe:2, Al: 3).

2. SU VE ATIKSU ARITIMINDA ELEKTROFLOTASYON PROSESİ UYGULAMALARI

2.1 Yağlı Atıksuların Arıtımı

Yağlı atıksuların arıtılmasında Ef prosesi tek kullanıldığı gibi çözülmüş ve askıda katı kirleticileri de gidermek için diğer proseslerle birlikte kullanılmaktadır. Esfandiyari ve diğ. [48], yaptıkları çalışmada, zeytinyağı atıksularının arıtımında RuO₂/Ti, Al-SS elektrotlarını kullanarak, pH 4, akım yoğunluğu 40 A/m², 1 g/L NaCl ve 30 dk elektroliz süresinde, KOİ %96, BOİ % 93,6, polifenol % 94,4, renk % 91,4, bulanıklık % 88,7, askıda katı % 97 ve yağ-gres % 97,1 değerinde giderme verimleri elde etmişlerdir. Yapılan diğer bir çalışmada, ham petrol tesisi atıksuların Ef prosesiyle arıtılmasında, Al elektrotlarının kullanıldığı kesikli işletilen bir reaktörde, 5V-0,4 A, 30 dk elektroliz süresinde ve pH: 4,72 koşullarında % 90 yağ-gres giderme verimi elde edilmiştir [49]. Carmona ve diğ. [50], yaptıkları çalışmada, sudan yağlı emülsiyonları gidermek için sürekli koşullarda Al elektrotları kullanarak, Ef prosesiyle 300 A/m² akım yoğunluğunda %99 yağ giderme verimi elde etmişlerdir. Alam ve diğ. [33], anot olarak Ti-İrO₂, katot olarak paslanmaz çeliğin kullanıldığı kesikli Ef reaktöründe, 150 A/m² akım yoğunluğunda %90 yağ giderimi sağlamışlardır. Yağlı atıksuların, Ef, EC ve Ef/EC prosesleriyle arıtımında, kirletici giderme ve proses işletme koşulları aşağıdaki Tablo 1'de özetlenmiştir.

Tablo 1. Yağlı suların arıtımında Ef, EC ve Ef/EC prosesiyle kirletici giderimi ve işletme koşulları.

Kirletici Kaynağı	Elektrot Materyali	İşletme Koşulları	Giderme Verimi (yağ-gres)	Referans
Yağ rafinerisi	Al-Al	2-35 mA/cm ² , 1,2-1,7 V, kesikli reaktörde	%60,0-99,5	[51]
Restoran Atıksuyu	Fe-Al	0,2-0,6 mA/cm ² , 1,3-15,5 V, sürekli reaktörde	%95,0-99,0	[52]
Sentetik Yağlı atıksu	SS -SS	6-14 mA/cm ² , kesikli reaktörde, 30-120 dk,	%99,0	[53]
Sızıntı Suyu	Ti/RuO ₂ -SS	10-40 V, sürekli reaktörde, 120 dk	%90,2	[54]
Sızıntı Suyu	Al-Al	0,0496 mA/cm ² , 60 dk, kesikli reaktörde	%95,0	[55]

* SS (Stainless Steel): Paslanmaz Çelik

2.2 Renkli ve Tekstil Atıksularının Arıtımı

Özellikle tekstil endüstrisinden kaynaklanan renkli atıksular, miktar ve kirletici konsantrasyonu açısından oldukça önemli bir yere sahiptir. Endüstriyel atıksuların %15-20'lik kısmını tekstil atıksuları oluşturmaktadır. Dünya genelinde, yaklaşık olarak her

SU VE ATIKSU ARITIMINDA ELEKTROFLOTASYON PROSESİ

yıl 1 milyon tona tekstil boyar maddesi kullanılmaktadır [56]. Ef prosesi, renkli atıksuların arıtımında EC prosesiyle birlikte yaygın olarak kullanıldığı literatür araştırmalarında görülmüştür. Özellikle oluşan metal floklarının, reaktör yüzeyine H₂ ve O₂ gazları ile taşınımının, arıtma verimini yararlı bir şekilde arttırdığı araştırmacılar tarafından rapor edilmiştir. Ef prosesi ile genel olarak, demir ve alüminyum elektrotları kullanılarak tekstil atıksuyu ya da sentetik boyar maddelerin giderimi yapılmıştır. Ögütveren ve diğ. [57], yaptığı çalışmada 4 dk gibi kısa bir sürede %100 boya giderme verimi elde etmişlerdir. Benzer bir çalışmada, Zaroual ve diğ. [58], demir elektrotları kullanarak kesikli bir reaktörde, 3 dk'lık elektroliz süresinde %100 renk ve %84 KOİ (Kimyasal oksijen ihtiyacı) giderme verimi elde etmişlerdir. Kobyay ve diğ. [59], yapmış oldukları çalışmada, reaktif tekstil boyar maddelerinin alüminyum elektrotları ile giderimini araştırmışlar ve akım yoğunluğu, başlangıç pH değeri, boyar madde konsantrasyonu, arıtma süresi ve işletme maliyeti gibi parametreleri incelemişlerdir. Çalışma sonucunda oluşan polimerikmetalhidroksit türlerinin, çökeltme ve flotasyon yardımıyla boyar madde giderimini sağladığını ifade etmişlerdir. Özellikle Ibanez ve diğ. [60], çalışmalarında, katotta oluşan H₂ gaz kabarcığının, kirletici maddeyi daha kolay konsantre edebileceği, toplayabileceği ve sudan uzaklaştırabileceğini ifade etmişlerdir. Fan ve diğ. [61], yaptıkları çalışmada; sürekli şartlarda (1-5 L/sa), 25-150 V bipolar bağlantı türünde ve grafit plaka elektrotlarının kullanıldığı Ef prosesinde, % 90- 95 arasında boya giderme verimi elde etmişlerdir.

Araştırmalarda İki ana mekanizmanın oluştuğu ifade edilmektedir. 6,5'ten yüksek pH değerlerinde genel olarak adsorpsiyon mekanizmasının ve 6,5 'ten düşük pH değerlerinde ise çökeltmenin olduğu araştırmacılar tarafından ifade edilmiştir [59, 62, 63].

Çökeltme**Adsorpsiyon**

Bu koşullar altında negatif yüklü boya molekülleri nötrale olurken, agregaların pozitif yüklenmesi, oluşan polimerik boya ve monomerik boya partiküllerinin Al(OH)₃ floklarına adsorpsiyonuna katkıda bulunur. Farklı boyar maddelerinin giderimi ile ilgili yapılan çalışmalar aşağıdaki Tablo 2'de sunulmuştur.

Tablo 2. Ef prosesiyle renk ve boya gideriminde kirletici giderim verimi ve işletme koşulları.

