

**T.C.  
HARRAN ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**YÜKSEK KİL İÇERİĞİNE SAHİP HARRAN SERİSİ TOPRAKLARINDA  
ELEKTROKİNETİK YÖNTEM KULLANILARAK YAĞ VE GRES  
GİDERİMİ**

**Kerem GÜLPINAR**

**ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**ŞANLIURFA  
2019**



**T.C.  
HARRAN ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**YÜKSEK KİL İÇERİĞİNE SAHİP HARRAN SERİSİ TOPRAKLARINDA  
ELEKTROKİNETİK YÖNTEM KULLANILARAK YAĞ VE GRES  
GİDERİMİ**

**Kerem GÜLPINAR**

**ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**ŞANLIURFA  
2019**

Doç. Dr. Güzel YILMAZ danışmanlığında, Kerem GÜLPINAR'ın hazırladığı “Yüksek Kil İçeriğine Sahip Harran Serisi Topraklarında Elektrokinetik Yöntem Kullanılarak Yağ ve Gres Giderimi” konulu bu çalışma 27.05.2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Harran Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı'nda YÜKSEK LİSANS olarak kabul edilmiştir.

İmza

Danışman : Doç. Dr. Güzel YILMAZ

Üye : Doç. Dr. Deniz UÇAR

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Adem YURTSEVER

**Bu Tezin Çevre Mühendisliği Anabilim Dalında Yapıldığını ve Enstitümüz Kurallarına Göre Düzenlendiğini Onaylıyorum.**

**Doç. Dr. İsmail HİLALİ**  
Enstitü Müdürü

**Bu çalışma HÜBAK Tarafından Desteklenmiştir.**  
Proje No: 18042

**Not:** Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaktan yapılan bildirişlerin, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak gösterilmeden kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

# İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖZET .....	i
ABSTRACT .....	ii
TEŞEKKÜR .....	iii
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	vi
SİMGELER DİZİNİ .....	vii
1. GİRİŞ .....	1
1.1. Toprağın Yapısı ve Önemi .....	3
1.2. Petrol Atık Tipleri ve Bileşimleri .....	4
1.3. Toprakta Petrol Kirliliği .....	5
1.4. Toprak Kirliliği Arıtım Yöntemleri .....	6
1.4.1. Kirleticilerin alıkonmasına yönelik yöntemler .....	6
1.4.1.1. Katılaşma ve kararlı hale getirme .....	6
1.4.1.2. Camlaştırma .....	6
1.4.1.3. Bariyerlerle alıkoyma .....	7
1.4.1.4. Hidrodinamik alıkoyma .....	7
1.4.2. Kirleticilerin yerinde arıtımını sağlayan yöntemler .....	7
1.4.2.1. Toprağın yıkanması .....	7
1.4.2.2. Hava enjeksiyonuyla vadoz bölgede kirlitici arıtımı .....	8
1.4.2.3. Toprak buhar ekstraksiyonu .....	8
1.4.2.4. Biyolojik indirgeme .....	8
1.4.2.5. Hava enjeksiyonuyla yeraltı suyunda kirlitici arıtımı .....	8
1.4.2.6. Reaktif bariyerler .....	9
1.4.2.7. Elektrokinetik arıtım .....	9
1.4.2.8. Bitkisel arıtım (Fitoremediasyon) .....	9
1.5. Elektriksel Çift Tabaka ve Zeta Potansiyeli .....	10
1.6. Elektrokimya .....	12
1.6.1. Elektroliz .....	12
1.6.2. Elektrolizin uygulama alanları .....	13
1.6.3. Elektroliz yasaları .....	14
1.7. Elektrokinetik Arıtım .....	15
1.7.1. Elektrozmoz .....	18
1.7.2. Elektroforez .....	19
1.7.3. Elektromigrasyon .....	19
1.7.4. Elektrokinetik arıtımın avantaj ve dezavantajları .....	21
1.7.5. Elektrokinetik arıtımın uygulandığı kirlitici türleri .....	21
1.7.6. Elektrokinetik arıtımın uygulandığı zemin türleri .....	21
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR .....	22
3. MATERYAL ve YÖNTEM .....	26
3.1. İlin Coğrafi Özellikleri .....	26
3.2. Toprak Numunelerinin Alınması ve Hazırlanması .....	27
3.3. Prosesin Kurulumu .....	34
3.4. Kirlenmiş Toprak Örneklerinin Hazırlanması .....	37
3.5. Prosesin Çalışabilirliğinin Test Edilmesi (Ön Çalışma) .....	38
3.6. Prosesin Test Edilmesi Sonrası Ortaya Çıkan Problemler .....	39
3.7. Analiz Metodları .....	40
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA .....	43
4.1. Sıcaklık Ölçümleri .....	44
4.2. pH Ölçümleri .....	45
4.3. ORP Ölçümleri .....	46
4.4. İletkenlik Ölçümleri .....	47
4.5. TKM-UKM Ölçümleri .....	49
4.6. Yağ ve Gres Ölçümleri .....	54
5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER .....	63

KAYNAKLAR .....	65
ÖZGEÇMİŞ .....	69



## ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

### YÜKSEK KİL İÇERİĞİNE SAHİP HARRAN SERİSİ TOPRAKLARINDA ELEKTROKİNETİK YÖNTEM KULLANILARAK YAĞ VE GRES GİDERİMİ

Kerem GÜLPINAR

Harran Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Güzel YILMAZ  
YIL: 2019, Sayfa: 70

Artan nüfus, globalleşen dünya enerjiye olan ihtiyacı arttırmaktadır. Bu enerji ihtiyacının karşılanmasında en büyük enerji kaynağı olarak yerini hala koruyan fosil yakıtlar (petrol, doğalgaz, kömür v.b) yanlış faaliyetler sonucu antropojenik kaynaklı birçok kirliliği beraberinde getirmektedir. Antropojenik faaliyetler sonucu kirlenmiş topraklar birçok tehlikeli kimyasalı bünyesinde barındırır. Bu kirlenmelere maruz kalmak insan ve çevre sağlığı açısından büyük risk taşımaktadır. Son yıllarda topraktaki bu kirlenmelerin gideriminde toprak yıkama, camlaştırma, biyolojik indirgeme bitkisel arıtım (fitoremediasyon) gibi birçok toprak iyileştirme teknolojisi üzerinde çalışılmış ve uygulanmıştır. Bir elektrokinetik iyileştirme (EKR) işlemi olan elektroremediasyon da bu toprak iyileştirme teknolojilerinden biridir. Yüksek killi topraklarda doğru akım (DC) uygulayarak çok düşük akım yoğunluklarında bile organik ve inorganik kirlenmelerin uzaklaştırılması gibi birçok avantaj sağlayan fizikokimyasal teknoloji olarak sınıflandırılmıştır. Yüksek kil içeriğine sahip Şanlıurfa ili Harran Ovası Harran Toprak Serisi toprak örneğinde elektrokinetik arıtım teknolojisi ile Yağ ve Gres giderimini amaçlayan bu çalışmada %100 doygunlukta hazırlanmış Yağ ve Gres numunesi için giriş Yağ ve Gres konsantrasyonu  $0.108 \pm 0.016$  g/g (5ml/40g), %50 doygunlukta hazırlanmış Yağ ve Gres numunesi için giriş Yağ ve Gres konsantrasyonu  $0.054 \pm 0.0064$  g/g (2.5ml/40g) olarak verilmiştir. En yüksek Yağ ve Gres giderimi 20V/3A %50 kirlilik konsantrasyonunda 1.gün %45,6 giderim ile gerçekleşmiştir. Ayrıca giriş pH'ı 5.95 seviyelerinde ölçülmüş olup anot hücrelerinde bu değer 2.0 seviyelerine kadar düşmüştür. Katot hücrelerinde ise pH 12.5 seviyelerine kadar yükselmiştir. Anot ve katot hücrelerinde Akım Yoğunluğu, pH, ORP (Oksidasyon Redüksiyon Potansiyeli) ve EC (İletkenlik) parametreleri ölçümleri alınmış, bu parametrelerin zamanla değişimi incelenmiştir. Ayrıca organik ve inorganik madde miktarını takip etmek için TKM ve UKM analizleri yapılmıştır.

**ANAHTAR KELİMELELER:** Elektrokinetik arıtım, elektroremediasyon, yağ ve gres giderimi, yüksek killi topraklar

## **ABSTRACT**

**MSc Thesis**

### **OIL AND GREASE REMOVAL USING ELECTROKINETIC METHOD IN HARRAN SERIES SOILS WITH HIGH CLAY CONTENT**

**Kerem GÜLPINAR**

**Harran University  
Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Department of Environmental Engineering**

**Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Güzel YILMAZ  
Year: 2019, Page: 70**

The increasing population and the globalization of the world, increase the need for energy. The fossil fuels (oil, natural gas, coal, etc.), remain place as energy source still largest in meeting of this energy need. Fossil fuels (oil, natural gas, coal, etc.) causes many anthropogenic sourcing pollution as a result of incorrect activities. Polluted soils as a result of anthropogenic activities contain many hazardous chemicals. Exposure to these pollutants carries a high risk for human and environmental health. In recent years, many soil remediation technologies have been studied and applied in the removal of these pollutants in the soil. One of these soil remediation technologies is "electroremediation" electrokinetic improvement (EKR) process. It is classified as physicochemical technology which provides many advantages such as removal of organic and inorganic pollutants even at very low current densities by applying direct current (DC) in high clay soils. In this study, removal of oil and grease in Harran Soil Series soil sample (Harran Plain, Sanliurfa Province), aimed to remove oil and grease with electrokinetic treatment technologies. Input for oil and grease sample oil and grease concentration  $0,108 \pm 0,016$  g/g (5ml / 40g), 50% saturation mixture input for oil and grease mixture oil and grease concentration  $0,054 \pm 0,0064$  g/g (2.5ml / 40g). Highest oil and grease removal was achieved with 1st day corresponding to 45.6% removal with 20V/3A 50% . In the anode cell, the pH decreased to pH 2 levels. In the cathode cell, the pH increased to 12.5 levels. In anode and cathode cells, current density, pH, ORP (Oxidation Reduction Potential), EC (Conductivity) parameters were measured and the changes of these parameters over time were investigated. In addition, TKM and UKM analyzes were conducted to monitor the amount of organic and inorganic substances.

**KEYWORDS:** Electrokinetic treatment, electrorremediation, oil and grease removal, high clay soils.

## TEŞEKKÜR

Bu çalışma sırasında bilgi, deneyim ve desteğini benden esirgemeyen, değerli görüş ve düşünceleri ile yol gösteren, bu çalışmanın oluşmasında en büyük paya sahip danışmanım Sayın Doç. Dr. Güzel YILMAZ'a tüm samimiyetimle teşekkür ederim. Çalışma süresince bana destek olan, yardımlarını ve zamanını esirgemeyen kıymetli hocam Sayın Doç. Dr. Deniz UÇAR'a teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca analiz sürecimde yardımlarını esirgemeyen saygıdeğer hocam Sayın Dr. Öğr. Üyesi Sema KARAKAŞ DİKİLİTAŞ'a teşekkürlerimi sunarım. Çalışmanın her anında yanımda olan ve desteklerini esirgemeyen Çevre Mühendisliği Bölümü Lisans Öğrencisi Bedia ÇALIŞ'a verdiği emeklerinden ötürü tüm içtenliğimle teşekkür ederim. Ayrıca çalışmanın sürdürülmesinde maddi manevi desteklerini esirgemeyen arkadaşlarım Sayın Tülay YILMAZ, Müjgan YILDIZ, Yakup BAĞCI ve Yakup ÇAKMAK'a teşekkürlerimi sunarım. En önemlisi bu noktaya gelmemde maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen bana yol gösteren aileme saygı ve teşekkürlerimi sunarım.



## ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa No
Şekil 1.1. Toprağın dört esas yapı maddesi .....	3
Şekil 1.2. Elektriksel çift tabaka ve zeta potansiyeli(Technical Brief, 2012).....	10
Şekil 1.3. Elektroliz İşleminin Şematik Gösterimi .....	13
Şekil 1.4. Doğru akım altında killi topraklarda oluşan hareketler ile asit ve baz cephelerinde gerçekleşen işlemler (Lee, 2000).....	18
Şekil 1.5. Elektrik yüklü çift tabakanın kil minerali yüzeyinde oluşumu(Iyer, 2001; Mosavat ve ark., 2012) .....	20
Şekil 3.1. Şanlıurfa ilinin genel görünümü (Anonim, 2017) .....	26
Şekil 3.2. Şanlıurfa ili Harran Ovası Harran Toprak Serisi Şekil-A'da, örnekleme yapılan noktanın harita üzerindeki görünümü Şekil-B'de gösterilmiştir. ....	27
Şekil 3.3. Şekil-A ve Şekil-B'de toprak örneklerinin alındığı noktadan bir görünüm .....	28
Şekil 3.4. Şekil-A ve Şekil-B'de 2mm'lik elekler ile elenip ve kurutulmuş toprak örnekleri .....	28
Şekil 3.5. 2 mm elekten geçirilen toprak numunesinin görünümü .....	29
Şekil 3.6. Şekil-A'da vakum pompa düzeneği, Şekil-B'de saturasyon işlemi ardından vakum pompa düzeneğinden filtre edilen numuneler, Şekil-C'de vakum pompasının görünümü .....	29
Şekil 3.7. Toprak tarımlarında kullanılan hassas terazi (AND GR-200).....	30
Şekil 3.8. Şekil-A'da süzme düzeneği, Şekil-B'de vakum pompa düzeneğinden filtre edilen numunelerin görünüm .....	30
Şekil 3.9. Tekstür analizinin görünümü .....	31
Şekil 3.10. Kireç tayininin bir görünümü .....	32
Şekil 3.11. Şekil-A'da balon jöjelere filtre edilen amonyum asetat ile yıkanmış numune, Şekil-B'de sodyum asetat ilavesi sonrası santrifüj işleminin görünümü, Şekil-C'de santrifüj kaplarına alınan toprak numuneleri ve hazırlanan kimyasallar, Şekil-D'de çalkalayıcıdan bir görünüm .....	33
Şekil 3.12. Şekil A'da kurulum aşamasında prosesin önden bir görünümü, Şekil B'de yandan bir görünümü .....	34
Şekil 3.13. Elektrokinetik prosesin genel görünümü.....	35
Şekil 3.14. 150 x 200 mm ebatında grafit elektrot .....	36
Şekil 3.15. ETC 305D DC güç kaynağı .....	36
Şekil 3.16. Ön çalışmadan bir görünüm .....	38
Şekil 3.17. A-Anot bölmesi numunesi, B-Katot bölmesi numunesi.....	39
Şekil 3.18. A-Thermolyne Furnace 48000 kül fırınının görünümü, B- MEMMERT UN110 etüv görünümü .....	40
Şekil 3.19. WTW Multi 3620 IDS marka cihazın görünümü.....	41
Şekil 3.20. FOSS Soxtec 2050 marka yağ ve gres tayin cihazı.....	41
Şekil 4.1. Reaktörün çalışma esnasındaki görünümü .....	43
Şekil 4.2. Sıcaklık değerlerinin zamana bağlı değişimi.....	44
Şekil 4.3. pH miktarının farklı konsantrasyonlarda voltaj ve zamana bağlı değişimi gösterilmiştir. ....	45
Şekil 4.4. ORP (Oksidasyon Redüksiyon Potansiyeli) parametresinin farklı konsantrasyonlarda voltaj ve zamana bağlı değişim grafiği gösterilmiştir.....	46
Şekil 4.5. EC (Elektriksel İletkenlik) parametresinin farklı konsantrasyonlarda, voltaj ve zamana bağlı değişim grafiği .....	47
Şekil 4.6. Saf toprak, %100 konsantrasyon ve %50 konsantrasyon'da yapılan çalışmaların TKM giderimleri .....	49
Şekil 4.7. TKM parametresinin farklı konsantrasyonlarda gerilime bağlı giderimi .....	50
Şekil 4.8. Saf toprak, %100 konsantrasyon ve % 50 konsantrasyon'da yapılan çalışmaların UKM giderimleri.....	51
Şekil 4.9. UKM parametresinin farklı konsantrasyonlarda gerilime bağlı giderimi.....	53

Şekil 4.10. Saf toprak, %100 konsantrasyon ve % 50 konsantrasyon'da yapılan çalışmaların Yağ ve Gres giderimleri .....	54
Şekil 4.11. Yağ ve Gres parametresinin farklı konsantrasyonlarda gerilime bağlı giderimi .....	56
Şekil 4.12. Zamana bağlı akım yoğunluğu grafiği .....	57
Şekil 4.13. Zamana bağlı enerji tüketimi ve maliyet grafiği .....	58



## ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa No

Çizelge 1.1. EK tedavi arıtımını etkileyen faktörler, özellikleri ve toprak durumu (Oh, E., ve Chai, G. (2012).....	17
Çizelge 1.2. EOA üzerine etki eden faktörler.....	19
Çizelge 1.3. Elektrokinetik arıtımın avantajları ve dezavantajları .....	21
Çizelge 3.1. Temiz toprak örneğinin özellikleri .....	31
Çizelge 3.2. Prosesin işletilmesinde kullanılan malzeme ve özellikleri .....	37
Çizelge 3.3. Kullanılan dizel motor yağının özellikleri.....	37
Çizelge 3.4. Prosesin test edilmesi sonrası ortaya çıkan problemler ve çözüm önerileri .....	39
Çizelge 4.1. 10V 3A Saf Toprak, %100 ve %50 Konsantrasyonda kirletilmiş toprak örneklerinin analiz sonuçları .....	60
Çizelge 4.2. 20V 3A Saf Toprak, %100 ve %50 Konsantrasyonda kirletilmiş toprak örneklerinin analiz sonuçları .....	61
Çizelge 4.3. 30V-3A Saf Toprak, %100 ve %50 Konsantrasyonda kirletilmiş toprak örneklerinin analiz sonuçları.....	62

## SİMGELER DİZİNİ

A	Amper
DC	Doğru Akım
EC	Elektriksel İletkenlik
EOA	Elektroosmotik Akış
KDK	Katyon Değişim Kapasitesi
kWh	Kilowatt saat
TKM	Toplam Katı Madde
UKM	Uçucu Katı Madde
V	Voltaj
ζ	Zeta Potansiyeli



## 1. GİRİŞ

Nüfusa bağlı olarak insan ihtiyaçlarının artması ile beraber hızla büyüyen sanayileşme, fosil yakıtların bilinçsiz kullanımı kirleticilerin doğada yayılımını hızlandırdığı bilinmektedir. Antropojenik faaliyetlerle kirlenmiş topraklar birçok tehlikeli kimyasal bünyesinde barındırabilir(Gill ve ark., 2014; Hassan ve Mohamedelhassan, 2012). Bu kirleticilere maruz kalmak insan ve çevre sağlığı açısından büyük riskler taşımaktadır.

Kil gibi çok ince yapıları topraklarda, düşük geçirgenlik ve yüksek emme kapasitesinden dolayı geleneksel yöntemlerle işlem yapmak çok zordur. Bu durumlarda, elektrokinetik iyileştirme işlemi olarak da bilinen elektrotremediasyon (EKR), yüksek killi topraklarda doğru akım (DC) uygulayarak çok düşük akım yoğunluklarında bile organik ve inorganik kirleticilerin uzaklaştırılması gibi birçok avantaj sağlayan fizikokimyasal teknoloji olarak sınıflandırılmıştır (Vázquez ve ark., 2007). Elektrokinetik teknolojiler kirleticileri topraktan uzaklaştırmak için iyi bir alternatiftir. Çevre güvenliği, yüksek verimli ve çok çeşitli kirleticilere uygulanabilirliği bu teknolojinin ana avantajlarıdır(Muhsina ve ark., 2015). Diğer bir avantajı ise klasik stabilizasyon yöntemlerinin uygulanamadığı bir durum olan, zemin özellikleri sebebiyle zarar görmüş veya zarar görmesi olası, mevcut yapıların altında uygulanabilir olmasıdır(Abdullah ve Al-Abadi, 2010). EKR genellikle toprak içerisinde kontamine olmuş kirleticileri gidermek için kullanıldığı bilinmektedir. Bu kirleticiler toplam petrol hidrokarbonları (TPH), ağır metaller, klorlu organik bileşikler, ve çok halkalı aromatik hidrokarbonlar (PAH) şeklinde gruplandırılabilir(Hassan ve Mohamedelhassan, 2012).

2017 yılı için kayda geçmiş dünya petrol rezervi 1.696,6 milyar varil olarak açıklanmıştır. Petrol rezervinin 807,7 milyar varili (%47,6) Orta Doğu ülkelerinde, 330,1 milyar varili (%19,5) Güney ve Orta Amerika ülkelerinde, 226,1 milyar varili Kuzey Amerika ülkelerinde (%13,3) yer almaktadır. 2017 yılında dünya petrol üretimi 97,4 milyon varil/gün'e ulaşmış ve birincil enerji kaynakları arasında

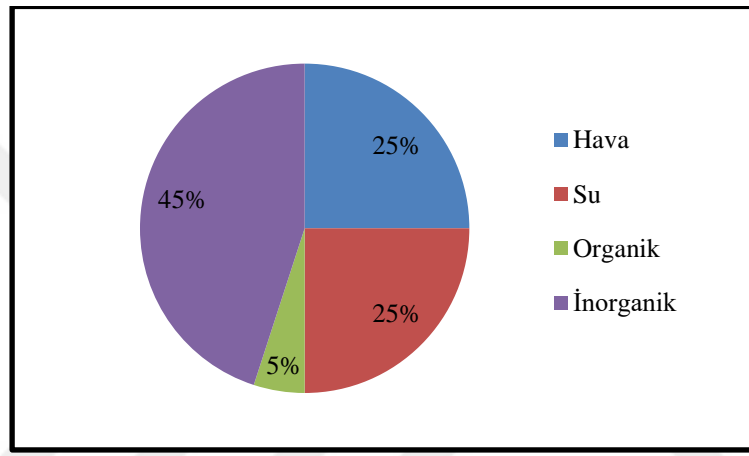
stratejik bir konuma sahip olan ham petrol 2017 yılı itibarıyla dünya enerji ihtiyacının %33,7'sini karşılamıştır. Dünya üretilebilir doğal gaz ve petrol rezervlerinin yaklaşık %70'lik kısmı ülkemizde yer almaktadır(Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2019). Dünya petrol üretiminin 97,4 milyon varil/gün'e ulaştığı böyle yüksek bir üretimde petrol sızıntularından kaynaklanan kirlilik kaçınılmazdır.

Petrol kirliliği, çevre için ciddi bir tehdittir ve toprak için tehlikeli bir kirletici olarak kabul edilir. Petrol kirliliği ihtimali, petrol arama, nakliyesi ve işlenmesi sırasında meydana gelmektedir. Son yıllarda, tüm dünyada birçok toprak iyileştirme teknolojisi çalışılmış ve uygulanmıştır(Muhsina ve ark., 2015). Elektrokinetik de bu iyileştirme teknolojilerinden biridir. Elektrokinetik arıtım teknolojilerinin mantığı basit bir pil düzeneğine benzer bir şekilde çalışmaktadır. Elektrokinetik arıtım prosesinde toprağa yerleştirilen elektrodlar arasına düşük yoğunluklu doğru akım (DC) uygulanmasıyla gerçekleştirilir(Hassan ve Mohamedelhassan, 2012). Anyonlar proses içerisinde pozitif yüklü elektroda doğru yol alırken, katyonlar ise negatif yüklü elektroda doğru ilerlerler(Ferrarese ve Andreottola, 2010; Virkutytea ve ark., 2002).

