



## **Atık Su Analizlerinde Potansiyometrik Sensörlerin Kullanımı**

**Oğuz ÖZBEK<sup>a</sup>, Ömer İŞILDAK<sup>b</sup>, Kamil Mert YİĞİT<sup>b,c</sup>, Alper ÇETİN<sup>b,c</sup>**

<sup>a</sup>Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Bilim ve Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi, 67600, Zonguldak, [oguz.ozbek@beun.edu.tr](mailto:oguz.ozbek@beun.edu.tr)

<sup>b</sup>Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, Kimya Bölümü, 60250, Tokat, [omer.isildak@gop.edu.tr](mailto:omer.isildak@gop.edu.tr)

<sup>c</sup>Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, Moleküler Biyoloji ve Genetik Bölümü, 60250, Tokat, [kamilmertiyigit11@gmail.com](mailto:kamilmertiyigit11@gmail.com); [alper.cetin044@gmail.com](mailto:alper.cetin044@gmail.com)

### **ÖZET**

Evsel ve endüstriyel su kirliliği ciddi bir çevre sorunudur. Metal iyonları madencilik, metal kaplama, elektrokaplama, ilaç ve pil üretimi gibi endüstriyel işlemlerde kullanıldığından dolayı, birçok metal ve ağır metal endüstriyel su kirliliğine neden olabilir. Genel olarak, bu metallerin tayini enstrümantal cihazlar tarafından yapılır. Potansiyometrik iyon seçici sensörler, avantajları nedeniyle analitik kimyagerler tarafından uzun yıllardır kapsamlı bir şekilde araştırılmaktadır. Geliştirilen potansiyometrik sensörler çevresel örneklerin analizinde başarıyla kullanılmış ve günümüze kadar farklı sensörler geliştirilerek, literatüre sunulmuştur. Bu derlemede, atık su örneklerine başarıyla uygulanan potansiyometrik sensör çalışmaları araştırılmıştır.

**Anahtar Kelimeler :** Potansiyometri, Sensör, Atık Su Analizi, İyon Seçici Elektrot

### **The use of potentiometric sensors in wastewater analysis**

#### **ABSTRACT**

Domestic and industrial water pollution is a serious environmental problem. Because metal ions are used in processes of industrial such as mining, metal coating, electroplating, medicine and battery production, many metals and heavy metals can cause industrial water pollution. Generally, the determination of these metals is made by instrumental devices. Potentiometric ion selective sensors have been extensively studied by analytical chemists for many years due to their advantages. The developed potentiometric sensors have been used successfully in environmental sample analysis and different sensors have been developed till today and introduced into the literature. In this review, we investigated potentiometric sensor studies which have been successfully applied to the developed wastewater samples.

**Keywords :** Potentiometry, Sensor, Waste Water Analysis, Ion Selective Electrode

### **GİRİŞ**

Su, dünyadaki tüm canlıların yaşamını sürdürebilmesi için gerekli olan en önemli doğal kaynaklardan biridir. Günümüzde, artan nüfus, hızlı sanayileşme ve teknolojik ilerlemelerle birlikte evsel atıklar, sanayi atıkları, zirai işlemlerde kullanılan gübreler ve ilaçlar vb. birçok etmen su kirliliğine sebep olmaktadır ve çevreyi olumsuz yönde etkilemektedir (Dede, 2017; Canpolat ve Uzun, 2009). Atık sular genel olarak evsel, endüstriyel veya ticari kullanımlardan kaynaklanır. Ayrıca, insan kaynaklı kalitesi düşürülerek dönüştürülmüş diğer suları da içermektedir (Krishna ve Manickam, 2017). Ağır metaller; çinko, bakır, mangan, demir, kurşun, cıva, arsenik ve kadmiyum gibi metaller olup insan sağlığı üzerinde son derece zararlı ve kalıcı etkilere neden olabilen metallerdir. Ağır metaller, doğada oldukça uzun süre kalabilir ve canlılar üzerinde toksik etkilere ve ölümlere neden olmaktadır. Bu nedenle atık sularda önemli bir kirletici olan ağır metal iyonlarının tayini ve

engelleme çalışmaları önem arz etmektedir (Dündar vd., 2012; Kadriyelu vd., 2001). Günümüzde metallerin tayinine yönelik çalışmalar indüktif eşleşmiş plazma spektroskopisi (ICP), atomik absorpsiyon spektroskopisi (AAS) gibi spektroskopik metotlar kullanılarak gerçekleştirilir. Bunun yanı sıra yapılan çalışmalarda, potansiyometrik iyon seçici sensörler ile metallerin tayini oldukça başarılı bir şekilde yürütülmektedir.