Kirletici Kaynağı	Elektrot Metaryali	İşletme Koşulları	Giderme Verimi	Referans
Boya (Eriochrome Black)	Al	7 V, pH 2-7, NaCl 2 g/L, 55 dk, Kesikli reaktörde	%98.5	[64]
Boya (Asidik Red ve Basic Violet)	Al	5 V, 1 A, 50 ml/dk, AC 5 V, 1 A, 30 ml/dk, AC	% 95,0 % 99,0	[65]
Boya (Asidik Red 14)	Al-SS	40 mA/cm ² , pH 7, Ec 3.600 µS/cm, 20 dk.	% 99,0	[66]
Boya (Yellow Sirius K-CF)	Al	7 V, pH 3, 60 dk, NaCl 1 g/L	%95,0	[67]
Boya (Red Nylosan)	Al-Fe	100 A/m ² , 15 l/sa, 2,54 mS/cm, 35 dk	%90,0	[68]

* SS (Stainless Steel): Paslanmaz Çelik

2.3 Ağır Metal ve Metalik Olmayan İnorganik Türlerin Su ve Atıksulardan Giderimi

Ağır metallerin oldukça toksik, mutajenik ve kanserojen özelliğe sahip kirleticiler olduğu ifade edilmektedir [69]. Ağır metal kirliliği her geçen gün etkisini artıran, buldukları ortamda biyolojik parçalanmaya uğramayan ve besin zincirinde biyolojik birikime katılan kirleticilerdir. Ağır metal kirliliğine sebep olan metal kaplama, maden zenginleştirme, batarya ve diğer endüstrilerin sayılarının veya kapasitelerinin artması bu kirliliğin artışına sebep olmaktadır. Ağır metallerin su ortamlarından uzaklaştırılması için yeni arıtma yöntemlerinin geliştirilmesi bu kirliliğin önlenmesinde oldukça önemli konulardandır.

Ef/EC prosesleri ağır metal içeren atıksuların/suların arıtımında uygulanmış ve araştırmacılar başarılı sonuçlar elde etmişlerdir. Vasudevan ve diğ. [70], yaptıkları çalışmada Al elektrotlar kullanarak kadmiyum giderimini artırmışlardır. MP-P bağlantı tipinde, pH 7, 2 A/m² akım yoğunluğunda, 20 mg/l Cd⁺² derişiminde 120 dk elektroliz süresinde %97,5 giderme verimi elde etmişlerdir. Kamaraj ve Vasudevan [71], sulu çözeltilerden stronsiyum ve sezyum giderimini araştırmışlardır. Yaptıkları çalışmada, farklı elektrot türleri ile giderme verimlerini araştırmışlardır. Çalışmada 5 mg/L sezyum derişimlerinde Mg-Zn, Al-Zn, Zn-Zn, Fe-Zn elektrot kullanarak sırasıyla %96.8, 92.4, 90.6, 90.0 giderim verim değerleri elde edilmiştir. Bu verimleri MP-P bağlantı türünde, pH 6.8, ve 0.8 A/m² ve 80 dk elektroliz süresinde çalışma yürütülmüştür. Stronsiyum giderim verimleri ise

F. Özyonar

aynı şartlarda %97.0, 95.2, 91.4 ve 89.6 olarak bulunmuştur. Escobar ve diğ. [72], yürüttükleri çalışmada sentetik olarak hazırlanan kirlenmiş sularda bakır giderimi, çelik elektrotlar kullanılarak araştırılmıştır. Çalışmada 6 dk elektroliz süresinde 54 A/m² de, %80 Cu giderme verimi elde etmişlerdir. Başka bir çalışmada, sentetik atıksudan çinko giderimi araştırılmış, platinyum ve çelik elektrotlarının kullanıldığı, sürekli bir reaktörde 2-12 mA/cm² akım yoğunluğunda ve 30-60 dk elektroliz süre aralığında %96 çinko giderimi sağlanmıştır [73]. Aşağıda verilen Tablo 3'te diğer araştırmacılar tarafından yapılan Ef, EC ve Ef/EC prosesleri ile yapılmış ağır metal giderim çalışmaları sunulmuştur.

Tablo 3. Ef, EC ve Ef/EC prosesiyle ağır metal gideriminde kirlenici giderim verimi ve işletme koşulları.

Kirlenici Kaynağı	Elektrot Materyali	İşletme Koşulları	Giderme Verimi	Referans
Maden Atık suyu (Antimon)	Al-Al	22 mA/cm ² , pH 2, BP-S, 60 dk,	%96,5	[74]
Sentetik (Arsenik ³ 0.05 mg/L)	Fe-Fe	28 mA/cm ² , pH 6.5, MP-P, 60 dk,	%74,5	[75]
Yeraltı suyu (Arsenik ⁵)	Fe-Fe	3 mA/cm ² , pH 7,22, BP-S, 0,5 dk	%92,3	[76]
Elektro kaplama atıksuyu (Krom ³)	Fe-Fe		%100	
	Al-Al	10 mA/cm ² , pH 3, MP-P, 60 dk.	%99,8	[77]
	Al-Fe		%100	
Batarya Endüstrisi atıksuyu (Çinko) (Kurşun)	Fe-Fe		%96,5	
	SS-SS	6 mA/cm ² , pH 2,8, MP-S, 40 dk.	%92,6	[78]
	Fe-Fe		%97,4	
	SS-SS		%91,4	
Sentetik (Amonyum, 50 mg/L)	Al-SS	16,7 mA/cm ² , pH 7, MP-P, 60 dk.	%99,0	[79]
Sentetik sulu çözeltilerden Siyanür 300mg/L (CN)	Fe-Fe		%87,0	
	Fe-Al	15 mA/cm ² , pH 11,5, MP-P, 20 dk	%93,0	[80]
	Al-Al		%35,0	
	Al-Fe		%32,0	
İçme suyu (Florür) 392 mg/L	Al-Al	17,1 mA/cm ² , pH 5, MP-P, 30 dk	%98,0	[81]
	Al-Fe		%60,0	
	Fe-Fe		%52,0	
	Al-Gr		%50,0	
	Al-Al	25 mA/cm ² , pH 7, MP-P, 60 dk	%45,0	[82]
	Fe-Gr		%35,0	
	Fe-Al		%36,0	
Sentetik sulu çözeltilerden (Fosfat 50 mg/L)	Gr-Al		%18,0	
	Gr-Fe		%16,0	
	Al-SS	16,7 mA/cm ² , pH 7, MP-P, 60 dk	%99,0	[83]
Sentetik sulu çözeltilerden (Sülfür 100 mg/L) (Sülfid 100 mg/L) (Sülfat 100 mg/L)	Fe-Fe	32 mA/cm ² , pH 7, MP-P, 15 dk	%99,0	[84]
			%85,0	
			%71,3	

*Gr: Grafit, * SS (Stainless Steel): Paslanmaz Çelik

2.4. Organik Türlerin Su ve Atıksulardan Giderimi

Organik kirleniciler; toksik, kanserojenik ve mutajenik özelliklerinin yapılan çalışmalarla ifade edilmesiyle, Dünya Sağlık Örgütü tarafından oldukça zararlı kirleniciler sınıflandırılmasına girerek rapor edilmiştir. Bu kirlenicilerin alıcı ortamlara

SU VE ATIKSU ARITIMINDA ELEKTROFLOTASYON PROSESİ

verilmeden uygun arıtma yöntemleri ile arıtılması gerekmektedir [85]. Elektrokimyasal arıtma prosesleri ile organik kirleticilerin giderilmesinde yüksek verim elde edildiği bazı araştırmacıların çalışmalarında rapor edilmiştir. Bu kirleticiler; aromatik birleşikler, pestisitler, humik maddeler, boyalar, fenolik birleşikler, ilaç etken ve kişisel bakım ürünleri gibi organik içerikli maddelerdir.