Bu çalışma yüksek kil içeriğine sahip Şanlıurfa ili Harran Ovası Harran Toprak Serisi topraklarından alınan numunelerin elektrokinetik yöntem ile analizini kapsamaktadır. Çalışmada Şanlıurfa Kısas köyü Apalı Mevkii'den alınan toprak numuneleri belli oranda petrol (dizel motor yağı) ile kirlenmiş olup kirlenmiş toprak numunelerinin Elektrokinetik işlem uygulanarak yağ ve gres giderimi amaçlanmıştır. Sisteme 3 ayrı gerilim (10V-20V-30V) uygulanmış olup anot ve katot hücrelerinde Akım Yoğunluğu, pH, Oksidasyon Redüksiyon Potansiyeli (ORP) ve Elektriksel İletkenlik (EC) parametreleri ölçümleri alınmış, bu parametrelerin zamanla değişimi incelenmiştir. Ayrıca organik ve inorganik madde miktarını takip etmek için Toplam Katı Madde (TKM) ve Uçucu Katı Madde (UKM) analizleri yapılmıştır.

### 1.1. Toprağın Yapısı ve Önemi

Toprak faktörünü tanımlarsak, kayaların ve organik materyallerin çeşitli çaptaki ayrışma ve parçalanma ürünlerinden ortaya çıkan içerisinde geniş canlılar alemini barındıran ve bitkilere durak ve besin kaynağı görevi gören maddelere verilen isimdir. Toprak, kırılmış kaya ve minerallerin, canlı organizmaların ve humus adı verilen çürüyen organik maddelerin bir karışımıdır. Humus karanlık, yumuşak ve besin bakımından zengindir. Toprak ayrıca hava ve su içerir.



Şekil 1.1. Toprağın dört esas yapı maddesi

Yeryüzünün sadece ¼'ü karalarla kaplıdır. Bu alanların bir kısmı dağlık, çöl, çoraklık vb doğal kısıtlılığa sahipken bir kısmı da kentleşme ve altyapı (endüstriyel yapılar, yollar, havaalanları vb) alanlar nedeniyle kullanılmaktadır. Bu nedenle bu alanların çok az bir miktarı tarımsal üretime katkı sağlamaktadır. Toprak tekstürü, dinamik bir yapıda olup son derece yüksek pH tamponlama kapasitesine sahiptir. Burada en önemlisi toprak adını verdiğimiz bu yapının kaybedilmesi durumunda 1 cm kalınlığında toprağın oluşmasının asırlar süreceği yani kısa vadede telafisinin mümkün olmadığıdır. Çevrenin önemli olan diğer unsurlarından hava ve su kirliliğinde ise kirliliğin ortadan kaldırılması topraktakine oranla çok daha kolay ve mümkündür. Günümüzde topraktaki kirliliğin giderim için yapılan birçok pilot ölçekli çalışma mevcuttur. Bu çalışmalar neticesinde toprakta kirliliğin gideriminin artık bir problem olmaktan çıkacağı ve günümüz teknolojileri ile de bu problemin tamamen giderileceği düşünülmektedir.

## 1.2. Petrol Atık Tipleri ve Bileşimleri

Petroleum Latince’de taş anlamı taşıyan “petro” ve yağ anlamına gelen “oleum” sözcüklerinin birleşiminden türemiştir. İnsanlar sınırlı enerji kaynaklarını artırabilmek için yer altından petrol çıkartmışlardır. Petrol işlendikten sonra petrol ürünleri olan benzin, gazyağı, dizel ve plastiğe dönüşür. Petrol içeriği çoğunlukla hidrokarbonlar, azot, kükürt, oksijen ve az miktarda metal elementlerinin varlığından oluşmaktadır. Bileşim çıkarıldığı bölgeye göre değişiklik göstermektedir. İçeriğindeki hidrokarbonların oranının değişiklik göstermesi ile oluşan kimyasal farklılık petrolün karakteristiğini belirler. Bu nedenle çeşitli özgül ağırlıklara ve yanma noktalarına sahip olurlar. Petrol viskozite, yoğunluk, hacim, fluoresans, renk ve koku, kalori değeri ve alevlenme noktası gibi fiziksel özellikleri barındırır.

Hidrokarbonla kirlenmiş topraklar genellikle ham petrol üretim sahaları, petrol üretim sahalarında sondaj kulelerine bitişik kazılmış yedek çukurlar olarak da bilinen petrol çamur çukurlarından (mud pit) kaynaklanan kirlilik, taşıma ve depolama alanlarında sızma veya dökülme sonucu meydana gelmektedir. Boru hatlarındaki sızıntılar, antropojen kaynaklı nedenler, depolama özelliklerindeki yeraltı depolarından yada doğal kaynaklı taşınması sonucu toprağa karışmaktadır. Rafine işlemleri esnasında toplanan petrol atık çamurları o bölgedeki tarımsal alanlara yayılmaktadır.

Rafine edilmiş Dizel yakıt, Gazolin, ve Jet yakıtları gibi çoğu yakıt türleri taşıma ve depolama sırasında istenmeyen kazalar neticesinde toprakların kirlenmesine neden olmaktadır. Petrol ürünlerinin taşındığı toprak altı petrol boru hatları da toprak kirliliğine neden olan başlıca etkenlerden biridir. Ortaya çıkan bu sorun boru hatlarındaki kırılmalar, patlamalar veya zamanla oluşan deformasyona bağlı delikler yoluyla olabilmektedir. Benzer şekilde petrol istasyonları ve askeri alanlarda bulunan yer altı depolama tanklarından sızan petrol ve türevleri yakın toprakları ve suları kirletmektedirler (Salanitro, 2001).

Ham petrol içeriğine sahip farklı hidrokarbon bileşiklerinden bazıları belirtecek olursak; aklanlar, izo-alkanlar, sikloalkanlar, poliaromatik yada

polinükleer aromatik hidrokarbonlar (PAHs) monoaromatikler (toluen, benzen, etil benzen, x-elen- BTEX) ve sülfür, nitrojen yada oksijen içerikli polarlardır. Petrolle kirlenmiş bir toprağın geniş kapsamlı bozunma derecesi büyük ölçüde ham petrolün veya yakıtın cinsine yani karakterine bağlıdır. Örneğin yüksek moleküler ağırlıklı kompleks bir hidrokarbon bileşiği ile kirlenmiş bir toprağın bioremediasyonu, düşük moleküler ağırlıklı kolay degrade olabilir dizel yakıtla etkilenmiş bir toprağa göre daha zordur (Yaron ve ark., 1996).

### 1.3. Toprakta Petrol Kirliliği

Toprak kirliliği katı sıvı ve radyoaktif atıklardan dolayı toprağın fiziksel ve kimyasal yapısının bozulmasıdır. Kirlenmiş toprakta birçok organik veya inorganik kirletici madde bulunabilir. Bakır (Cu), çinko (Zn), demir (Fe), manganez (Mn), molibden (Mo), nikel (Ni), kobalt (Co) gibi birçok metal türü canlıların büyüme ve gelişimlerinde önemli derecede rol oynayan mikro besin elementleri iken arsenik (As), civa (Hg), kadmiyum (Cd) ve kurşun (Pb) gibi bazı ağır metaller ise canlıların gelişimi için zararlı kabul edilen elementlerdir. Bunların yanında petrol ürünleride (yakıtlar, yağlar, solventler vs.) toprakta en çok rastlanan kirletici maddelerin başında gelmektedir. Petrol gibi hidrokarbon bileşikleriy yaşam için önemlidir. Doğal olarak insanlar için en faydalı formlarda oluşmadıkları için tehlikeli arz edebilirler. Yakıt ve yağlama yağı dökülmeleri bugüne kadar önemli bir çevresel tehlike haline gelmiştir. Çevrenin petrol hidrokarbonlarıyla kirlenmesi, birçok ülke için ciddi problemler yaratmaktadır. Kirlenmiş toprağın işlenmesi için genellikle fizyokimyasal ve biyolojik arıtma kullanılmaktadır. Fizyokimyasal işlemler yakma, termal desorpsiyon, ocak, çimento ocağı, çözücü ekstraksiyon ve toprak doldurma vs.

Petrolün toprağa karışması boru hatlarındaki sızıntılar, antropojen kaynaklı nedenler, depolama özelliklerindeki yeraltı depolarından yada doğal kaynaklı taşınması sonucu olmaktadır. Petrol kirliliği uzun dönemlerden beri birçok habere konu olan ve yüksek toksisitesinden dolayı canlı yaşamı ve ekolojik dengenin devamlılığı için büyük risk taşıyan ciddi bir çevre sorunudur.

#### 1.4. Toprak Kirliliği Arıtım Yöntemleri

Toprak kirliliği kontrol yöntemleri olarak Mulligan (1995), tarafından kirlenmiş topraklar için yapılması gereken bu dört seçenek önerilmektedir.

- 1- Kirleticiyi olduğu haliyle bırakmak, kirlenmiş bölgenin kullanımını yasaklamak.
- 2- Kirleticiyi bölge içinde immobilize etmek ve bölgeyi sürekli izleyerek diğer bölgelere geçişi kontrol altında tutmak.
- 3- Kirlenmiş toprağı uzaklaştırarak özel bir bertaraf sahasında depolamak.
- 4- Toprağı bölge içinde yani yerinde (in situ) veya bölge dışında temizlemek (ex situ).

##### 1.4.1. Kirleticilerin alıkonmasına yönelik yöntemler

Katılaştırma ve kararlı hale getirme, camlaştırma, bariyerlerle alıkoyma, hidrodinamik alıkoyma olarak sıralanmaktadır.

###### 1.4.1.1. Katılma ve kararlı hale getirme

Katılma / stabilizasyon arıtma işlemleri için genel yaklaşım, su, çimento veya zift, polietilen ve diğer poliolefinler, parafinler ve sülfür çimentoları gibi termoplastik reçine. gibi organik bağlayıcıların kirli topraklara karıştırılması veya enjekte edilerek atık etrafında kristalimsi, camsı veya polimerik bir çerçeve oluşturulması işlemini içerir(Evanko ve Dzombak, 1997).

###### 1.4.1.2. Camlaştırma

Çamlaştırma işlemi kirlenmiş bir zemindeki kirleticileri hareketsiz bırakmak veya tamamen yok edilmesi için uygulanan termal bir prosestir (EPA, 1992). Bu işlem ile zemine yerleştirilmiş yüksek ısı ve aşınmaya dayanıklı elektrotlara elektrik akımı yüklenerek elektrotlar arasındaki sıcaklık farkı zamanla yaklaşık olarak 1600-2000°C' ye kadar yükseltilerek zemin eritilir (Mulligan ve ark., 2001). Ani soğuma

sonrası inorganik materyallerin çoğu (radyonükleidler, fizyon ürünleri, metaller ve diğer inorganik kimyasallar) kristal yapı içerisinde hareketsizleşirken, organik maddelerde pirolize uğrayarak yok olmaktadır (Mulligan, 2001; Sikdar, 1998).

#### 1.4.1.3. Bariyerlerle alıkoyma

Arıtma duvarları, su, yeraltında reaktif madde içeren geçirgen hendekler boyunca akarken hedef çözeltileri parçalayarak, dönüştürerek, çökelterek veya adsorbe ederek kirletici maddeleri yer altı suyundan uzaklaştırır (Vidic ve Pohland, 1996). Geçirgen bir reaktif perde oluşturmak için bentonit veya çimento karışımları kullanılmaktadır.