Potansiyometri biri referans diğeri çalışma (indikatör) eletrodu olmak üzere bir elektrot sisteminin potansiyelinin zamana karşı ölçüldüğü elektrokimyasal analiz yöntemlerinden biridir (Işıldak ve Özbek, 2020). Potansiyometrik iyon seçici elektrotlar tanımlandığı günden günümüze kadar geçen süreçte çevre, tıp, ilaç analizleri, endüstriyel ve zirai alanlar başta olmak üzere bir çok anyonik ve katyonik türün tespitinde başarılı bir şekilde kullanılmaktadır (Kopytin vd., 2016; Işıldak vd., 2019). İyon seçici elektrotlar bilinen analitik tekniklere göre, oldukça kısa cevap zamanı, geniş doğrusal konsantrasyon aralığı, düşük enerji tüketimi, düşük maliyet, kolay hazırlanabilme, oldukça iyi seçicilik ve kullanımları için özel bir hazırlık ve altyapı gerektirmeme gibi bir çok avantaja sahiptirler (Işıldak vd., 2019; Topcu vd., 2011; Kanberoğlu vd., 2015; Üner Bahar vd., 2020). Potansiyometrik iyon seçici sensörler, çözelti içerisinde çözülmüş halde bulunan anyonik veya katyonik türlerin yanı sıra sadece özel bir türü tayininde de oldukça başarılı sonuçlar vermektedir (Topcu, 2016). Bu derlemede, potansiyometrik iyon seçici sensörlerle atık sularda tayin edilen iyonik türler araştırıldı. Yapılan çalışmalarda potansiyometrik yöntemle birlikte bilinen farklı analitik yöntemlerin (AAS, ICP vb.) karşılaştırılması yapılarak sonuçları sunulmuştur.

### Atık Sularda Kullanılan Potansiyometrik İyon Seçici Sensörler

Potansiyometrik iyon seçici sensörler günümüze kadar birçok alanda uygulama alanı bulmuştur. Özellikle, çevresel araştırmalarda önemli bir yere sahip olan atık sularda çeşitli iyonların tayinleri bilinen analitik yöntemlerin yanı sıra potansiyometrik sensörler ile yapılarak literatüre sunulmuştur. Makrosiklik bir molekül olan 7,10,13-triaza-1-tiya-4,16-dioxa-20,24-dimetil-2,3;17,18-dibenzo-siklootadekan-6,14-dion (1) bileşiğinin iyonofor olarak kullanıldığı ve bakır(II)- iyonlarına duyarlı sensör Afkhami vd. (2014) tarafından geliştirilmiştir. Geliştirilen sensör,  $4.50 \times 10^{-8} - 1.00 \times 10^{-2}$  M'lık geniş bir konsantrasyon aralığında doğrusal davranış sergilemiştir. Sensörün gözlenebilme sınırı  $2.34 \times 10^{-8}$  M, pH çalışma aralığı 3.5 – 6.0 ve cevap zamanı <10 s olarak bildirilmiştir. Geliştirilen bu bakır seçici sensör ile elektrokaplama atık su örneklerinde % 96.3 – 102.4 aralığındaki yüksek geri kazanımlar elde edilmiş ve sensörün atık su, kuyu suyu ve nehir suyu örneklerinde başarılı bir şekilde kullanıldığı rapor edilmiştir. Yolcu ve Dere (2018), bakır(II)- iyonlarına duyarlı potansiyometrik mikrosensör için 2-vinilpridin polimeri sentezledi ve iyonofor olarak kullandı. Sensörün  $1.0 \times 10^{-6} - 1.0 \times 10^{-1}$  M'lık konsantrasyon aralığında doğrusal olarak çalıştığını,  $8.4 \times 10^{-7}$  M'lık düşük bir gözlenebilme sınırına ve 15 saniyeden daha kısa cevap zamanına sahip olduğunu rapor ettiler. Geliştirilen bu sensör, pH 4.0 – 7.0 aralığında çalışmakta olup, kullanım ömrü ise 2 ay olarak bildirilmiştir. Sensör yağmur suyu, nehir suyu, musluk suyu ve atık sularda uygulanarak elde edilen sonuçlar AAS ile kıyaslamalı olarak verilmiştir. Elde edilen sonuçların AAS ile uyumlu olduğu ve sensörün gerçek numunelerde başarılı bir şekilde kullanıldığı rapor edilmiştir. Singh vd. (2007) geliştirdikleri çinko(II)-seçici sensörü bazı çevre örneklerinde ve biyolojik örneklerde uyguladılar. Sensör ile endüstriyel atık su örneklerinde çinko tayini gerçekleştirildi. Elde edilen sonuçlar AAS ile karşılaştırmalı olarak rapor edilmiş ve uyumlu sonuçlar gözlemlenmiştir. Çalışmada, hidrotris(*N*-tert-bütül-2-tiyimidazolil)borat [ $\text{KTt}^{\text{t-Bu}}$ ] (2) ve potasyum hidrotris(3-tert-bütül-5-isopropil-1-pirazolil) borat [ $\text{KTP}^{\text{t-Bu,i-Pr}}$ ] (3)

moleküllerini sentezlediler ve iyonofor olarak kullandılar. Bu moleküllerden hydrotris(*N*-tert-bütül-2-tiyomidazolil)borat [KTt<sup>t-Bu</sup>] bileşiğinin kullanıldığı sensör çinko iyonlarına karşı daha fazla duyarlı olduğu tespit edilmiş, sensörün 12 saniye hızlı cevap zamanı, 3.5 – 7.8 aralığında pH değişiminden etkilenmediği ve gözlenebilme sınırının  $9.5 \times 10^{-8}$  M olduğu bildirilmiştir.