Can ve Bayramoğlu. [86], yaptıkları çalışmada, benzokinon gideriminde Al-SS elektrotlar kullanarak optimum çalışma şartlarında; pH 7.5, 2 mA/cm², MP-P bağlantı türünde ve 20 dk elektroliz süresinde %90 giderme verimi elde etmişlerdir. Bir başka çalışmada, karışık fenolik birleşiklerin (3,4,5-trimetoksibenzoik, 4-hidroksibenzoik, gallik, protokateşik, trans-sinamik ve veratrik asitler (her birinden 100 mg/L)) giderimi için Al-Al, Cu-Cu, Fe-Fe, Pb-Pb ve Zn-Zn gibi farklı elektrotların etkisini araştırmak için aynı işletme koşullarında; pH 3, akım yoğunluğu 11,9 mA/cm², elektroliz süresi 80 dk ve 1,5 g/L NaCl destek elektroliti ile sırasıyla; % 24,4, 12,0, 40,8, 23,7 ve 30 KOİ giderme verimleri elde edilmiştir [87]. Doğal organik maddelerin giderimi ile ilgili yapılan çalışmalarda da elektrokimyasal arıtma proseslerinin kullanıldığı görülmektedir. Ancak yapılan çalışmalarda suların iletkenliğinin düşük olması, zaman geçtikçe verim düşüşüne neden olduğu ifade edilmektedir [88, 89, 90]. Tablo 4'te Ef/EC prosesleri ile organik kirleticilerin giderim çalışmaları özet olarak verilmiştir.

Tablo 4. Ef/EC prosesiyle organik madde gideriminde kirletici giderim verimi ve işletme koşulları.

Kirletici Kaynağı	Elektrot Materyali	İşletme Koşulları	Giderme Verimi	Referans
Sulu çözeltilerden Naftalin sülfat 200 mg/L	SS-SS Al-SS Fe-SS Al-Al Fe-Fe	29 mA/cm ² , pH 7, MP-P, 1000 mg/L NaCl, 150 dk	%98,0 Naftalin Sülfat %66,0 KOİ %39,0 TOK %100 MP-S %100 MP-S %15,4 MP-S %10,8 MP-S	[91]
Sulu çözeltilerden 4-Nitrophenol 20 mg/L	Al-Fe Fe-Gr Gr-SS SS-Fe SS-SS SS-Gr	10 mA/cm ² , pH 9,300 mg/L NaCl, 10 dk	%16,3 MP-S %98,9 MP-S %74,4 MP-P %99,2 MP-P %99,6 MP-P %99,2 MP-P	[92]
Doğal Organik Madde (NOM:5.5 mgC/L)	Fe-Pt	1 mA/cm ² , pH 6, MP-P, 15 dk	%70,9	[93]
Doğal Organik Madde (NOM:15 mgC/L)	Al-SS Fe-SS	1.4 mA/cm ² , pH 6, MP-P, 12 dk	%79,0	[94]
Salisilik Asit (100 mg/L)	Al-Al	5 mA/cm ² , pH 6, MP-P, 10 dk, hava miktarı 2L/dk, 1000µs/cm.	%95,1	[95]
Sulu çözeltilerden Polyvinyl alcohol (100 mg/L)	Fe-Al Fe-Fe Al-Al Al-Fe	10 V, pH 6,5, MP-P, 100 mg/L NaCl, 120 dk.	%75,0 %53,0 %40,0 %31,0	[96]
Sulu çözeltilerden 4-Chlorophenoxyacetic acid (4-CPA) (200 mg/L)	Fe-Gr	10.0 mA/cm ² , pH 3, MP-P, 40 dk, 0,05M Na ₂ SO ₄ (peroksikoagulyasyon).	%100	[97]

*Gr: Grafit, * SS (Stainless Steel): Paslanmaz Çelik

2.5 Gerçek Değişik Endüstriyel Atıksuların Arıtımı

Gerçekte atıksu arıtma proseslerinin asıl amacı gerçek atıksulara bu sistemlerin uygulanmasında elde edilen verimlerdir. Bu amaçla arıtma proseslerinin gerçek amacı atıksu arıtımından elde ettikleri verimdir. Elektrokimyasal arıtma prosesleri ile gerçek atıksu çıkışlarına uygulanmasında değişik türdeki atıksular için oldukça tatmin edici neticeler alınmıştır. Tablo 5'te farklı atıksular için yapılmış Ef/EC çalışmaları özetlenmiştir.

Tablo 5. Ef/EC prosesiyle gerçek atıksuların arıtımında giderim verimi ve işletme koşulları.