#### 1.4.1.4. Hidrodinamik alıkoyma

Sistem bir tek pompaj ve enjeksiyon kuyusuyla uygulanabileceği gibi iki pompaj ve iki enjeksiyon kuyusu ile de uygulanabilmektedir Bu işlem yeraltısuyu akım ağlarının kirletici bulutuna doğru yöneltilecek bulutun hareketinin sınırlandırılması olarak ifade edilebilir(Fetter, 1993).

### 1.4.2. Kirleticilerin yerinde arıtımını sağlayan yöntemler

Toprağın yıkanması, elektrokinetik arıtım, hava enjeksiyonuyla vadoz bölgede kirletici arıtımı, toprak buhar ekstraksiyonu, biyolojik indirgeme, hava enjeksiyonuyla yeraltı suyunda kirletici arıtımı, reaktif bariyerler, bitkisel arıtım (Fitoremediasyon) olarak sıralanmaktadır.

#### 1.4.2.1. Toprağın yıkanması

Toprak yıkama, topraktaki kirleticilerin toprak matriksinden yıkama çözeltilisi (şelatlayıcı maddeler ya da asitler) ile toprağa uygulanmasıyla çözünür hale getirilip topraktan ağır metal giderimini yapıldığı işlemdir. EDTA toprak yıkama yönteminde yaygın olarak kullanılmaktadır(Peters, 1999).

#### 1.4.2.2. Hava enjeksiyonuyla vadoz bölgede kirletici artımı

Kirlenmiş bir zeminde bulunan klorlanmış çözücüler, petrol hidrokarbonları, bitki koruyucuları, bazı pestisitler ve diğer organik kimyasalların ortama düşük yoğunluklu hava verilmesiyle uzaklaştırılması işlemidir. Enjeksiyonla verilen hava burada biyolojik parçalanmayı sağlamasının yanı sıra O<sub>2</sub>'nin kabarcıkları tanecikler arasında bulunan kirleticileri bünyesine alarak yüzeye taşınmakta (uçucu organik maddeleri ve CO<sub>2</sub>) ve burada konumlandırılmış gaz toplama ekipmanları ile gaz artımına gönderilmektedir(Altın, 2004).

#### 1.4.2.3. Toprak buhar ekstraksiyonu

Toprak buhar ekstraksiyonunda kirletici, zemin içerisine enjekte edilen havanın kirletici buharıyla beraber vakum ventilleri kullanılarak vakumlanması ile ortamdaki uzaklaştırılmaktadır (Kirtland ve Aelion, 2000). Genellikle vadoz zonda bulunan uçucu ve yarı uçucu organik maddelerin gideriminde kullanılan bir yöntemdir(EPA, 1990).

#### 1.4.2.4. Biyolojik indirgeme

Yöntem, toprakta veya yeraltısuyunda bulunan organik maddelerin mikroorganizmalar kullanılarak (bakteri, fungi ve diğer organizmalar) parçalanmasına dayanmaktadır. Bu işlemde kirlenmiş bölgede biyolojik aktivitenin maksimuma getirilmesi için oksijence zenginleştirilmiş ve içerisine nütrient eklenerek hazırlanmış sıvılar yüzeye serpilmekte veya enjekte edilmektedir. Çoğunlukla petrol hidrokarbonları pestisitler, solventler, bitki koruyucuları ve diğer organik kimyasallar yoluyla kirlenmiş zeminlere uygulanmaktadır (EPA, 1994).

#### 1.4.2.5. Hava enjeksiyonuyla yeraltı suyunda kirletici artımı

Kirlenmiş bir akiferde bulunan yarı uçucu veya uçucu organik maddelerin ortama kabarcık halinde hava verilmesiyle giderimi olarak tanımlanır. Yeraltısuyunda bulunan kirleticiler kabarcık bünyesine alınarak yüzeye taşınmakta

ve burada konumlandırılmış edilmiş gaz toplama ekipmanları ile gaz arıtımına gönderilmektedir. Ayrıca sistemde kısmen de olsa biyolojik arıtım da gözlenmektedir. Yöntem yeraltısuyunda ki hem petrol hidrokarbonlarının, hem de klorlu bileşiklerin arıtımında ve kullanılabilir (Bass ve ark., 2000).

#### 1.4.2.6. Reaktif bariyerler

Reaktif bariyerler, geçirgen ve kirleticiyi adsorplayabilen veya çözünürlüğü düşük kompleks yapılara dönüştürülebilir bir yöntem olup günümüzde en çok kullanılan bariyer malzemeleri doğal bentonitler, alüminyum ile pilare edilmiş killer, doğal zeolitler, sıfır değerlikli demir, aktif karbon ve sıfır değerlikli bimetaller kullanılmaktadır. Ayrıca bir çok inorganik (metaller ve sülfat ve nitrat gibi anyonlar) ve organik (TCE ve PCB'ler gibi) maddeler yeraltısuyundan uzaklaştırılabilir (Czurda ve Haus, 2002; Blowes ve ark., 2000).

#### 1.4.2.7. Elektrokinetik arıtım

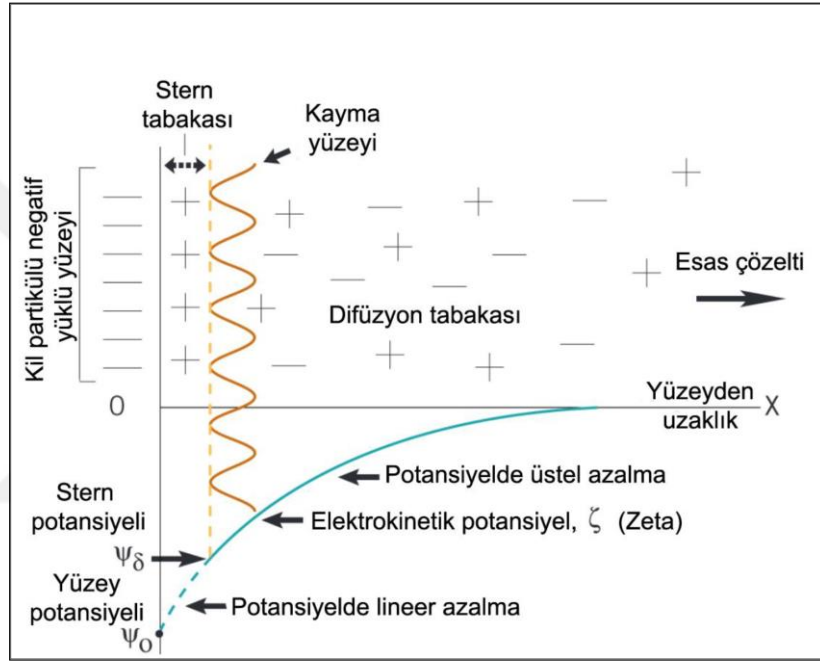
Bu teknolojiye, doğru akım (DC) kirlenmiş toprak içinden geçirilir ve bu da kirletici türlerin elektrotlara taşınmasına ve daha sonra topraktan uzaklaştırılmasına neden olur. Elektrik alanındaki kirletici madde hareketinin üç ana mekanizması bu teknolojiye yer almaktadır: elektromigrasyon, elektroozmoz ve elektroforez (Li ve ark., 1997).

#### 1.4.2.8. Bitkisel arıtım (Fitoremediasyon)

Fitoremediasyon, metallerin iyileştirilmesinde bitkilerin yardımcı olma yeteneklerini ifade eder. Bazı bitkiler, metallerin alımını ve dağılımını düzenlemek için iyonları seçici olarak topraktan alma kabiliyetini geliştirmiştir (Evanko ve Dzombak, 1997). Metallerle kirlenmiş alanların iyileştirilmesi için potansiyel olarak faydalı fito-düzenleme teknolojileri arasında fito-ekstraksiyon, fito-stabilizasyon ve rizofiltrasyon bulunur. Fito-ekstraksiyon bitkinin köklerine ve sürgünlerine absorbe edilerek metalleri topraktan çıkarmak için hiperakkümülayon yapan bitkiler

kullanır. Fitostabilizasyon, metallerin topraktaki hareketliliğini ve biyoyararlanımını sınırlamak için bitkilerin kullanımını içerir. Rhizofiltration, bitki kökleri tarafından absorpsiyon, konsantrasyon ve çökeltme yoluyla metalleri kirli yeraltı sularından uzaklaştırır. Bu teknik, topraktan ziyade kirli suyu arıtmak için kullanılır ve düşük metal kirliliğine sahip büyük hacimli sular için en etkilidir.

### 1.5. Elektriksel Çift Tabaka ve Zeta Potansiyeli



Şekil 1.2. Elektriksel çift tabaka ve zeta potansiyeli(Technical Brief, 2012)

Bir solüsyon içerisindeki negatif yüklü kolloidin etrafını çevreleyen pozitif zıt iyonlar (counter-ion), bu kolloidin yüzeyine elektrostatik çekim kuvveti ile tutunmaktadır. Bu kısımda zıt iyonların kolloid etrafına tutunarak çekim etkisi ile oluşturdukları tabaka Stern tabakası olarak bilinmektedir. Negatif yüklü kolloid etrafına toplanmaya çalışan ortamdaki diğer pozitif iyonlar, stern tabakası kısmındaki zıt iyonlar tarafından itilirler. Bu esnada iyonlar hem itme hem de çekme kuvvetinin etkisi altında kalarak difüz tabakayı oluştururlar. Kolloidin etrafında yüksek oranda biriken pozitif iyon konsantrasyonu kolloidden yavaş yavaş uzaklaştıkça solüsyondaki zıt iyon konsantrasyonu ile dengeye gelene kadar azalmaktadır.

Ortamdaki negatif iyonlar ise zıt iyonlar tarafından çekilmekte fakat kolloid tarafından itilmektedir. Negatif iyonlar kolloid ile aynı elektrik yüküne sahip olduklarından dolayı co-ion (counter-ion) denilmektedir. Co-ion'ların konsantrasyonu ise pozitif iyonların konsantrasyonunun tersine mesafe ile yavaş yavaş denge durumuna kadar artmaktadır. Kolloidin yüzeyinden herhangi bir noktadaki yük yoğunluğu o noktadaki pozitif ve negatif yük konsantrasyonunun farkına eşittir. Stern tabakasındaki kolloide tutunan zıt iyonlar ile difüz tabakasındaki çevre yükler elektriksel çift tabakayı oluştururlar (Günister, 2002).

Yüklü bir parçacığın belirli bir E elektrik alanı içerisinde sabit bir hızla hareket etmesi olayına elektrofez denilmektedir. Parçacıkların hareket edebilme kabiliyetleri (mobiliteleri) bulunduğu ortamın viskozitesine ve dielektrik sabitine bağlıdır. v hızı ile E elektrik alanında hareket eden bir parçacığın mobilitesi

$$\mu_e = v / E \quad (1.1)$$

olarak bulunabilir.

Zeta potansiyeli veya  $\zeta$  potansiyeli, kolloidal sistemlerde elektrokinetik potansiyelin kısaltmasıdır. Teorik olarak zeta potansiyeli, dağınık bir partikül veya damlacığın ara yüz çift katmanındaki elektrik potansiyeldir ve sürekli fazdaki arayüzden uzak bir noktaya kadardır. Başka bir deyişle, zeta potansiyeli, hareketli dispersiyon ortamı ile dağılmış partiküle bağlı dispersiyon ortamının sabit tabakası arasındaki potansiyel farktır. Zeta potansiyelini etkileyen en önemli faktör ortamın pH'ıdır. Diğer faktörler iyonik kuvvet, herhangi bir katkı maddesinin konsantrasyonu ve sıcaklığı içerir.