5,6-benzo-4,7,13,16,21,24-hekzaoksa-1,10-diazabisiklo[8,8,8]hekzacos-5-en molekülünü iyonofor olarak kullanarak çinko(II) iyonlarına duyarlı sensörü Zamani vd. (2006) tarafından geliştirmiştir. Geliştirilen bu sensör  $1.0 \times 10^{-6}$  -  $1.0 \times 10^{-1}$  M aralığında doğrusal olarak bir davranış sergilemiştir. Sensörün gözlenebilme sınırı  $6.3 \times 10^{-7}$  M olarak bildirilirken, pH çalışma aralığı 2.8 – 7.3 olarak rapor edilmiştir. Çinko(II) seçici sensör atık su analizlerinde test edilmiş ve AAS ile karşılaştırılarak uyumlu sonuçlar bildirilmiştir. Kumar ve Shim (2009) poli (vinilklorür) (PVC) membran kobalt(II)-seçici sensörü *p*-(4-n-bütülfenilazo)kaliks[4]aren (4) molekülünü iyonofor olarak kullanarak geliştirdiler. Yaptıkları çalışmada atık sularda kobalt iyonu tayinini başarılı bir şekilde gerçekleştirdiler. Sensör  $9.20 \times 10^{-6}$  –  $1.0 \times 10^{-1}$  M derişim aralığında doğrusal olarak çalışmaktadır. Sensörün cevap zamanı 25s, pH çalışma aralığı 4.0 – 7.2 ve kullanım ömrü 3 ay olarak rapor edilmiştir. Ayrıca alkali, toprak alkali ve bazı geçiş metali katyonlara göre kobalt iyonlarına oldukça seçici olduğu bildirilmiştir. 4-tert-bütüliyakaliks[4]aren (5) molekülünü iyonofor olarak kullanan Gupta vd. (2008) yaptıkları çalışmada PVC membran kobalt(II)-seçici sensörü önerdiler.  $5.3 \times 10^{-6}$  –  $1.0 \times 10^{-1}$  M derişim aralığında doğrusal olarak çalışan sensör, 10 saniyelik hızlı cevap zamanına ve yaklaşık 0.3 ppm gözlenebilme sınırına sahip olduğu rapor edilmiştir. Bira ve atık su örneklerinde başarıyla uygulanan bu kobalt(II)-seçici sensörden elde edilen sonuçlar atomik absorpsiyon spektroskopisi (AAS) ve indüktif eşleşmiş plazma spektroskopisi (ICP) sonuçları desteklenmiştir.

1,2-di(o-salisilaliminfeniltiyo)etan (6) molekülünün iyonofor olarak kullanıldığı PVC membran nikel(II)-seçici sensör Rezai vd. (2011) tarafından bildirilmiştir. Çalışmada sensörün,  $1.0 \times 10^{-5}$  –  $5.0 \times 10^{-3}$  M doğrusal çalışma aralığına ve  $8.51 \times 10^{-6}$  M gözlenebilme sınırına sahip olduğu rapor edilmiştir. Geliştirilen sensör, içme suyu, nehir suyu ve atık sularda uygulanmış yüksek geri kazanımlar elde edilmiştir. Gupta vd. (2007) *N,N'*-bis(2-hidroksi-1-naftalin)-2,6-pridiamin (7) molekülünü sentezlediler ve iyonofor olarak kullanarak ve kurşun(II)-seçici sensör geliştirdiler.  $3.2 \times 10^{-6}$  –  $1.0 \times 10^{-1}$  M aralığında doğrusal cevap sergileyen sensörün pH çalışma aralığı 3.5 – 7.5 olarak rapor edilmiştir. Sensörün cevap zamanı 10 saniye olarak belirlenirken, kullanım ömrünün 6 ay olarak rapor edilmiştir. Geliştirilen kurşun(II)-seçici sensörün atık sularda uygulaması yapılarak sonuçları AAS ile kıyaslanmıştır. Elde edilen sonuçların birbiri ile uyumlu olduğu rapor edilmiştir. Ensafi ve Sedighi (2008), PVC membran kadminyum(II)-seçici sensörü geliştirdiler, atık su örnekleri dahil olmak üzere farklı su örneklerinde uyguladılar. Geliştirdikleri kadminyum(II)-seçici sensör,  $1.0 \times 10^{-6}$  –  $1.0 \times 10^{-1}$  M derişim aralığında doğrusal olarak çalışmaktadır. Sensörün çalışma şartlarını belirleyen Ensafi ve Sedighi cevap zamanını 20 saniye, kullanım ömrünü 8 hafta, pH çalışma aralığını 2.8 – 8.1 ve gözlenebilme sınırını  $8.4 \times 10^{-7}$  M olarak rapor ettiler. Kumar (2012), tümüyle katı kontak nikel(II)-seçici sensörü iyonofor olarak *p*-(2-thiazolazo)kaliks[4]aren (8) molekülünü kullanarak tanımladı. Nikel(II)-seçici sensörün karakterizasyon çalışmaları neticesinde  $1.0 \times 10^{-6}$  –  $1.0 \times 10^{-1}$  M aralığında doğrusal çalışma aralığına ve  $9.0 \times 10^{-7}$  M gözlenebilme sınırına sahip olduğunu rapor etti. Yapılan çalışmada, sensörün 10 – 15 saniye arasında değişen hızlı cevap zamanı, pH 3.0 – 7.6 aralığında çalışabildiği ve 10 haftalık kullanım ömrü sensörün belirlenen diğer özellikleri olarak bildirildi. Önerilen nikel sensörü çikolata örneklerinde kullanıldığı gibi atık su örneklerinde de başarılı bir şekilde kullanılarak sonuçlar AAS ile karşılaştırılmıştır. Kamal vd. (2015) tümüyle katı kontak PVC membran