Kirletici Kaynağı	Elektrot Materyali	İşletme Koşulları	Giderme Verimi	Referans
Tekstil atıksuyu	Al-Ti	30 mA/cm ² , 30 dk	%94,0 KOİ %92,0 TKM %98,0 Renk %70,0 Toksitide	[98]
Biyodizel Atıksu	Al-Gr	20,8 mA/cm ² , pH 6,1, MP-P, 23,5 dk	%55,4 KOİ	[99]
Sigara Endüstri Atıksuları	Fe-Fe	10,9 mA/cm ² , pH 8,1, MP-P, 30 dk	%56,0 KOİ	[100]
Oto yıkama Atıksuyu	SS-SS	2,0 mA/cm ² , pH 6,4, MP-P, 100 dk	%97,0 KOİ	[101]
Kağıt endüstrisi atıksuyu	Al-SS	10 mA/cm ² , pH 7, MP-P, 30 dk, 400 mg/L NaCl	%89,0 KOİ %84,0 Renk	[102]
Deniz ürünleri Geridevir Atıksuyu	Ti/IrO ² - SnO ² - Sb ₂ O ₅	25 mA/cm ² , pH 7,45, MP-P, 40 dk,	%91 NH ₄ -N %92 NO ₂ -N %75 KOİ %100 AKM	[103]
Deri Atıksuyu	Al-Fe Fe-Al Ti-Ti Gr-Gr	46 mA/cm ² , pH 7,09, MP-P, 5 dk	%52,0 KOİ %52,0 KOİ %31,0 KOİ %12,0 KOİ	[104]
Haddene Atıksuları	Gr-Gr	2,75 mA/cm ² , pH 7,5, MP-P, 19 dk	%70,0 Yağ-gres	[105]
Sızıntı atıksuyu	Fe-Ti	40 V, pH 8, MP-P, 90 dk	%86,9 KOİ %90,2 Yağ-Gres %88,7 TKM %93,7 Bulanıklık	[106]
Hastane Atıksuları	Fe-Fe Fe-Al Al-Al	12,2 mA/cm ² , pH 6,8, MP-P, 75 dk	%100 KOİ %95,0 KOİ %90,0 KOİ	[107]
Zeytinyağı üretim Atıksuyu	Zn-SS	25 mA/cm ² , pH 3,2, MP-P, 40 dk	%20,9 KOİ	[108]
Boya üretim Atıksuyu	Fe-Fe Al-Al	35 mA/cm ² , pH 7,0, MP-P, 15 dk	%93,0 KOİ %94,0 KOİ	[109]
Patates Cipsi Üretim Atıksuyu	Al-Al	20,0 mA/cm ² , pH 5,0, MP-P, 40 dk	%60,0 KOİ	[110]
Restoran Atıksuyu	Fe-Fe Al-Al	8,0 mA/cm ² , pH 6,6, BP-S, 20 dk	%95,0 KOİ %97,0 KOİ	[111]
Mezbahane Atıksuyu	Al-Al Fe-Fe	10,0 mA/cm ² , pH 6, MP-P, 20 dk 10,0 mA/cm ² , pH 4, MP-P, 20 dk	%78,3 KOİ %76,7 KOİ	[15]
Yoğurt Üretim Atıksuyu	Fe-Fe	30,0 mA/cm ² , pH 4,53, MP-P, 90 dk, 0,75g/l katyonik polimer, 0,2 M NaSO ₄ .	%84,0 KOİ	[112]

*Gr: Grafit, * SS (Stainless Steel): Paslanmaz Çelik, TKM: Toplam Katı Madde, AKM: Aksıda Katı Madde.

SU VE ATIKSU ARITIMINDA ELEKTROFLOTASYON PROSESİ

3. SONUÇLAR

Yapılan literatür araştırmaları sonucunda, Ef ve EC metotlarının tekil ve birlikte kullanıldığı çalışmalarda, farklı sentetik ve gerçek atıksuların arıtımında başarılı kirletici giderme verimlerinin elde edildiği görülmektedir. Bununla birlikte laboratuvar ve pilot ölçekli yapılan çalışmalarda da çeşitli türde kirleticilerin gideriminin gerçekleştirildiği ifade edilmiştir. Bu çalışmalarda işletme parametrelerinin, atıksu özelliklerine bağlı olarak belirlenmesinin gerekliliği, bu konularda yapılması gereken çalışmalara ihtiyaç duyulduğunu göstermektedir. Literatür çalışmalarında ifade edildiği gibi elektrokimyasal metotlar geleneksel arıtma metotlarına göre daha avantajlı görülmekte ve yüksek kirletici giderme verimleri elde edilebilmektedir [11, 34, 113]

Sanayileşmenin günümüzde arttığı düşünüldüğünde, daha etkili ve ucuz arıtma sistemlerinin kullanılmasının önemi oldukça açıktır. Yapılan çalışmalarda, Ef prosesinin, çözünmüş hava flotasyonuna göre 2-4 kat daha ucuz işletme maliyetlerine sahip olduğu belirtilmiştir. Bu literatür çalışmasında, farklı endüstriyel atıksu ve su arıtımı için yapılan çalışmalar incelenmiştir. Elektrokimyasal arıtım proselerinin işleyişini elektrot türü belirlemektedir. Dolayısıyla daha uzun ömürlü ve ucuz elektrotların üretiminin, elektrokimyasal arıtmanın gelişmesine fayda sağlayacağı ve kullanımını artıracığı düşünülmektedir. Mevcut olarak Ef ve elektrokimyasal arıtma prosesleri daha düşük hacimli su ve atıksuların arıtımı için kullanılmaktadır. İleride bu sistemlerin geliştirilerek daha büyük ölçeklerde ve daha büyük hacimlerde su ve atıksuların kullanıma geçileceği yapılan çalışmalarla görülmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] J. H. Clark, "Green chemistry: challenges and opportunities," *Green Chemistry*, vol.1, pp. 1-8, 1999.
- [2] K. Müller, "Electroflotation from the Double Layer to Trouble Waters in Oliver". in *Electrochemistry in Transition*, J. Murphy and vs, Eds., Plenum Press, New York, 1992.
- [3] A. Y. Hosny, "Separating Oil from Oil-Water Emulsions by Electroflotation Technique," *Separations Technology*, vol. 6, pp.9-17, 1996.
- [4] L.B. Mansour, and S. Chalbi, "Removal of oil from oil/water emulsions using electroflotation process," *Journal of Applied Electrochemistry*, vol. 36, pp. 577-581, 2006.
- [5] M. Kobya, E. Senturk, and M. Bayramoglu, "Treatment of poultry slaughterhouse wastewaters by electrocoagulation," *Journal of Hazardous Materials*, vol.133, pp.172-176, 2006.
- [6] S. Zaidi, T. Chaabane, V. Sivasankar, A. Darchen, R. Maachi, T. A. Msagati, and M. Prabhakaran, "Performance efficiency of electro-coagulation coupled electro-flotation process (EC-EF) versus adsorption process in doxycycline removal from aqueous solutions," *Process Safety and Environmental Protection*, vol. 102, pp. 450-461, 2016.
- [7] B. J. Hernlem, and L.S. Tsai, "Chlorine generation and disinfection by electroflotation," *Journal of Food Science*, vol. 65, pp. 834-837, 2000.
- [8] X. Chen, and G. Chen, "Stable Ti/RuO₂-Sb₂O₅-SnO₂ electrodes for O₂ evolution," *Electrochimica Acta*, vol. 50, pp. 4155-4159, 2005.
- [9] R. Mraz, and J. Krýsa, "Long service life IrO₂/Ta₂O₅ electrodes for electroflotation," *Journal of Applied Electrochemistry*, vol. 24, pp.1262-1266, 1994.
- [10] C.C. Ho, and C. Y. Chan, "The application of lead dioxide-coated titanium anode in the electroflotation of palm oil mill effluent," *Water Research*, vol. 20, pp. 1523-1527. 1986.
- [11] V. A. Kolesnikov, V.I. Il'in, V.A. Brodskii, T.V. Guseva, and M. A. Vartanyan, "Improvement of electroflotation treatment of waste waters from ceramic enterprises," *Glass and Ceramics*, vol. 71, pp. 421-424, 2015.
- [12] G. Hassani, A. Alinejad, A. Sadat, A. Esmaeili, M. Ziaei, A. A. Bazrafshan, and T. Sadat, "Optimization of landfill leachate treatment process by electrocoagulation, electroflotation and sedimentation sequential method," *International Journal of Electrochemical Science*, vol. 11, pp. 6705-6018, 2016.
- [13] F. Ozyonar, "Optimization of operational parameters of electrocoagulation process for real textile wastewater treatment using Taguchi experimental design method," *Desalination and Water Treatment*, vol. 57:6, pp. 2389-2399, 2016.
- [14] M. Bayramoglu, M. Kobya, O. T. Can, and M. Sozbir, "Operating cost analysis of electrocoagulation of textile dye wastewater," *Separation and Purification Technology*, vol. 37, pp. 117-125, 2004.
- [15] F. Ozyonar, and B. Karagozoglu, "Investigation of technical and economic analysis of electrocoagulation process for the treatment of great and small cattle slaughterhouse wastewater," *Desalination and Water Treatment*, vol. 52:1-3, pp. 74-87, 2014.
- [16] M. F. Pouet, and A. Grasmick, "Urban wastewater treatment by electrocoagulation and flotation," *Water Science and Technology*, vol. 31, pp.275, 1995.
- [17] M. Kobya, E. Demirbas, N.U. Parlak, and S. Yigit, "Treatment of cadmium and nicklelectroplating rinse water by electrocoagulation," *Environmental Technology*, vol. 31, pp. 1471-1481, 2010.