Zeta potansiyelinin önemi, değerinin emülsiyonların kısa ve uzun vadeli kararlılığı ile ilgili olabileceğidir. Yüksek zeta potansiyeli olan (negatif veya pozitif) emülsiyonlar elektriksel olarak stabilize edilirken, düşük zeta potansiyeli olan emülsiyonlar pıhtılaşma veya topaklanma eğilimindedir, muhtemelen zayıf fiziksel stabiliteye yol açar. Genel olarak, bir emülsiyonun zeta potansiyeli yüksek

olduğunda, itme kuvvetleri çekici kuvvetleri aşmakta ve nispeten kararlı bir sistem ortaya çıkmaktadır.

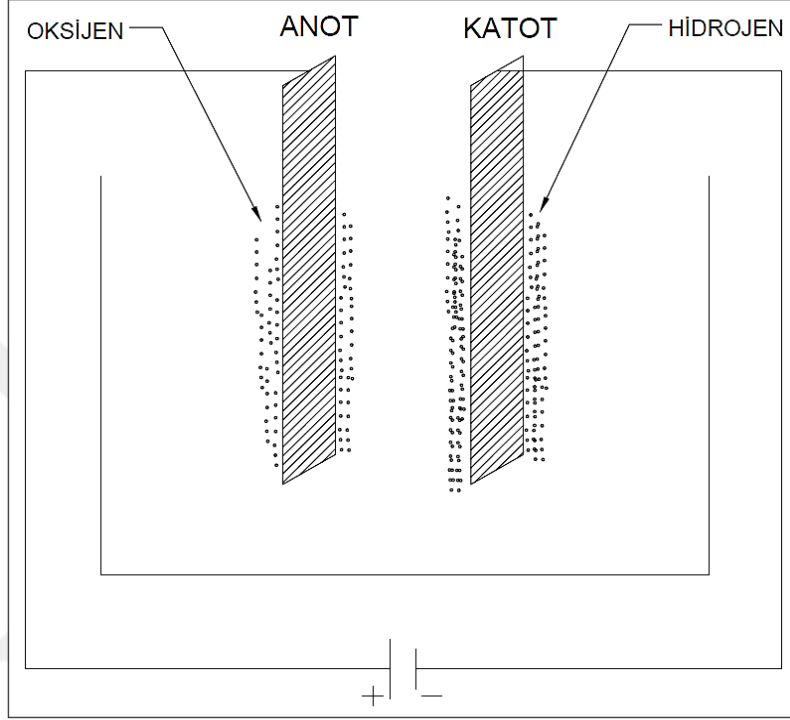
## 1.6. Elektrokimya

Elektronik bir iletken (metal, grafit, veya yarı iletken) ile iyonik bir iletkenin (elektrolit) arayüzeyinde gerçekleşen yükseltgenme indirgenme (redoks) reaksiyonlarının tümünü içine alan bilim dalıdır. Elektrokimya elektrik akımının kimyasal reaksiyonlarla olan ilişkisini ifade eder. Bir elektrokimyasal olay mutlaka bir redoks reaksiyonudur. Sistem elektrik üretebilir veya elektrik akımı yardımıyla bir reaksiyon oluşturabilir. Her redoks reaksiyonu yükseltgenme yarı reaksiyonu ve indirgenme yarı reaksiyonu olmak üzere iki yarı reaksiyondan meydana gelir. Elektro-kimyasal tepkimeler sırasında üretilen ya da harcanan elektrik miktarının ölçülebilmesi ile kimyasal reaksiyonlara ilişkin bilgilerin önemli bir kısmı bu yoldan bulunmuştur. Ayrıca elektrokimyanın endüstrideki uygulama alanı da çok geniştir. Birçok maddenin elde edilmesi, saflaştırılması ve korunması elektrokimyasal işlemlerle sağlanmaktadır(Uyanık, 1985). Elektrokimyasal kinetik temelde kimyasal kinetiğin genel yasalarına uyar. Ama bunların yanı sıra yalnızca elektrokimyasal olaylara özgü olan özel yasaları da göz önünde tutar. Kimyasal kinetiğin temel varsayımları olan "etkinleşme enerjisi" ve "sıcaklığın tepkime hızını artırması" gibi kavramlar birçok elektrokimyasal olaya da uygulanabilmektedir(Zeren, 1999).

### 1.6.1. Elektroliz

Elektrik akımı kullanılarak bir sıvı içinde çözünmüş halde bulunan kimyasal bileşiklerin bileşenlerine ayrılması işlemine elektroliz denir. Elektroliz, akımın elektrolit çözeltisi içinde iletilmesiyle birlikte gelişir. Elektrolit, serbest iyon içeren ve elektriksel iletkenliğe sahip ortam olarak bilinir. Genellikle erimiş olarak ya da bir tuz eriyiğinin sulu çözeltisi halindedir. Elektroliz işlemi özel bir kap içerisinde uygulanabilir. Bu kap içerisine elektrolizi yapılacak maddenin eriyiği veya sulu çözeltisi konulur. Eriyen veya çözelti oluşturan madde (+) ve (-) yüklü iyonlarına ayrılır. Bir üreticinin uçlarına bağlanmış olan elektrotlar birbirleri ile temas etmeyecek biçimde bu çözeltiye daldırılır. Üreteçten gerilim verilince elektronlar arasında

oluşan elektriksel alan iyonları karşılıklı kutuplara doğru iter. (+) yüklü iyonlar katoda hareket ederken, (-) yüklü iyonlar anoda doğru hareket eder. İyonlar elektrotlara yapışarak yüklerini dengeler ve nötr hale geçerler. Nötrleşen iyonlar çökeler veya yeni bileşikler oluştururlar.



Şekil 1.3. Elektroliz İşleminin Şematik Gösterimi

### 1.6.2. Elektrolizin uygulama alanları

Elektrolizin birçok uygulama alanı vardır. Bunlar genellikle analitik, endüstriyel ve tıp alanındaki uygulamalardır. Analitik uygulamaları elektro analizler, voltametik ile potansiyometrik analizlerdir. Endüstriyel uygulamaları ise elektrolitik kaplama, metallerin elektrolitik ile saflaştırılması, elektrolitik aşındırma, piller ve elektrolitik parlatma alanlarıdır. Tıpta kullanılan elektrolizin amacı elektrik akımı ile dokuların yok edilmesine yarar. Genellikle gereksiz görülen kılları, deri yaralarını ve derideki kabarmış olan kan damarlarının giderilmesinde kullanılır.

### 1.6.3. Elektroliz yasaları

Elektroliz yasaları faraday yasası olarakta bilinmektedir. Faraday 1830’larda kimyasal bileşiklerin sulu çözeltilisinden elektrik akımı geçirmiştir. Sulu çözeltilisinden elektrik akımı geçirilen maddenin kimyasal yapısında değişiklik meydana geldiğini saptamıştır. Elektrik akımı uygulanan maddelerin bileşenlerine ayrışarak anot (+ yüklü elektrot) ve katotta (- yüklü elektrot) toplandığını göstermiştir.

Faraday Kanunu ve akım verim eşitlikleri elektrokimyasal proseslerde kullanılmaktadır. Elektrokimyasal hücrede geçen akımın miktarı  $q$  ve akım şiddeti  $I$  ile  $t$  zamanı arasındaki ilişki aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir:

$$q = \int (I dt) \quad (1.2)$$

Eşitlik (1.2) de çözünen metalin (mol olarak) miktarı Faraday kanunu ile:

$$m = q/(n * F) = (I * t)/(n * F) \quad (1.3)$$

şeklinde ifade edilir.

Burada;

**n:** çözünen metalin tesir değeri,

**F:** Faraday sabiti ve 96485 C/mol değerine eşittir.

Bu proseslerde her bir elektrotta eşzamanlı olarak gerçekleşen bir veya birden fazla reaksiyon akım verimi ile ilişkili olup, elektrokimyasal sistemin verimini ölçmedeki en önemli kriterdir. Bir elektrokimyasal sistemde; Faraday değerindeki kayıp veya akım verimi (CE) ile ifade edilirse; akım verimi yük geçişine bağlı prosesi şekilde tanımlanır:

$$CE = \frac{q_p}{q_T} \quad (1.4)$$

Bu eşitlikte;

$q_p$ : oluşan ürünün harcadığı yük

$q_T$ : toplam harcanan yük değerini ifade etmektedir. Oluşan ürün veya harcanan reaktantın miktarı esas alınarak ölçülen ( $m_{act}$ ) ve teorik ( $m$ ) akım verimi arasındaki ilişki;

$$CE = \frac{m_{act}}{m} \quad (1.5)$$

şeklinde ifade edilir. (1.3) eşitliği (1.6) eşitliğinde yerine yazılırsa;

$$CE = \frac{m_{act} \cdot n \cdot F}{q} \quad (1.6)$$

elde edilir.

Bir elektrottaki toplam akım, her reaksiyonun akımlarının toplamına eşit olacaktır.

Bu durumda bir elektrottaki toplam akım  $I_j$ ,

$$I = \sum I_j \quad (1.7)$$

olacaktır. Elektrokimyasal proseste herhangi bir anda akım verimi, akıma bağlı olarak:

$$CE = \frac{I_j}{I} \quad (1.8)$$

şeklinde ifade edilir.

### 1.7. Elektrokinetik Arıtım

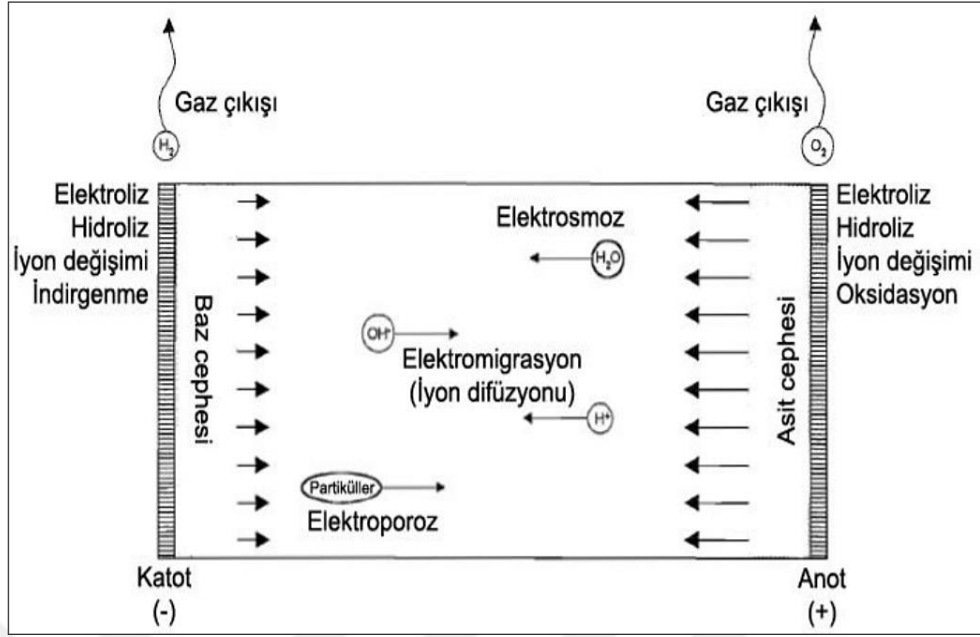
Atık yönetiminde yenilikçi ve uygun maliyetli ve yerinde iyileştirme teknolojilerine olan talep her geçen gün artmaktadır. Geleneksel iyileştirme teknolojilerine kıyasla elektrokinetik iyileştirmenin, daha az pahalı olma (uygun

maliyetli), hem yerinde hem de yerinde uygulanabilir olması, hızlı kurulum ve kolay kullanım (basitlik), sessiz çalışma, site faaliyetlerini rahatsız etmeme avantajına sahip ve nispeten kısa tedavi süresi gibi birçok avantajı vardır. Yapılan birçok çalışmalar sonucu elektrokinetik arıtımın in situ ve ex situ toprak arıtım metodları içerisinde en verimli arıtım metodlarından birisi olduğu ve topraklardan kirleticilerin giderilmesinde oldukça başarılı sonuçlar verdiği görülmektedir. Özellikle yüksek kil içeriğine sahip, düşük geçirgen topraklarda kirletici maddelerin giderilmesinde etkili olduğu bilinmektedir. Her ne kadar bu uygulama yeni olsa da, bazı petrol endüstrileri son birkaç yılda daha fazla iyileşme için elektrokinetik arıtım metodu kullanmışlardır.