kurşun(II)-seçici sensörü naftalin-sülfonamid türevi molekülünü iyonofor olarak kullanarak geliştirdiler. Sensörün  $5.62 \times 10^{-8}$  M'lık düşük gözlenebilme sınırına sahip olduğunu, 2.0 – 7.0 pH aralığında çalıştığını ve 10 saniyeden daha kısa sürede cevap zamanına sahip olduğunu bildirmişlerdir. Geliştirilen kurşun iyonlarına duyarlı sensörün potansiyometrik uygulamalarını gerçekleştiren grup endüstriyel atık sularda kurşun analizini AAS ile kıyaslamalı olarak rapor etmişlerdir.

Porfirin türevi moleküller uygun boşluklu yapılarından dolayı kimyasal sensörlerin geliştirilmesinde oldukça yaygın bir şekilde tercih edilmektedir (Işıldak ve Özbek, 2020). 5,10,15,20-tetrakis(3,4-dimetoksifenil)porfirin (**9**) ve 5,10,15,20-tetrakis(3-hidroksifenil)porfirin (**10**) moleküllerini iyonofor olarak kullanan Vlassici vd. (2008), gümüş(I)-, kurşun(II)- ve bakır(II)- seçici sensörler geliştirmişlerdir. Geliştirdikleri bu sensörlerden kurşun(II)-  $1.0 \times 10^{-5} - 1.0 \times 10^{-1}$  M konsantrasyon aralığında çalışmaktadır ve atık sularda kurşun analizinde kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar AAS ile karşılaştırmalı olarak verilmiş ve sonuçların birbiriyle uyum içerisinde olduğu bildirilmiştir. Zamani ve Sahebnaşagh (2013), PVC membran krom(III)-seçici sensörü dietil 2-ftalimido malonat (**11**) molekülünü iyonofor olarak kullanarak önerdiler.  $1.0 \times 10^{-7} - 1.0 \times 10^{-2}$  M'lık doğrusal çalışma aralığı, 2.9 – 6.1 pH çalışma aralığı, 5 saniye gibi oldukça kısa cevap zamanı ve  $8.6 \times 10^{-8}$  M'lık gözlenebilme sınırı ile tanımladılar. Karakterizasyon çalışmalarının ardından krom(III)-seçici sensörün endüstriyel elektrokaplama atık sulardaki analizlerini başarılı bir şekilde gerçekleştirdiler. Elde edilen sonuçları AAS ile kıyasladılar ve birbirleriyle uyumlu sonuçlar elde ettiler. Krom iyonuna duyarlı başka bir sensör çalışmasını 2,3,8,9-tetrafenil-1,4,7,10-tetraazasiklodeka-1,3,7,9-tetraen (**12**) molekülünü iyonofor olarak kullanan Ganjali vd. (2003) gerçekleştirmiştir. Doğrusal çalışma aralığının  $1.0 \times 10^{-6} - 1.0 \times 10^{-1}$  M olarak bildirildiği sensörün pH çalışma aralığı 3.0 – 5.5, cevap zamanı ise 15 saniyedir. Sensörün diğer metal iyonlarına göre krom iyonuna daha iyi seçicilik sergilediği çalışmada endüstriyel atık sularda krom analizi yapılarak sonuçlar AAS ile kıyaslamalı olarak verilmiştir. Ganjali vd (2015), geliştirdikleri civa(II)-seçici potansiyometrik sensörü atık su örneklerinde başarılı bir şekilde kullandıklarını bildirdiler. Geliştirilen civa iyon sensörü  $1.0 \times 10^{-8} - 1.0 \times 10^{-3}$  M aralığında çalışmakta olup,  $3.2 \times 10^{-9}$  M gibi oldukça düşük bir gözlenebilme sınırına sahiptir. Ayrıca bu sensörün  $Hg^{2+}$  iyonları için iyi bir seçiciliğe sahip olduğu da bildirilmiştir. Bagheri vd. (2013) karbon pasta elektrot kadmiyum(II)-seçici sensörü tanımladılar. Yapılan bu çalışmada 2,20-tiyobis[4-metil(2-aminofeniloksi)fenileter] (**13**) molekülü iyonofor olarak kullanılmış ve  $3.0 \times 10^{-8} - 1.0 \times 10^{-1}$  M'lık geniş bir konsantrasyon aralığında çalıştığı saptanmıştır.  $7.5 \times 10^{-9}$  M'lık oldukça düşük gözlenebilme sınırına sahip olan sensörün pH çalışma aralığı 3.0 – 5.5 olarak bildirilmiştir. Ayrıca, 6 saniye gibi oldukça hızlı cevap zamanına sahip olan sensör kuyu suyu, nehir suyu ve elektrokaplama atık sularında kadmiyum analizinde yüksek geri kazanımlar elde edilerek başarılı bir şekilde kullanılmıştır. Demir(III)-seçici potansiyometrik sensör çalışmaları için benzo-18-crown-6 (**14**) molekülünün iyonofor olarak kullanan Badakhshan vd. (2019) sensörün  $1.0 \times 10^{-6} - 1.0 \times 10^{-1}$  M'lık doğrusal çalışma aralığına sahip olduğunu bildirdiler. Sensörün gözlenebilme sınırı  $8.0 \times 10^{-7}$  M olup, cevap zamanı 12 saniye ve kullanım ömrü 10 hafta olarak rapor edilmiştir. Sensörün pH çalışma aralığı ise 2.5 – 5.7 olarak belirlenmiştir. Geliştirilen  $Fe^{3+}$  iyonlarına duyarlı sensörün gerçek numune analizlerinde hastane musluk suyu atık su örneği kullanılmış ve AAS ile sonuçları kıyaslanarak yüksek oranlarda geri kazanımlar elde edilmiştir. Masrournia vd. (2009), dilaktam krown eter (**15**) molekülünü iyonofor olarak kullanarak gümüş(I)- iyonlarına seçici yeni bir sensör önerdiler. Sensörün  $1.0 \times 10^{-5} - 1.0 \times 10^{-1}$  M derişim aralığında doğrusal yanıt sergilediğini, 5.1 – 7.2 aralığında pH değişiminden etkilenmediğini, 20 saniye cevap zamanına sahip olduğunu ve 75 gün kullanım ömrü olduğunu rapor ettiler.