- [18] F. Janpoor, A. Torabian, and V. Khatibikamal, "Treatment of laundry waste-water by electrocoagulation," *J. Chemical Technology Biotechnology*, vol. 86, pp. 1113–1120, 2011.
- [19] S. Vasudevan, and J. Lakshmi, "Effects of alternating and direct current in electrocoagulation process on the removal of cadmium from water-A novel approach," *Separation and Purification Technology*, vol. 80, pp. 643-651, 2011.
- [20] S. Vasudevan, J. Lakshmi, and R. Vanathi, "Electrochemical coagulation for chromium removal: process optimization, kinetics, isotherms and sludge characterization," *Clean*, vol. 38, pp. 9-16, 2010.
- [21] K. Dermentzis, A. Christoforidis, and E. Valsamidou, "Removal of nickel copper, zinc and chromium from synthetic and industrial wastewater by electrocoagulation," *International Journal of Environmental Science*, vol.1, pp. 697–710, 2011.
- [22] R. Kamaraj, P. Ganesan, and S. Vasudevan, "Removal of lead from aqueous solutions by electrocoagulation: isotherm, kinetics and thermodynamic studies," *International Journal of Environmental Science Technology*, vol. 12, pp. 683-692, 2015.
- [23] C. T. Tanneru, and S. Chellam, "Mechanisms of virus control during iron electrocoagulation: microfiltration of surface water," *Water Research*, vol. 46, pp. 2111–2120, 2012.
- [24] P. Canizares, P. Martinez, M. A. Rodrigo, C. Jimenez, C. Saez, and J. Lobato, "Modelling of wastewater electrocoagulation processes Part I. General description and application to kaolin-polluted wastewaters," *Separation and Purification Technology*, vol. 60, pp. 155-161, 2008.
- [25] S. Calvo, J. P. Leclerc, G. Tanguy, M. C. Cames, G. Paternolte, G. Valentin, A. Rostan, and F. Lapique, "An electrocoagulation unit for the purification of soluble oil wastes of high COD," *Environmental Progress*, vol. 22, pp. 57-65, 2003.
- [26] P. I. Omwene, and M. Kobya, "Treatment of domestic wastewater phosphate by electrocoagulation using Fe and Al electrodes: A comparative study," *Process Safety and Environmental Protection*, vol.116, pp.34-51, 2018.
- [27] M. Y. A. Mollah, R. Schennach, J. P. Parga, and D. L. Cocke, "Electrocoagulation (EC)-science and applications," *Journal of Hazardous Materials*, vol.84, pp. 29-41, 2001.
- [28] G. Chen, "Electrochemical technologies in wastewater treatment," *Separation and Purification Technology*, vol. 38, pp. 11-41, 2004.
- [29] A. Aouni, C. Fersi, M. B. S. Ali, and M. Dhahbi, "Treatment of textile wastewater by a hybrid electrocoagulation/nanofiltration process," *Journal of Hazardous Materials*, vol.168, pp. 868-874, 2009.
- [30] D. Landolt, R. Acosta, R. H. Muller, C. W. Tobias, "An optical study of cathodic hydrogen evolution in high rate electrolysis," *Journal of the Electrochemical Society*, vol.117, pp. 839-845, 1970.
- [31] P. J. Sides, "Phenomena and effects of electrolytic gas evolution," in *Modern Aspects of Electrochemistry*, Conway BE, Bockris JO, White RE Eds., Springer, Boston, MA, pp. 303–354, 1986.
- [32] C. Jiménez, B. Talavera, C. Saez, P. Cañizares, and M. A. Rodrigo, "Study of the production of hydrogen bubbles at low current densities for electroflotation processes," *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, vol.85, pp. 1368-1373, 2010.
- [33] R. Alam, J. Q. Shang, and A. H. Khan, "Bubble size distribution in a laboratory-scale electroflotation study," *Environmental Monitoring and Assessment*, pp.189-193, Apr. 2017.
- [34] R. Mohtasham, and J. Q. Shang, "Electroflotation for Treatment of Industrial Wastewaters: A Focused Review," *Environmental Processes*, vol.6, pp. 325-353, 2019.
- [35] S. Vasudevan, B. S. Kannan, J. Lakshmi, S. Mohanraj, and G. Sozhan, "Effects of alternating and direct current in electrocoagulation process on the removal of fluoride from water," *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, vol.86, pp. 428-436, 2011.
- [36] K. W. Pi, Q. Xiao, H. Q. Zhang, M. Xia, and A. R. Gerson, "Decolorization of synthetic methyl orange wastewater by electrocoagulation with periodic reversal of electrodes and optimization by RSM," *Process Safety and Environmental Protection*, vol.92, pp.796-806, 2014.
- [37] F. Ozyonar, and B. Karagozoglu, "Treatment of pretreated coke wastewater by electrocoagulation and electrochemical peroxidation processes," *Separation and Purification Technology*, vol. 150, pp. 268-277, 2015.
- [38] R. G. Bhaskar, and P. R. Khangaonkar, "Electroflotation-A critical review," *Transactions of the Indian Institute of Metals*, vol. 37, pp. 59-66, 1984.
- [39] C. Y. Hu, S. L. Lo, and W. H. Kuan, "Effect of co-existing anions on fluoride removal in electrocoagulation (EC) process using aluminium electrodes," *Water Research*, vol. 37, pp. 4513-4523, 2003.
- [40] B. Lin, R. Hu, C. Ye, Y. Li, and C. Lin, "A study on the initiation of pitting corrosion in carbon steel in chloride-containing media using scannins electrochemical probes," *Electrochimica Acta*, vol.55, pp. 6542-6545, 2010.
- [41] C. H. Huang, L. Chen, and C. L. Yang, "Effect of anions on electrochemical coagulation for cadmium removal," *Separation and Purification Technology*, vol.65, pp.137-146, 2009.