Elektrokinetik arıtım metodu basit bir pil düzeneği gibi çalışır. Toprağa yerleştirilen elektrotlar (anot ve katot) arasına düşük yoğunluklu doğru akım uygulanması ile topraktaki yüklü türleri, partikülleri ve iyonları hareket ettirmesi sonucu gerçekleştirilir. Bununla birlikte anota pozitif yüklü iyonlar olan anyonlar taşınırken katota negatif yüklü iyonlar olan katyonlar taşınır. Bu sayede topraktan kirleticilerin giderimi gerçekleşmiş olmaktadır. Bu işlem elektromigrasyon, elektroozmoz ve elektroforez prosesleri ile gerçekleşmektedir(Acar ve ark., 1995).

Çizelge 1.1. EK tedavi arıtımını etkileyen faktörler, özellikleri ve toprak durumu (Oh ve Chai, 2012)

	<b>Faktörler</b>	<b>Özellikleri</b>
<b>Toprak Durumu</b>	<b>Toprak tipi ve mineral tipi</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Partikül büyüklüğü &lt;2µm olan killi topraklarda etkili % 30 veya daha fazladır,</li> <li>• İllit ve montmorillonite göre orta derecede plastisiteli (kaolinit) siltli killerde daha etkili,</li> <li>• Tercihen yüksek adsorpsiyon ve yüksek katyon değişim kapasitelerine (CEC), örneğin illitik ve bentonitik killere sahip olmayan topraklar,</li> <li>• Tamponlama kapasitesi yüksek olan topraklarda etkili değildir,</li> <li>• Yüksek karbonatlı tampon içeren topraklarda, örneğin buzul toprakları</li> </ul>
	<b>Su içeriği</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Toprak nemi, elektromigrasyona izin vermek için iletken ve yeterli olmalı, ancak tortuitenin rekabet etmesinin etkilerinden kaçınmak için optimal olarak doymamış olmalıdır,</li> </ul>
	<b>Gözenek suyunun pH ve elektro-iletkenliği (EC)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Yüksek pH değeri olan topraklarda etkilidir (pH&gt; 9),</li> <li>• Yüksek EC Tasarım sistemine sahip topraklarda daha etkili,</li> </ul>
<b>Tasarım Sistemi</b>	<b>Gerilim ve akım</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Elektrik akımı yoğunlukları metrekaşe başına birkaç amper düzeyinde olmalıdır,</li> <li>• Değişim, toprağın elektrokimyasal özelliklerine bağlıdır, örneğin, daha yüksek EC'li topraklar, daha düşük EC topraklarından daha fazla şarj ve daha yüksek akım gerektirir,</li> </ul>
	<b>Elektrotların doğası</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Grafit ve “preslenmiş karbon kaplamalı” elektrotlar gibi pahalı inert elektrotlar tercih edilir</li> <li>• Çelik, demir ve bakırdan metal kullanımı siyah karbon, kurşun ve platin yerine daha etkilidir</li> </ul>
	<b>İşlem süresi</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Akım ve voltaj seviyesine, taşıma hızına, elektrot boşluğuna ve konfigürasyona bağlı olarak</li> </ul>
	<b>Maliyet</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kirleticinin türüne ve derinliğine, toprağın EC'sine ve gözenek suyuna, elektrotların aralığı, kullanılan tasarım ve işlem, saha hazırlama gereklilikleri ve elektrik ve işçilik maliyetlerine bağlı olarak</li> </ul>



Şekil 1.4. Doğru akım altında killi topraklarda oluşan hareketler ile asit ve baz cephelerinde gerçekleşen işlemler (Lee, 2000).

Elektrokinetik arıtım sırasında anot ve katotta oluşan reaksiyonlar 1.9 ve 1.10'da verilmektedir(Li ve ark., 1997; Chang ve ark., 2006; Shen ve ark., 2007):



### 1.7.1. Elektroozmos

Dışarıdan uygulanan akım sonucu bir elektrik alanı etkisi altında, gözenek sıvısındaki serbest iyonlar zıt yüklü kutuplara çekilirken (elektromigrasyon) beraberinde çevrelerindeki gözenek sıvısını da taşımaktadır. Bu işlem sırasında gözenek sıvısındaki tanecikler de gözenek sıvısı ile birlikte taşınmaktadır. Bu işleme elektroosmotik akış (EOA) denir. EOA hareketi katot yönüne doğru gerçekleşmektedir. Katyonlar, elektroosmotik akışla aynı yönde hareket ettiklerinden katyonlar katoda doğru en hızlı hareket eden iyon türleridir. Nötraller ise sadece EOA hızı ile hareket ederler ve birbirlerinde ayrılmazlar. Anyonların hareketi ise anoda

doğru olmasına rağmen EOA hızı onların hareketinden büyük olduğu için en yavaş olarak katoda doğru hareket ederler(Heiger, 2000).

Çizelge 1.2. EOA üzerine etki eden faktörler

Sistemde yapılan değişiklik	EOA üzerindeki etkisi	Diğer sonuçlar
Tamponun pH değeri	pH arttırıldığında EOA da artar	Analitlerin yükünü etkileyebilir
Tampon konsantrasyonu	Tampon konsantrasyonu azaltılırsa EOA artar	Yüksek konsantrasyon yüksek akıma neden olur. Düşük konsantrasyon duvar adsorpsiyonuna neden olur.
Sıcaklık	Viskoziteyi değiştirir Viskozite arttıkça EOA azalır	Seçiciliği etkileyebilir.
Organik çözücüler	EOA ve tampon viskozitesini değiştirir	Ayırma sisteminde kompleks değişiklikler olabilir.
Tampon ilavesi olarak yüzey aktif maddeler	Kapiler duvarına adsorbe olur, EOA'da keskin değişimler gözlenir	Anyonik yüzey aktif maddeler EOA'ı arttırır. Katyonik olanlar ise EOA'ı düşürür veya ters çevirir.
Nötral hidrofobik polimerler	Kapiler duvarına adsorbe olur Kısmen güçlü çekim	Duvar adsorpsiyonunu azaltır.
İyonik polimerler	Kapiler duvarına adsorbe olur Kısmen güçlü çekim	Pozitif yüklü polimerler ile akış yön değiştirir.
Kovalent kaplama	EOA etkilenir Duvar adsorpsiyonu önlenir	Dayanıklık problemleri.
Işınsan elektrik alan	EOA da değişiklikler gözlenir	Sınırlı uygulama alanı.

### 1.7.2. Elektroforez

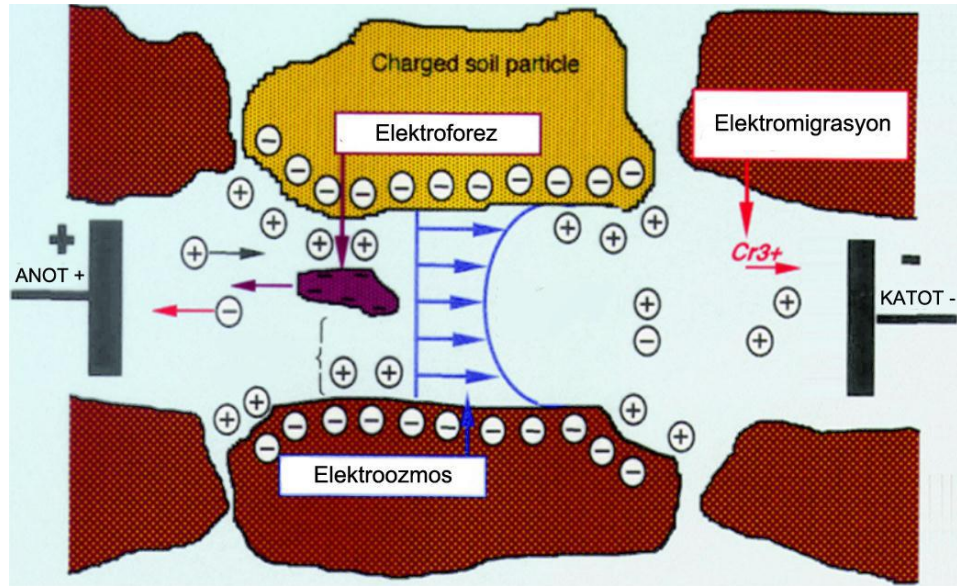
Dışarıdan uygulanan bir elektrik alanı etkisi altında, yüzey yükleri sebebiyle negatif yüklü kil partikülleri gibi türlerin, pozitif yüklü olan anot bölümüne doğru hareketidir.

### 1.7.3. Elektromigrasyon

Dışarıdan uygulanan akım sonucu bir elektrik alanı etkisi altında, katyonların anottan katot yönüne ve anyonların katottan anot yönüne hareketi olarak tanımlanmaktadır. Hareketi sağlanan iyonik türler başlangıçta tamamen çözelti içeriğindeki türlerken, elektrokinetik işlemler devam ettikçe oluşan elektroliz ürünü türler de bu harekete katılmaktadır.

Elektrokinetik toprak işleme, gözenek sıvısı kimyasında, dağılık çift tabakada (DDL), toprak dokusunda ve hidrolik iletkenlikte çeşitli değişikliklere neden olur (Alshwabkeh, 2001). Bu bağlamda, DDL kil minerallerinin varlığı toprakta birkaç EK fenomenine neden olur. Bu EK işlemi ayrıca, kireç veya kalsiyum klorür çözeltileri gibi bazı toksik olmayan geliştirme çözeltilerinin (dengeleyici maddeler) kullanılmasıyla da geliştirilebilir. Bu kimyasal çözeltiler, toprağa aktarılabilecek iyonlara bağlı olarak anot veya katottan beslenebilir. Uygun bir arttırıcı ajan ilave edilerek, toprağın doku, kayma dayanımı, plastisite gibi bazı özellikleri, sıkıştırılabilirlik ve geçirgenlik değişecek; bu nedenle kil boyutunda parçacıkların miktarını azaltarak ve artırarak toprak özelliklerini iyileştirmede çok etkili olabilirler. Ayrıca uygulanan gerilim (Volt) ve akım yoğunluğu (Amper) ile işletme süresi parametrelerindeki değişiklikler toprakta kirleticilerin gideriminde çok etkili olabilirler(Çizelge 1.1).

Bir elektrikli çift tabakanın daha sonra yüklü kil parçacıklarının yüzeyinde oluşumu, yüklü parçacıkları üç olay aracılığıyla harekete geçiren süreçleri açıklar: elektromigrasyon, elektroosmoz ve elektroforez(Lee, 2000; Mok, 2006; Glendinning ve ark.,2005; Virkutyte ve ark., 2002; Yeung, 2011).