Geliştirilen gümüş(I)-seçici sensör, atık su analizlerinde kullanılmış ve elde edilen sonuçlar ICP-OES ile karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

Etil benzoil asetat kullanılarak geliştirilen potansiyometrik lantan(III) sensörü Frag vd. (2019), tarafından tanımlanmış ve çalışma şartları belirlenmiştir. Yapılan deneysel çalışmalara göre, sensörün konsantrasyon aralığı  $1.0 \times 10^{-2} - 1.0 \times 10^{-6}$  M olarak bildirilmiştir. Geliştirilen lantan sensörü hızlı cevap zamanına sahip olup atık su ve bazı su örneklerinde başarılı bir şekilde kullanılmıştır. Metal iyonlarının belirlenmesinin dışında farklı bir potansiyometrik sensör Cunha vd. (2010), tarafından tanımlanmıştır. Bu sensörde tetrasiklin tipi antibiyotiklerin belirlenmesi için PVC membranların iyon seçici elektrotlar hazırlanarak performansları değerlendirilmiştir.  $\beta$ -siklodekstrin'in iyonofor olarak kullanıldığı çalışmada, gerçek numune analizleri ilaç örnekleri ve atık su örnekleri kullanılarak tamamlanmış ve yüksek performanslı sıvı kromatografisi (HPLC) yöntemiyle kıyaslama yapılarak sonuçlar verilmiştir.

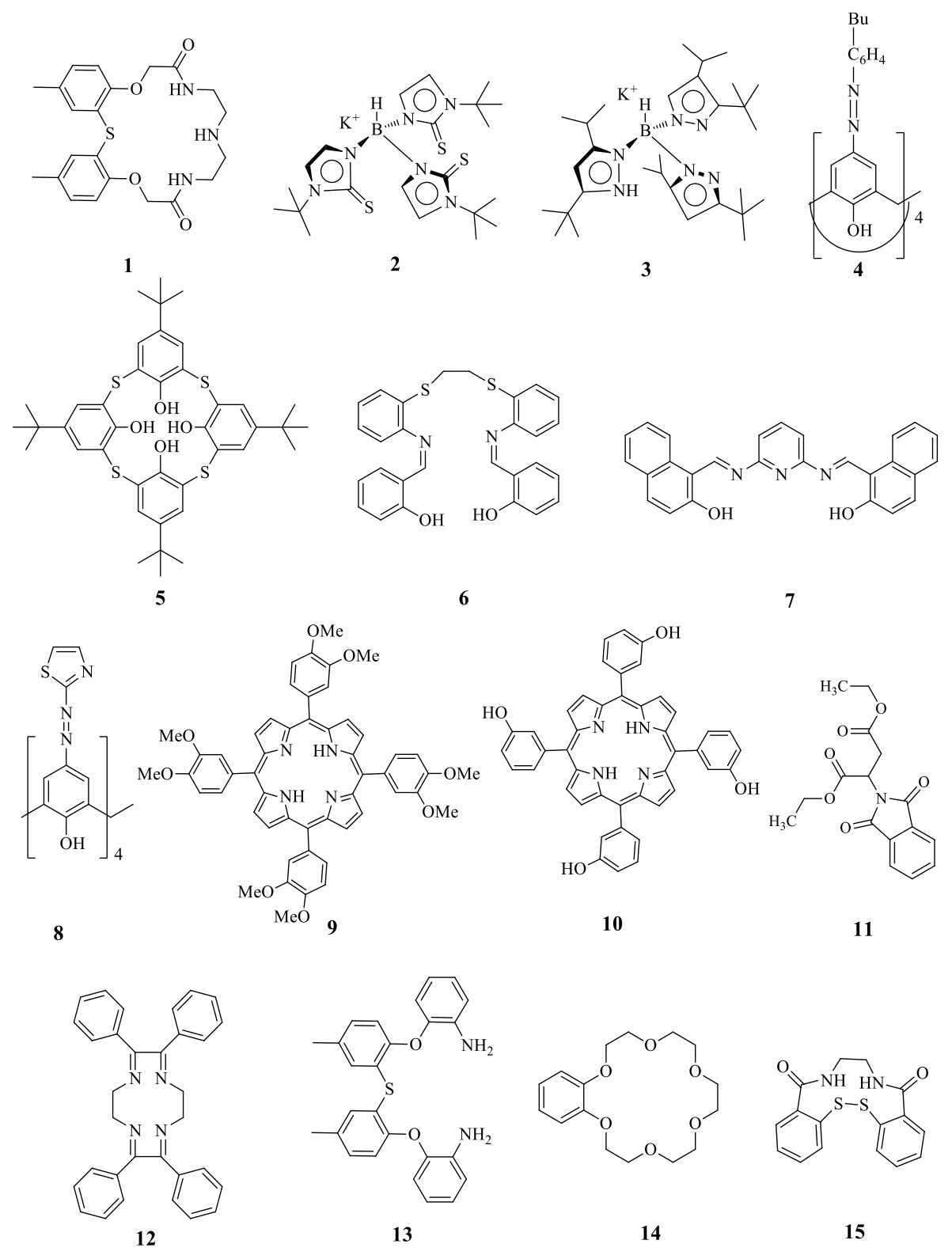
**Tablo 1.** Atık su analizinde potansiyometri ve diğer yöntemlerin kıyaslanmasına ait veriler