SU VE ATIKSU ARITIMINDA ELEKTROFLOTASYON PROSESİ

- [42] N. Mordishahla, M. A. Behnajady, and S. Mohammadi-Aghdam, "Investigation of the effect of different electrodes and their connections on the removal efficiency of 4- nitrophenol from aqueous solution by electrocoagulation," *Journal of Hazardous Materials*, vol.154, pp.778-786, 2008.
- [43] M. Kobya, M. Bayramoglu, and M. Eyvaz, "Techno-economical evaluation of electrocoagulation for the textile wastewater using different electrode connections," *Journal of Hazardous Materials*, vol.148, pp.311-318, 2007.
- [44] M. Kobya, F. Ulu, U. Gebologlu, E. Demirbas, and M. S. Oncel, "Treatment of potable water containing low concentration of arsenic with electrocoagulation: different connection modes and Fe-Al electrodes," *Separation and Purification Technology*, vol.77, pp. 283-293, 2011.
- [45] A. K. Golder, A. N. Samanta, and S. Ray, "Removal of Cr³⁺ by electrocoagulation with multiple electrodes: bipolar and monopolar configurations," *Journal of Hazardous Materials*, vol.141, pp. 653-661, 2007.
- [46] S. Garcia-Segura, M. Maesia, S. G. Eiband, J. V. de Melo, and C. A. Martinez-Huitle, "Electrocoagulation and advanced electrocoagulation processes: A general review about the fundamentals, emerging applications and its association with other Technologies," *Journal of Electroanalytical Chemistry*, vol.801, pp. 267-299, 2017.
- [47] D. Gosh, C. R. Medhi, and M. K. Purkait, "Treatment of fluoride containing drinking water by electrocoagulation using monopolar and bipolar electrode connections," *Chemosphere*, vol.73, pp.1393-1400, 2008.
- [48] Y. Esfandiyari, Y. Mahdavi, M. Seyedsalehi, M. Hoseini, G. H. Safari, M. G. Ghozikali, H. Kamani, and J. Jaafari, "Degradation and biodegradability improvement of the olive mill wastewater by peroxi-electrocoagulation/electrooxidation-electroflotation process with bipolar aluminum electrodes," *Environmental Science and Pollution Research*, vol.22, pp.6288-6297, 2015.
- [49] R. M. Bande, B. Prasad, I. M. Mishra, and K. L. Wasewar, "Oil field effluent water treatment for safe disposal by electroflotation," *Chemical Engineering Journal*, vol.137, pp.503-509, 2008.
- [50] M. Carmona, M. Khemis, J. P. Leclerc, and F. A. Lopicque, "Simple model to predict the removal of oil suspensions from water using the electrocoagulation technique," *Chemical Engineering Science*, vol.61 (4), pp. 1237-1246, 2006.
- [51] E. M. Kaliniichuk, I. I. Vasilenko, V. Y. Shchepanyuk, N. A. Sukhoverkhova, and I. A. Makarov, "Treating refinery wastewaters to remove emulsified oils by electrocoagulation and electroflotation," *International Chemical Engineering*, vol.16 (3), pp. 434-435, 1976.
- [52] X. Chen, G. Chen, and P.L. Yue, "Separation of pollutants from restaurant wastewater by electrocoagulation," *Separation and Purification Technology*, vol.19 (1-2), pp. 65-76, 2000.
- [53] N. M. Mostefa, and M. Tir, "Coupling flocculation with electroflotation for waste oil/water emulsion treatment. Optimization of the operating conditions," *Desalination*, vol. 161, pp.115-121, 2004.
- [54] I. Hassan, I. Nirdosh, and G. H. Sedahmed, "Separation of oil from oil-water emulsions by electrocoagulation in an electrochemical reactor with a fixed-bed anode," *Water, Air & Soil Pollution*, vol. 226, pp.271, 2015.
- [55] K. Ighilahriz, M. T. Ahmed, H. Djelal, and R. Maachi, "Electrocoagulation and electro-oxidation treatment for the leachate of oil-drilling mud," *Desalination and Water Treatment*, vol.52, pp.5833-5839, 2014.
- [56] F. M. D. Chequer, G. A. R. de Oliveira, E. R. A. Ferraz, J. C. Cardoso, M. V. B. Zanoni, and D. P. de Oliveira "Textile dyes: dyeing process and environmental impact," *Eco Friendly Text Dye Finish*, pp.151-176. 2013. <http://doi.org/10.5772/53659>.
- [57] U.B. Ogutveren, N. Gonen, and S. Koparal, "Removal of dye stuffs from wastewater: electrocoagulation of Acilan Blau using soluble anode," *Journal of Environmental Science and Health Part A*, vol.27 (5), pp.1237-1247, 1992.
- [58] Z. Zaroual, M. Azzi, N. Saib, and E. Chaïnet, "Contribution to the study of electrocoagulation mechanism in basic textile effluent," *Journal of Hazardous Materials*, vol.131, pp.73-78, 2006.
- [59] M. Kobya, O.T. Can, and M. Bayramoglu, "Treatment of Textile Wastewaters by Electrocoagulation Using Iron and Aluminum Electrodes," *Journal of Hazardous Materials*, vol.100 (1-3), pp.163-178, 2003.
- [60] J. Ibanez, M. M. Singh, and Z. Szafran, "Laboratory experiments on electrochemical remediation of the environment. Part 4: color removal of simulated wastewater by electrocoagulation-electroflotation," *Journal of Chemical Education*, vol.75 (8), pp.1040-1041, 1998.
- [61] L. Fan, F. Yang, and W. Yang, "Performance of the decolorization of an Azo dye with bipolar packed bed cell," *Separation and Purification Technology*, vol.34, pp.89-96. 2004.
- [62] P. Canizares, M. Carmona, J. Lobato, F. Martinez, and M. A. Rodrigo, "Electrodissolution Of Aluminum Electrodes in Electrocoagulation Processes," *Indian journal of Engineering Chemical Research*, vol.44, pp. 4178-4185, 2005.
- [63] M. M. Emamjomeh, M. Sivakumar, "Review of pollutants removed by electrocoagulation and electrocoagulation/flotation processes," *Journal of Environmental Management*, vol. 90, pp.1663-1679, 2009.
- [64] D. T. Cestarolli, A. das G. de Oliveira, and E. M. Guerra, "Removal of Eriochrome Black textile dye from aqueous solution by combined electrocoagulation-electroflotation methodology," *Applied Water Science*, vol.9, pp.100-106, 2019. <https://doi.org/10.1007/s13201-019-0985-x>.