Şekil 1.5. Elektrik yüklü çift tabakanın kil minerali yüzeyinde oluşumu(Iyer, 2001; Mosavat ve ark., 2012)

#### 1.7.4. Elektrokinetik arıtımın avantaj ve dezavantajları

Çizelge 1.3. Elektrokinetik arıtımın avantajları ve dezavantajları

Elektrokinetik Arıtımın Avantajları:	Elektrokinetik Arıtımın Dezavantajları:
İnce taneli zeminlerin arıtımında verimlidir.	Kaba taneli zeminlerin arıtımında uygun değildir.
Enerji giderleri nispeten düşüktür.	Kirletici derinliği önemli bir faktördür.
Arıtılan bölge kısa sürede yeniden kullanılabilir.	Kirlenmiş bölgenin büyüklüğü maliyeti önemli ölçüde etkiler
Her tür kirleticiye uygulanabilir.	Zeminde asidifikasyona neden olabilir.

#### 1.7.5. Elektrokinetik arıtımın uygulandığı kirletici türleri

Her tür metalik kirleticiler, BTEX (benzen-toluen-etilen-ksilen) bileşikleri, fenol vb. organiklerin elektrokinetik arıtım prosesinde giderimi yapılabilmektedir.

#### 1.7.6. Elektrokinetik arıtımın uygulandığı zemin türleri

Elektrokinetik arıtımın uygulandığı zemin türleri olarak ince taneli, düşük tutma kapasitesi ve tamponlama kapasitesine sahip zeminler kullanılmaktadır(Çizelge 1.1).

## 2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Literatürde kontamine olmuş toprakların elektrokinetik tedavisi için bir takım çalışmalar bildirilmiştir. Bu çalışmalar aşağıdaki gibi özetlenebilir:

Yumuşak killi topraklarda bakırın çıkarılması için elektrokinetik hücrelerin etkinliğinin araştırıldığı bir çalışmada 13.5, 27 ve 41V akım yoğunluğu uygulanmış ve 168 saat sonunda %86 bakır giderimi sağlanmıştır. Topraktaki başlangıç konsantrasyonu  $C_0 = 150$  mg/kg kuru toprak olup giderim Hücre A (13,5V) için %5 ile %79 arasında, Hücre B (27V) için %72 ile %89 arasında ve Hücre C (41V) için %76 ile %90 arasında değişim göstermiştir. Ayrıca elektroozmozun, kirlenmiş toprakta suyun taşınmasında etkili olduğu, bakırın uzaklaştırılmasının ise öncelikle elektromigrasyon yoluyla gerçekleştiği tespit edilmiştir(Hassan ve Mohamedelhassan, 2012).

Elektrokinetikte akımın ağır metal türlerine ve giderimine etkisinin incelendiği diğer bir çalışmada, elektrokinetik işlem ile 10, 20 ve 30 mA olarak farklı akımlar uygulanmış çamur bölmesindeki toplam Cr giderim yüzdesi en yüksek % 18 ile 10 mA akım uygulamasından elde edilirken % 14 ile Pb giderim yüzdesi ve % 22 ile Zn giderim yüzdesi 20 mA akım uygulamasından elde edilmiştir. 30 mA akım uygulaması her üç metal için en düşük giderim yüzdelerine neden olmuştur. Bu nedenle daha yüksek bir akım uygulaması metal giderim veriminde artışa neden olmadığından, elektrokinetik işlemin verimliliği çamurun kimyasal maddeler ile şartlandırılmasıyla artırılması gerektiği sonucuna varılmıştır(Hanay ve ark., 2009).

Petrol hidrokarbonları ile kirlenmiş doğal toprağın elektrokinetik yöntemle arıtımının incelendiği bir çalışmada ise laboratuvar ölçekli reaktörlerde arıtım çalışmaları yürütülmüş olup Toplam Petrol Hidrokarbonları (TPH) derişimi 10000 ppm olan tarım toprağının 20V ve 40V elektrik potansiyeli altında, elektroliz sıvısı olarak saf su kullanılarak elektrokinetik arıtımı araştırılmış, anottan olan mesafeye ve uygulanan elektrik potansiyeline bağlı olarak 192 saat sonunda %55.2 ila %95.6

arasında giderim verimleri elde edilmiştir. Ayrıca EPA tarafından yüksek toksisite grubunda olduğu belirtilen onaltı adet çokhalkalı aromatik hidrokarbonun (PAH) elektrokinetik arıtmadan etkilenme seviyeleri de incelenmiş ve TPH bulgularına benzer şekilde anottan olan mesafeye ve uygulanan elektrik potansiyeline bağlı olarak PAH arıtım verimleri %73.9 ve %87.8 olarak sonuçlanmıştır(Bilgin ve Akıncı, 2010).

Petrol ile kirlenmiş ince taneli toprakların elektrokimyasal olarak iyileştirilmesinin incelendiği bir çalışmada, elektrot malzemesi olarak grafit elektrot, kirlenici olarak dizel motor yağı kullanılmış, 18 gün içinde katotta yaklaşık %80 yağın ve anotta %45 yağın 0.6V/cm spesifik voltaj kullanılarak gideriminin sağlandığı gözlemlenmiştir. Sonuç olarak elektrokimyasal ıslahın yağla kirlenmiş ince taneli toprakların ıslahında etkili olduğu kanıtlanmıştır. Ayrıca daha yüksek spesifik voltajlar daha yüksek enerji harcamasına neden olacağı tespit edilmiştir(Muhsina ve ark., 2015).

Acar ve Alshwabkeh (1993), yayınlanan makalelerinde metal kirlenmiş toprakların elektrokinetik muamelesini başlatmış; bu, proses sıvısının ve iyonik türlerin bir elektrik alanı altında transferini açıklamıştır.

Jensen ve ark. (1994), ağır metallerle kirlenmiş toprakların elektrokinetik ıslahı için yeni bir konsept geliştirmiştir. Yeni konseptte, toprağı elektrot bölmelerinden ayırmak için iki güçlü iyon değişim membranı kullanmışlardır. Bu yapı, akımın yüklü türlerin yani ağır metal iyonlarının topraktan çıkarılmasında ki yüksek etkinliğini sağlamıştır.

Li ve ark. (1996), katod ve arıtılacak toprak arasında iletken bir solüsyonun yerleştirildiği yeni bir teknik önermiştir. Bu yaklaşımla, topraktaki pH düşük tutulabilir, böylece metal çökeltisi oluşmayacağını söylemiştir. Deneysel sonuçlar metal çıkarma etkinliklerinin işlemin süresine ve çözeltideki elektrolitlerin içeriğine bağlı olduğunu göstermektedir. Hem bakır hem de çinko için %96'dan fazla metal çıkarma verimine ulaşılabileceği sonucuna varmıştır.

Li ve ark. (1997), katod ile muamele edilen toprak arasına iletken bir çözelti sokulan yeni bir elektrokinetik toprak iyileştirme tekniğinin sonuçlarını sundu. Bu düzenlemede ağır metaller artık işlenmiş toprakta çökelmeyecektir. Toprakta taşınırlar ve iletken çözeltide çökeltiler. Deneysel sonuçlar, %90'dan daha yüksek metal çıkarma verimlerinin elde edilebileceğini göstermektedir.

Zhou ve ark. (2006), 80 V sabit voltaj kullanarak 700 kg bakırla kirlenmiş kırmızı toprağın elektrokinetik tedavisi için pilot ölçekli bir deney yapmıştır. Sonuçlar, laktik asit kullanıldığında 140 günlük işlemden sonra Cu'nun % 76'sının topraktan başarıyla çıkarıldığını göstermektedir. Katolit pH'sini ayarlamak ve toprak Cu'yu kompleksleştirerek çözündürmek için arttırıcı reaktif olarak kullanıldı ve pilot ölçekli elektrokinetik deney  $224 \text{ kWh t}^{-1}$  toprağın elektrik enerjisini tüketmiş.

Ravera ve ark. (2006), sekiz gün elektrokinetik ıslah ardından bakırla kirlenmiş toprağın elektrokinetik iyileştirilmesinin uygulanabilirliğini değerlendirmiştir. Sonuçlar Cu'nun elektrokinetik ıslahının, öncelikle kil minerallerinden ve organik maddeden oluşan toprakta tamamen etkisiz olduğunu göstermektedir.

Wang ve ark. (2006), ağır metalleri kirlenmiş kaolinden çıkarmak için yukarı doğru bir elektrokinetik toprak iyileştirici (UESR) teknolojisi önermiştir. Ağır metallerin yatay göçü için delikler veya hendekler kullanan geleneksel elektrokinetik işlemlerden farklı olarak, dikey üniform olmayan elektrik alanları uygulayan UESR teknolojisi, ağır metallerin işlenmiş toprağın üst yüzeyine yukarı doğru taşınmasına neden olmuştur.. Çıkarılan ağır metallerin ana kısmı, katod haznesi etkisinde çözüldü ve damıtılmış su yerine 0.01M nitrik asit kullanıldığında katod haznesi atık maddesi ile uzaklaştırılmış.

Wang ve ark. (2007) ağır metaller, Cu ve Pb ile kirlenmiş kaolin ve organik bileşikler, p-ksilen ve fenantrenden yukarı doğru bir elektrokinetik toprak iyileştirme (UESR) işlemi ile muamele edilmiştir. 6 günlük süren deneylerde  $0.191 \text{ sabit akım yoğunluğu mA/cm}^2$  ( $19.1 \text{ kWh/m}^3$  kaolin) verilmiş, fenantren, p-ksilen, Cu ve Pb'nin çıkarılma etkinlikleri sırasıyla %67, %93, %62 ve %35 ölçülmüştür.

Estabragh ve ark. (2014), kendi tasarladıkları, elektriksel iletkenlikli plastik dikey drenlere sahip deney düzeneğinde kaolin kullanarak, 1-10 gün aralığında, farklı gerilimlerde elektro-ozmos performansını test etmişlerdir. 10 günlük uygulama sonrasında 15 volt gerilimde 11 mm, 45 volt gerilimde ise 13 mm oturma sağlamışlar, oturma'nın büyük kısmının ilk 3 günde gerçekleştiğini belirtmişlerdir. Ayrıca çalışmada pH değişimlerinin voltajla ilişkisini incelemiş olup uygulamada voltaj artırıldıkça hem anot hem de katot bölmelerinde pH değişiminin de artmış olduğunu saptamışlardır.

Tran ve ark. (2009), krezot çözeltisinde polisiklik aromatik hidrokarbonları (PAH) anodik olarak oksitlemek için rutenyum oksit (RuO<sub>2</sub>) elektrotu ile kaplanmış genişletilmiş titanyum (Ti) kullanmıştır. 270-540 mg PAHL (-1) aralığında başlangıç konsantrasyonuna sahip farklı 16 PAH kullanılmış olup optimum koşullar altında, petrol hidrokarbonunun (C<sub>10</sub> – C<sub>50</sub>) % 84'ünü gidermişler.