İyon	Potansiyometri (ppm)	AAS (ppm)	ICP (ppm)	Referans
Cu <sup>2+</sup>	2.83 ± 0.170		2.87	Afkhami vd. (2014)
Cu <sup>2+</sup>	0.382 ± 0.022	0.365 ± 0.013		Yolcu ve Dere (2018)
Zn <sup>2+</sup>	16.53 ± 0.03	16.54 ± 0.02		Singh vd. (2007)
Zn <sup>2+</sup>	0.28 ± 0.03	0.29 ± 0.04		Zamani vd. (2006)
Co <sup>2+</sup>	47.0	48.0		Kumar ve Shim (2009)
Co <sup>2+</sup>	5.30 ± 0.03*	5.28 ± 0.04*	5.29 ± 0.01*	Gupta vd. (2008)
Pb <sup>2+</sup>	4.2 ± 0.1	4.4 ± 0.2		Gupta vd. (2007)
Ni <sup>2+</sup>	31.0 ± 0.05	31.0 ± 0.01		Kumar (2012)
Pb <sup>2+</sup>	0.922 ± 0.02	0.890 ± 0.03		Kamal vd. (2015)
Pb <sup>2+</sup>	30.1 ± 0.4	29.8 ± 0.2		Vlassici vd. (2008)
Cr <sup>3+</sup>	1.47 ± 0.07	1.42 ± 0.05		Zamani ve Sahebnaşagh (2013)
Cr <sup>3+</sup>	2.4 ± 1.0	2.2 ± 0.1		Ganjali vd. (2003)
Hg <sup>2+</sup>	5.73 ± 0.67		5.68 ± 0.32	Ganjali vd. (2015)
Fe <sup>3+</sup>	14.11 ± 0.21	13.73 ± 0.21		Badakhshan vd. (2019)
Ag <sup>+</sup>	0.062 ± 0.3	0.061		Masrounia vd. (2009)

\* Belirtilen değerler mg/ml (ppt) olarak rapor edilmiştir.

Atık sularda uygulama alanı bulan potansiyometrik sensörler ile AAS ve ICP gibi tekniklerden elde edilen verilere ait kıyaslama Tablo 1'de görülmektedir. Potansiyometrik iyon seçici sensörler ve diğer metotlardan elde edilen verilerin uyum içerisinde olduğu görülmektedir.

**Şekil 1.** Sensörlerde iyonofor olarak kullanılan moleküller.



## SONUÇ ve ÖNERİLER

Çevresel uygulamalarda analitik teknikler yoğun bir şekilde kullanılmaktadır. Fakat kullanılan bu tekniklerin maliyetlerinin fazla olması, deneyimli personel gerektirmesi, laboratuvar koşulları gerektirmesi, ön hazırlık gerekliliği, fazla çözücü ve kimyasal kullanımı gibi bazı dezavantajları mevcuttur. Potansiyometrik yöntemler ise bilinen tekniklere göre bahsedilen bu dezavantajlara sahip değildir. Günümüzde yapılan ve bu derlemede sunulan atık su analizlerinde de görüldüğü gibi yapılan çevresel ve diğer birçok çalışmada iyon seçici elektrotlarla elde edilen sonuçlar ile bilinen tekniklerin karşılaştırmaları yapılmış ve sonuçların birbirleriyle uyum içerisinde olduğu bildirilmiştir (Tablo 1). Hem anyonik ve katyonik türlere duyarlı iyon seçici sensörlerin geliştirilmesi için literatürde binlerce çalışma mevcut olup bu çalışmalarda iyon seçici sensörlerin oldukça kolay hazırlanmış, ekonomik olması, basit kullanımı ve analizlerdeki başarısı açık olarak görülmektedir. Sonuç olarak, potansiyometrik iyon seçici elektrotlar ve sensörler analiz edilecek türlerde ve özellikle çevresel analizlerde canlı sağlığı üzerinde kalıcı etkiler bırakabilecek farklı iyonların tayininde başarılı bir şekilde kullanılmaktadır ve gün geçtikçe bu çalışmalara yenileri eklenmektedir.