- [65] M. A. Abdel Khalek, F. I. El Hosiny, K. A. Selim, and I. Osama, "A novel continuous electroflotation cell design for industrial effluent treatment," *Sustainability Water Resources Management*, vol.5, pp.457-466, 2019. DOI 10.1007/s40899-017-0199-z.
- [66] M. A. Ahangarnokolaie, H. Ganjidoust and B. Ayat, "Optimization of parameters of electrocoagulation/ flotation process for removal of Acid Red 14 with mesh stainless steel electrodes," *Journal of Water Reuse and Desalination*, vol.08-2, Pp.278-292, 2018.
- [67] M. V. B. Gonçalves, S. C. De Oliveira, B. M. P. N. Abreu, E. M. Guerra and D. T. Cestarolli, "Electrocoagulation/electroflotation Process Applied to Decolourization of a Solution Containing the Dye Yellow Sirius K-CF," *International Journal of Electrochemical Science*, vol.11, pp.7576-7583, 2016.
- [68] A. Amour, B. Merzouk, J. P. Leclerc, and F. Lopicque, "Removal of reactive textile dye from aqueous solutions by electrocoagulation in a continuous cell," *Desalination and Water Treatment*, vol.57(48-49), pp.22764-22773, 2016.
- [69] P. Koedrith, H. Kim, J. I. Weon, and Y. R. Seo, "Toxicogenomic approaches for understanding molecular mechanisms of heavy metal mutagenicity and carcinogenicity," *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, vol.216, pp.587-598, 2013.
- [70] S. Vasudevan, J. Lakshmi, and G. Sozhan, "Effects of alternatin and direct current in electrocoagulation process on the removal of cadmium from water," *Journal of Hazardous Materials*, vol.192, pp.26-34, 2011.
- [71] R. Kamaraj, and S. Vasudevan, "Evaluation of electrocoagulation process for the removal of strontium and cesium from aqueous solution," *Chemical Engineering Research and Design*, vol.93, pp.522-530, 2015.
- [72] C. Escobar, C. Soto-Salazar, and M. I. Toral, "Optimization of the electrocoagulation process for the removal of copper, lead and cadmium in natural waters and simulated wastewater," *Journal of Environmental Management*, vol.81, pp. 384-391, 2006.
- [73] R. G. Casqueira, M. L. Torem, and H. M. Kohler, "The removal of zinc from liquid streams by electroflotation," *Minerals Engineering*, vol.19, pp.1388-1392, 2006.
- [74] J. Zhu, F. Wu, X. Pan, J. Guo, and D. Wen, "Removal of antimony from antimony mine flotation wastewater by electrocoagulation with aluminium electrodes," *Journal of Materials and Environmental Science*, vol.23, pp. 1066-1071, 2011.
- [75] D. Lakshmanan, D. A. Clifford, and G. Samanta, "Comparative study of arsenic removal by iron using electrocoagulation and chemical coagulation," *Water Research*, vol.44, pp.5641-5652, 2010.
- [76] J. F. Martínez-Villafañe, C. Montero-Ocampo, and A. M. García-Lara, "Energy and electrode consumption analysis of electrocoagulation for the removal of arsenic from underground water," *Journal of Hazardous Materials*, vol.172, pp.1617-1622, 2009.
- [77] F. Akbal, and S. Camci, "Treatment of metal plating wastewater by electrocoagulation," *Environmental Progress & Sustainable Energy*, vol.31, pp.340-350, 2012.
- [78] H. J. Mansoorian, A. H. Mahvi, and A. J. Jafari, "Removal of lead and zinc from battery industry wastewater using electrocoagulation process: influence of direct and alternating current by using iron and stainless steel rod electrodes," *Separation and Purification Technology*, vol.135, pp.165-175, 2014.
- [79] A. H. Mahvi, S. J. A. Ebrahimi, A. Mesdaghinia, H. Gharibi, and M. H. Sowlat, "Performance evaluation of a continuous bipolar electrocoagulation/electrooxidation- electroflotation (ECEO-EF) reactor designed for simultaneous removal of ammonia and phosphate from wastewater effluent," *Journal of Hazardous Materials*, vol.192, pp.1267-1274, 2011.
- [80] G. Moussavi, F. Majidi, and M. Farzadkia, "The influence of operational parameters on elimination of cyanide from wastewater using the electrocoagulation process," *Desalination*, vol.280, pp.127-133, 2011.
- [81] A. H. Essadki, B. Gourich, Ch. Vial, H. Delmas, and M. Bennajah, "Defluoridation of drinking water by electrocoagulation/electroflotation in a stirred tank reactor with a comparative performance to an external-loop airlift reactor," *Journal of Hazardous Materials*, vol.168, pp.1325-1333, 2009.
- [82] K. Govindan, M. Noel, and R. Mohan, "Removal of nitrate ion from water by electrochemical approaches," *Journal of Water Process Engineering*, vol.6, pp.58-63, 2015.
- [83] A. H. Mahvi, S. J. A. Ebrahimi, A. Mesdaghinia, H. Gharibi, and M. H. Sowlat, "Performance evaluation of a continuous bipolar electrocoagulation/electrooxidation- electroflotation (ECEO-EF) reactor designed for simultaneous removal of ammonia and phosphate from wastewater effluent," *Journal of Hazardous Materials*, vol.192, pp.1267-1274, 2011.
- [84] M. Murugananthan, G. B. Raju, and S. Prabhakar, "Removal of sulfide, sulfate and sulfite ions by electro coagulation," *Journal of Hazardous Materials*, vol.109(1-3), pp.37-44, 2004.
- [85] Y. Yu, X. Wang, D. Yang, B. Lei, X. Zhang, and X. Zhang, "Evaluation of human health risks posed by carcinogenic and non-carcinogenic multiple contaminants associated with consumption of fish from Taihu Lake, China," *Food Chemical Toxicology*, vol 69, pp.86-93, 2014.
- [86] O. T. Can, and M. Bayramoglu, "The effect of process conditions on the treatment of benzoquinone solution by electrocoagulation," *Journal of Hazardous Materials*, vol.173, pp.731-736, 2010.