## KAYNAKLAR

- Afkhami, A., Khoshsafar, H., Madrakian, T. And Shirzadmehr, A. (2014). A new nano-composite electrode as a copper (II) selective potentiometric sensor. *Journal of the Iranian Chemical Society*, 11, 1373-1380. <https://doi.org/10.1007/s13738-014-0406-x>
- Badakhshan, S., Ahmadzadeh, S., Mohseni- Bandpei, A., Aghasi, M. and Basiri, A. (2019). Potentiometric sensor for iron (III) quantitative determination: experimental and computational approaches. *BMC Chemistry*, 13, 131. <https://doi.org/10.1186/s13065-019-0648-x>
- Bagheri, H., Afkhami, A., Shirzadmehr, A., Khoshsafar, H., Khoshsafar, H. and Ghaedi, H. (2013). Novel potentiometric sensor for the determination of Cd<sub>2</sub>Y based on a new nano-composite. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 93(5), 578-591. <http://dx.doi.org/10.1080/03067319.2011.649741>
- Canpolat, Ö ve Uzun S. (2019). Kahramanmaraş Organize Sanayi Bölgesi Atık Sularının Sır Baraj Gölü'nde Meydana Getirdiği Ağır Metal Kirliliğinin Belirlenmesi. *BEÜ Fen Bilimleri Dergisi*, 8 (3), 816-825. <https://doi.org/10.17798/bitlisfen.535940>
- Cunha, C. O., Silva, R. C. R., Amorim, C. G., Jfflnior, S. A., Arafljo, A. N., Montenegro, M. C. B. S. M. and Silva, V. L. (2010). Tetracycline Potentiometric Sensor Based on Cyclodextrin for Pharmaceuticals and Waste Water Analysis. *Electroanalysis*, 22(24), 2967-2972. <https://doi.org/10.1002/elan.201000301>
- Dündar, M. Ş., Altundağ, H., Kaygaldurak S., Şar, V. and Acar, A. (2012). Çeşitli Endüstriyel Atık Sularda Ağır Metal Düzeylerinin Belirlenmesi. *SAÜ Fen Bilimleri Dergisi*, 16(1), 6-12.
- Ensafi, A. A., Meghdadi, S. and Sedighi, S. (2009). Sensitive cadmium potentiometric sensor based on 4-hydroxy salophen as a fast tool for water samples analysis. *Desalination*, 242(1-3), 336-345. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2008.06.002>
- Frag, E. Y. Z., Aglan, R. F. and Mohamed, H. A. (2016). Lanthanum(III) potentiometric sensors based on ethyl benzoyl acetate. *Arabian Journal of Chemistry*, 12, 388-397. <http://dx.doi.org/10.1016/j.arabjc.2016.11.015>
- Ganjali, M. R., Faridbod, F., Davarkhah, N., Shahtaheri, S. J. and Norouzi, P. (2015). All Solid State Graphene Based Potentiometric Sensors for Monitoring of Mercury Ions in Waste Water Samples. *International Journal of Environmental Research*, 9(1), 333-340. <https://doi.org/10.22059/IJER.2015.905>
- Ganjali, M. R., Mizani, F., Salavati-Niasari, M. and Javanbakht, M. (2003). Novel potentiometric membrane sensor for the determination of trace amounts of chromium(III) ions. *Analytical Sciences*, 19(2), 235-238. <https://doi.org/10.2116/analsci.19.235>
- Gupta, V. V., Jain, A. K., Al Khayat, M., Bhargavac, S. K. and Raisoni, J. R. (2008). Electroanalytical studies on cobalt(II) selective potentiometric sensor based on bridge modified calixarene in poly(vinyl chloride). *Electrochimica Acta*, 53, 5409-5414. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2008.02.085>