SU VE ATIKSU ARITIMINDA ELEKTROFLOTASYON PROSESİ

- [87] A. S. Fajardo, R. C. Martins, and R. M. Quinta-Ferreira, "Treatment of a synthetic phenolic mixture by electrocoagulation using Al, Cu, Fe, Pb, and Zn as anode materials," *Industrial & Engineering Chemistry Research*, vol.53, pp.18339-18345, 2014.
- [88] E. Mohora, S. Rončević, J. Agbaba, A. Tubić, M. Mitić, M. Klašnia, and B. Dalmacija, "Removal of arsenic from groundwater rich in natural organic matter (NOM) by continuous electrocoagulation/flocculation (ECF)," *Separation and Purification Technology*, vol.136, pp.150-156, 2014.
- [89] M. Vepsäläinen, M. Pulliainen, and M. Sillanpää, "Effect of electrochemical cell structure on natural organic matter (NOM) removal from surface water through electrocoagulation (EC)," *Separation and Purification Technology*, vol.99, pp.20-27, 2012.
- [90] F. Ulu, S. Barisci, M. Kobya, and M. Sillanpää, "An evaluation on different origins of natural organic matters using various anodes by electrocoagulation," *Chemosphere*, vol.125, pp.108-114, 2015.
- [91] T. Olmez-Hanci, Z. Kartal, and I. Arslan-Alaton, "Electrocoagulation of commercial naphthalene sulfonates: process optimization and assessment of implementation potential," *Journal of Environmental Management*, vol.99, pp.44-51, 2012.
- [92] N. Mordishahla, M. A. Behnajady, and S. Mohammadi-Aghdam, "Investigation of the effect of different electrodes and their connections on the removal efficiency of 4- nitrophenol from aqueous solution by electrocoagulation," *Journal of Hazardous Materials*, vol.154, pp.778-78, 2008.
- [93] K. L. Dubrawski, and M. Mohseni, "In-situ identification of iron electrocoagulation speciation and application for natural organic matter (NOM) removal," *Water Research*, vol.47, pp.5371-5380, 2013.
- [94] M. Ben-Sasson, Y. Zidon, R. Calvo, and A. Adin, "Enhanced removal of natural organic matter by hybrid process of electrocoagulation and dead-end microfiltration," *Chemical Engineering Journal*, vol.232, pp.338-345, 2013.
- [95] F. Ozyonar, and S. Aksoy, "Removal of Salicylic Acid from Aqueous Solutions Using Various Electrodes and Different Connection Modes by Electrocoagulation," *International Journal of Electrochemical Science*, vol.11, pp.3680-3696, 2016.
- [96] W. L. Chou, C. T. Wang, and K. Y. Huang, "Investigation of process parameters for the removal of polyvinyl alcohol from aqueous solution by iron electrocoagulation," *Desalination*, vol.251, pp.12-19, 2010.
- [97] E. Brillas, B. Boye, M. A. Baños, J. C. Calpe, and J. A. Garrido, "Electrochemical degradation of chlorophenoxy and chlorobenzoic herbicides in acidic aqueous medium by the peroxi-coagulation method," *Chemosphere*, vol.51, pp.227-235, 2003.
- [98] H. L. Kim, J. B. Cho, Y. J. Park, and I. H. Cho, "Treatment and toxicity reduction of textile dyeing wastewater using the electrocoagulation-electroflotation process," *Journal of Environmental Science and Health*, vol.51(8), pp.661-668, 2016.
- [99] O. Chavalparit, and M. Ongwandee, "Optimizing electrocoagulation process for the treatment of biodiesel wastewater using response surface methodology," *Journal of Environmental Sciences*, vol.21, pp.1491-1496, 2009.
- [100] R. S. Bejankiwar, "Electrochemical treatment of cigarette industry wastewater: feasibility study," *Water Research*, vol.36, pp. 4386-4390, 2002.
- [101] M. Panizza, and G. Cerisola, "Applicability of electrochemical methods to carwash wastewaters for reuse. Part 2: Electrocoagulation and anodic oxidation integrated process," *Journal of Electroanalytical Chemistry*, vol.638, pp.236-240, 2010.
- [102] K. P. Kalyani, N. Balasubramanian, and C. Srinivasakannan, "Decolorization and COD reduction of paper industrial effluent using electro-coagulation," *Chemical Engineering Journal*, vol.151, pp.97-104, 2009.
- [103] X. Yunqing, and L. Jianwei, "Application of electrochemical treatment for the effluent from marine recirculating aquaculture systems," *Procedia Environmental Sciences*, vol.10, pp.2329-2335, 2011.
- [104] M. Murugananthan, G. B. Raju, and S. Prabhakar, "Separation of pollutants from tannery effluents by electro flotation," *Separation and Purification Technology*, vol.40, pp.69-75, 2004.
- [105] E. A. Maksimov, and A. A. Ostsemin, "Intensifying the cleaning of emulsion-and oil-bearing waste water from rolled-product manufacturing by electroflotation," *Metallurgist*, vol.58, pp.945-949, 2015.
- [106] G. Hassani, A. Alinejad, A. Sadat, A. Esmaeili, M. Ziaei, A. A. Bazrafshan, and T. Sadat, "Optimization of landfill leachate treatment process by electrocoagulation, electroflotation and sedimentation sequential method," *International Journal of Electrochemical Science*, vol.11, pp.6705-6018, 2016.
- [107] R. Mahajan, V. Khandegar, and A. K. Saroha, "Treatment of hospital operation theatre effluent by electrocoagulation," *International Journal of Chemical Environmental Engineering*, vol.4, pp.104-107, 2013.
- [108] A. S. Fajardo, R. F. Rodrigues, R. C. Martins, L. M. Castro, and R. M. Quinta-Ferreira, "Phenolic wastewaters treatment by electrocoagulation process using Zn anode," *Chemical Engineering Journal*, vol.275, pp.331-341, 2015.
- [109] S. Zodi, O. Potier, F. Lapique, and J. P. Leclerc, "Treatment of the textile wastewaters by electrocoagulation: effect of operating parameters on the sludge settling characteristics," *Separation and Purification Technology*, vol.69, pp.29-36, 2009.

F. Özyonar

- [110] M. Kobya, H. Hiz, E. Senturk, C. Aydiner, and E. Demirbas, "Treatment of potato chips manufacturing wastewater by electrocoagulation," *Desalination*, vol.190, pp.201-211, 2006.
- [111] X. Chen, G. Chen, and P. L. Yue, "Separation of pollutants from restaurant wastewater by electrocoagulation," *Separation and Purification Technology*, vol.19, pp.65-76, 2000.
- [112] T. U. Un, and E. Ozel, "Electrocoagulation of yogurt industry wastewater and the production of ceramic pigments from the sludge," *Separation and Purification Technology*, vol.120, pp.386-391, 2013.
- [113] G. Z. Kyzas, and K. A. Matis, "Electroflotation process: A review" *Journal of Molecular Liquids*, vol.220, pp.657-664, 2016.