- Gupta, V. K., Jain, A. K. and Maheshwari G. (2007). Synthesis, Characterization and Pb(II) Ion Selectivity of N,N'-bis(2-hydroxy-1-naphthalene)-2,6-pyridiamine (BHNPD). *International Journal of Electrochemical Science*, 2, 102-112.
- Isildak, Ö., Özbek, O. and Yigit, K. M. (2019). Zinc(II)-selective PVC membrane potentiometric sensor for analysis of  $Zn^{2+}$  in drug sample and different environmental samples. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 1-11. <https://doi.org/10.1080/03067319.2019.1691542>
- Isildak, O., Deligönül, N. and Ozbek, O. (2019). A novel silver(I)-selective PVC membrane sensor and its potentiometric applications. *Turkish Journal of Chemistry*, 43, 1149-1158. <https://doi.org/10.3906/kim-1812-29>.
- Isildak, Ö. ve Özbek, O. (2020). Silver(I)-selective PVC membrane potentiometric sensor based on 5,10,15,20-tetra(4-pyridyl)-21H, 23H-porphine and potentiometric applications. *Journal of Chemical Science*, 132, 29. <https://doi.org/10.1007/s12039-019-1734-2>
- Isildak, Ö. ve Özbek, O. (2020). Application of Potentiometric Sensors in Real Samples. *Critical Reviews in Analytical Chemistry*, 1-14. <https://doi.org/10.1080/10408347.2019.1711013>
- Kadirvelu, K., Thamaraiselvi, K. and Namasivayam, C. (2001). Removal of heavy metals from industrial wastewaters by adsorption onto activated carbon prepared from an agricultural solid waste. *Bioresource Technology*, 76(1), 63-65. [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(00\)00072-9](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(00)00072-9)
- Kamal, A., Tejpal, R., Bhalla, V., Kumar, M. and Mahajan, R. K. (2015). Selective and sensitive lead (II) solid-contact potentiometric sensor based on naphthalene-sulfonamide derivative. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 12, 2567–2578. <https://doi.org/10.1007/s13762-014-0621-0>
- Kanberoglu, G. S., Coldur, F., Topcu, C. and Cubuk, O. (2015). PVC-membrane potentiometric sensor for the determination of Tamoxifen in pharmaceutical formulations. *IEEE Sensors Journal*, 15(11), 6199-6207. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2015.2454053>
- Kopytin, A. V., German, K. E., Zhizhin, K. Y., Zhukov, A. F., Ilyin, E. G. and Zhukova T. V. (2016). Ion selective potentiometric sensor based on single crystalline  $KTiOPO_4$  for determination of  $K^+$ -ions. *Procedia Engineering*, 168, 440-443. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.11.539>
- Kumar, P. (2012). All Solid State Nickel(II)-Selective Potentiometric Sensor Based on an Upper Rim Substituted Calixarene. *Electroanalysis*, 24(10), 2005-2012. <https://doi.org/10.1002/elan.201200228>
- Kumar, P. ve Shim, Y-B. (2009). A novel cobalt(II)-selective potentiometric sensor based on p-(4-n-butylphenylazo)calix[4]arene. *Talanta*, 77, 1057-1062. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2008.08.003>
- Masrournia, M., Zamani H. A., Mohamadzadeh, H., Seyedi, S. M., Ganjali, M. R. and Eshghi H. (2009). A Silver(I) PVC-Membrane Sensor Based on Synthesized Dilaktam Crown Ether. *Journal of the Chilean Chemical Society*, 53(5), 63-67. <http://dx.doi.org/10.4067/S0717-97072009000100015>
- Murali Krishna, I. V. ve Manickam, V. (2017). *Environmental Management: Science and Engineering for Industry*. (1st ed.) USA.
- Rezaei, B., Hadadzadeh, H. and Azimi, A. (2011). Nickel(II) Selective PVC-Based Membrane Sensor Using a Schiff Base. *International Journal of Spectroscopy*, 1-7. <http://dx.doi.org/10.1155/2011/746372>
- Singh, A. K., Mehtab, S., Singh, U. P. and Aggarwal, V. (2007). Tripodal chelating ligand-based sensor for selective determination of Zn(II) in biological and environmental samples. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 388, 1867–1876. <https://doi.org/10.1007/s00216-007-1434-5>
- Topcu, C., Coldur, F., Andac, M., Isildak, I., Senyüz, N. and Bati, H. (2011).  $Ag^+$ -selective poly vinyl chloride membrane electrode based on [N,N-ethylenebis-(3-methoxy-salicylalimine)]. *Current Analytical Chemistry*, 7(2), 136-145. <https://doi.org/10.2174/157341111794814995>
- Topcu, C. (2016). Nikel-Sakkarin Temelli PVC-Membran Karbonat ( $CO_3^{2-}$ ) Seçici Elektrot ve Potansiyometrik Uygulamaları. *Karaelmas Fen ve Mühendislik Dergisi*, 6(2), 283-292. <http://dx.doi.org/10.7212%2Fzkufbd.v6i2.231>
- Uner Bahar, D., Topcu, C., Ozcimen, D. and Isildak, I. (2020). A Novel Borate Ion Selective Electrode Based On Carbon Nanotube-Silver Borate. *International Journal of Electrochemical Science*, 15, 899-914. <https://doi.org/10.20964/2020.01.40>
- Vlascici, D., Fagadar-Cosma, E., Pica, E. M., Cosma, V., Bizerea, O., Mihailescu, G. and Olenic, L. (2008). Free Base Porphyrins as Ionophores for Heavy Metal Sensors. *Sensors*, 8, 4995-5004. <https://doi.org/10.3390/s8084995>
- Yolcu, M. ve Dere, N. (2018). A novel copper selective sensor based on ion imprinted 2-vinylpyridine polymer. *Canadian Journal of Chemistry*, 96, 1027-1036. <dx.doi.org/10.1139/cjc-2018-0178>
- Zamani, A. Z. ve Sahebnaasagh, S. (2013). Potentiometric detection of  $Cr^{3+}$  ions in solution by a chromium(III) electrochemical sensor based on diethyl 2-phthalimidomalonate doped in polymeric membrane. *International Journal of Electrochemical Science*, 8, 3708-3720.



Zamani, A. Z., Ganjali, M. R. and Pooyamanesh, M. J. (2006). Zinc(II) PVC-Based Membrane Sensor Based on 5,6-Benzo-4,7,13,16,21,24-hexaoxa-1,10-diazabicyclo[8,8,8]hexacos-5-ene. *Journal of the Brazilian Chemical Society*, 17(1), 149-155.