Tang ve ark. (2018), yaptıkları çalışmada çamurdan ağır metallerin uzaklaştırılmasını arttırmak için mikrobiyal yüzey aktif madde olan rhamnolipid, saponin ve sophorolipid kullanılmış. 2000 gr kuru çamur kullanan elektrokinetik reaktörde, EK1 ve EK2 testleri için 1000 mL deiyonize su ile karıştırılmış ve 1000 mL ralnolipid çözeltisi (2.0 g L<sup>-1</sup>), saponin çözeltisi (2.0 g L<sup>-1</sup>) ve sophorolipid çözeltisi (2.0 g L<sup>-1</sup>) sırasıyla EK3, EK4 ve EK5 testleri için çamur birkaç dakika karıştırılarak doygun hale getirilmiş. Ayrıca, elektrokinetik testlerde katolit pH'sini kontrol etmek için 0.1 mol L<sup>-1</sup> HNO<sub>3</sub> kullanmışlardır. Bunun sonucunda yapılan teslerde süre değişimleri ile elektrik akımı, kesit pH ve ağır metaller ile boşluk ve zaman değişimleri ile artık konsantrasyonlar incelenmiş olup EK denemelerinden sonra, arttırılmış EK denemesinde Cu, Zn, Cr, Pb, Ni, Mn, Fe ve Hg giderim verimleri, arttırılmamış EK denemesinden daha yüksektir. Cu, Zn, Cr, Pb, Ni, Mn, Fe ve Hg EK3 testinde sırasıyla %55.8 ± 5.46, %73.8 ± 6.23, %64.0 ± 5.11, %51.6 ± 5.32, %60.8 ± 2.12, %56.0 ± 3.21, %41.0 ± 2.12, %35.0 ± 2.12. Sonuçlar, bu üç biyo yüzey aktif maddenin ve katolit şartlandırmanın elektrokinetik deneylerde tortudan ağır metal uzaklaştırılmasını arttırabileceğini göstermiştir.

### 3. MATERYAL ve YÖNTEM

#### 3.1. İlin Coğrafi Özellikleri



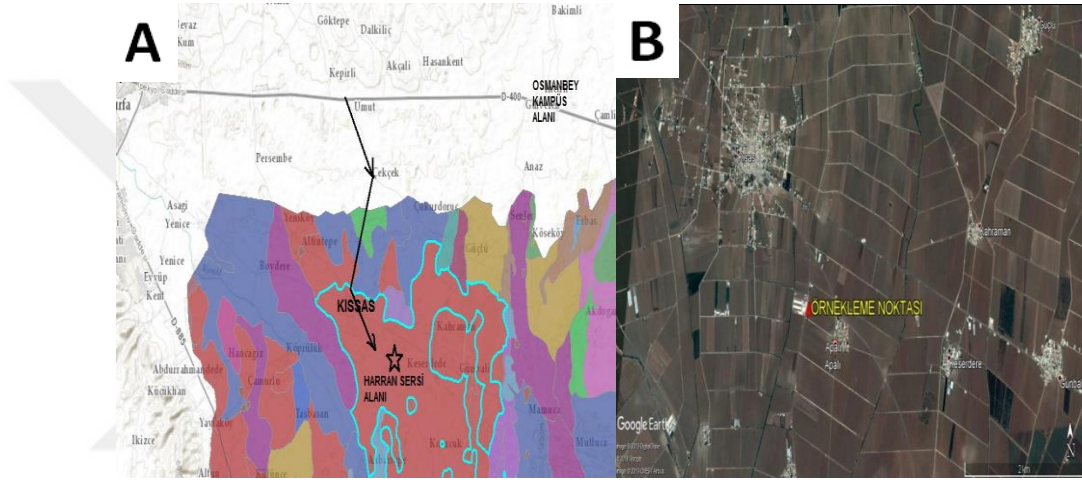
Şekil 3.1. Şanlıurfa ilinin genel görünümü (Anonim, 2017)

Doğusunda Mardin, güneyinde Suriye, batısında Gaziantep, kuzeybatısında Adıyaman, kuzeyinde Diyarbakır illeri yer alan Şanlıurfa ili Güneydoğu Anadolu Bölgesinde yer almaktadır. Şanlıurfa ilinin idari sınırları fiziki coğrafya açısından incelendiğinde, genel olarak batı ve kuzeybatısı (Fırat nehri), kuzey ve kuzeydoğusu (Karacadağ'ın su bölümü çizgisi) ve doğu (Büyükdere suyu) sınırları doğal, güneydeki Türkiye-Suriye devlet sınırı ise siyasi niteliktedir. Coğrafi konumu:  $36^{\circ} 40' 38''$  kuzey enlemleri ile  $37^{\circ} 50'$  ve  $40^{\circ} 12'$  doğu boylamları arasındadır. İl güneyinde 789 km'lik Türkiye-Suriye sınırı uzanır. Yüzölçümü 18.584 kilometre kare olup genelde bir ova görünümündeki il merkezinin rakımı 518 m'dir. Şanlıurfa kontinental (kara) iklim özelliği gösterir. Yazları çok kurak ve sıcak, kışları bol yağışlı, nispeten ılıman geçmektedir. Deniz etkisinden uzak bir bölgede bulunmaktadır. Bu nedenle Kontinental iklim özelliği ağır basmaktadır. Akçakale, Birecik, Bozova, Ceylanpınar, Halfeti, Hilvan, Siverek, Suruç, Viranşehir ve Harran ilçeleridir. Ovaları Harran ovası, Suruç ovası, Viranşehir ovası ve Hilvan ovasıdır. Başlıca tarım ürünleri olarak buğday, arpa, mercimek, anason, pamuk ürünleri

yetiştirilmektedir. Başlıca sanayi ürünleri yün, çimento, tarım makinaları, şaraplık üzüm, un, pamuk iplik, makarna, peynir, süt, tereyağı, yoğurt hayvansal ürünlerdir.

### 3.2. Toprak Numunelerinin Alınması ve Hazırlanması

Bu çalışmada Kısas Köyü Apalı Mevkii  $37^{\circ}5'25.97''K$  enlem,  $38^{\circ}56'35.49''D$  boylamından alınan Şanlıurfa ili Harran Ovası Harran Toprak Serisi toprak örneği kullanılmıştır.



Şekil 3.2. Şanlıurfa ili Harran Ovası Harran Toprak Serisi Şekil-A'da, örnekleme yapılan noktanın harita üzerindeki görünümü Şekil-B'de gösterilmiştir.

Şekil 3.2-A'da Şanlıurfa ili Harran Ovası Harran Toprak Serisi sınırları mavi çizgilerle gösterilmiştir. Şekil 3.2-B'de örnekleme alanı sarı nokta ile gösterilmiştir.



Şekil 3.3. Şekil-A ve Şekil-B’de toprak örneklerinin alındığı noktadan bir görünüm

Toprak örnekleri 0-30 cm ve 0-60 cm derinlikten alınmış olup analiz işlemleri için laboratuvar ortamına taşınmıştır.



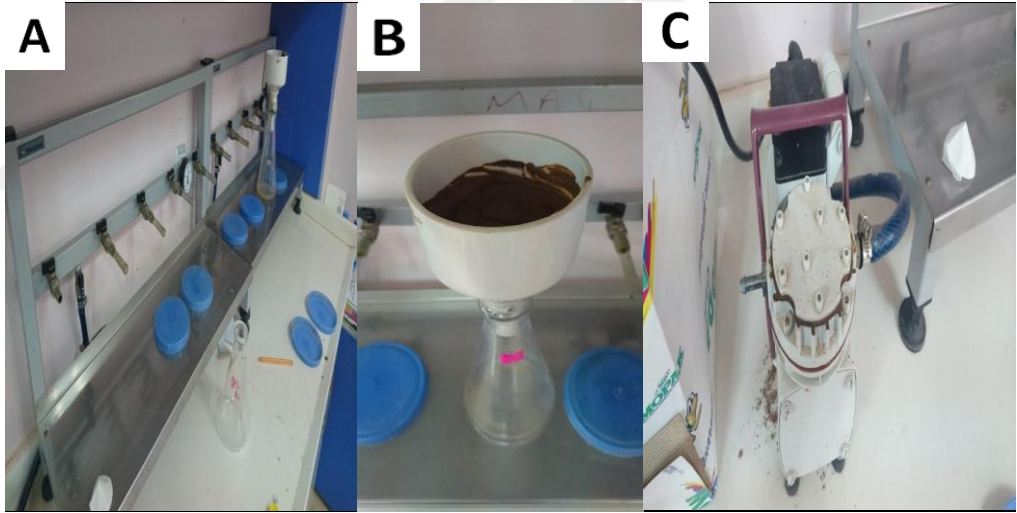
Şekil 3.4. Şekil-A ve Şekil-B’de 2mm’lik elekler ile elenip ve kurutulmuş toprak örnekleri

Örnekleme noktasından alınan toprak numuneleri laboratuvar ortamına getirilerek kurutulmuş ve 2 mm’lik elekler yardımıyla elenmiştir. Elenen toprak numuneleri analiz edilmek üzere isim ve numaralandırılarak paketlenmiştir.



Şekil 3.5. 2 mm elekten geçirilen toprak numunesinin görünümü

Çalışmada kullanılan toprak numuneleri fiziksel ve kimyasal analizleri yapılmak üzere hazırlanmıştır. 2 mm elekten geçen toprak numunelerinden 100'er gram tartılmış olup saturasyon kaplarında saf su ile doygun hale getirilene kadar karıştırılmıştır.



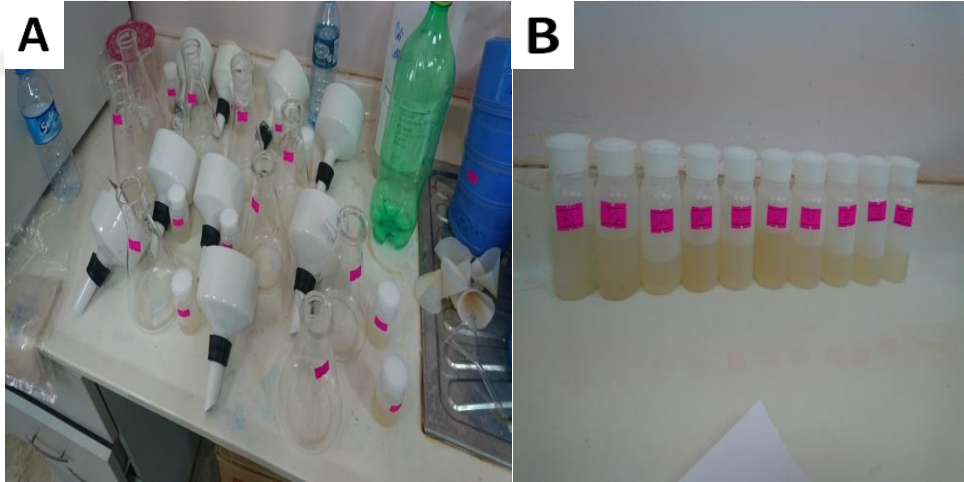
Şekil 3.6. Şekil-A'da vakum pompa düzeneği, Şekil-B'de saturasyon işlemi ardından vakum pompa düzeneğinden filtre edilen numuneler, Şekil-C'de vakum pompasının görünümü

Doygun hale getirilen toprak numuneleri saturasyon kaplarında 24 saat oda sıcaklığında bekletildikten sonra vakum pompa düzeneğinde süzülerek filtre edilmiştir.



Şekil 3.7. Toprak tarımlarında kullanılan hassas terazi (AND GR-200)

Toprak tartımlarında AND GR-200 marka hassas terazi kullanılmıştır.



Şekil 3.8. Şekil-A'da süzme düzeneği, Şekil-B'de vakum pompa düzeneğinden filtre edilen numunelerin görünüm

Filtre edilen numuneler numune kaplarına alınarak diğer analiz işlemleri için hazır hale getirilmiştir.

Çizelge 3.1. Temiz toprak örneğinin özellikleri

PARAMETRELER		BİRİM	ANALİZ SONUCU
pH		-	6.83
İletkenlik		$\mu\text{S}/\text{cm}$	709
Nem		%	1.32
Tekstür	Kum	%	5
	Silt	%	30
	Kil	%	65
	Tekstür Sınıfı	-	Killi
Kireç		%	37.9
Kasyon Değişim Kapasitesi (KDK)		me/100gr	45

Toprak özelliklerini belirlemede çeşitli ölçüm metotları kullanılmış ve kullanılan toprak örneği çeşitli fiziksel ve kimyasal işleme tabi tutulmuştur.



Şekil 3.9. Tekstür analizinin görünümü

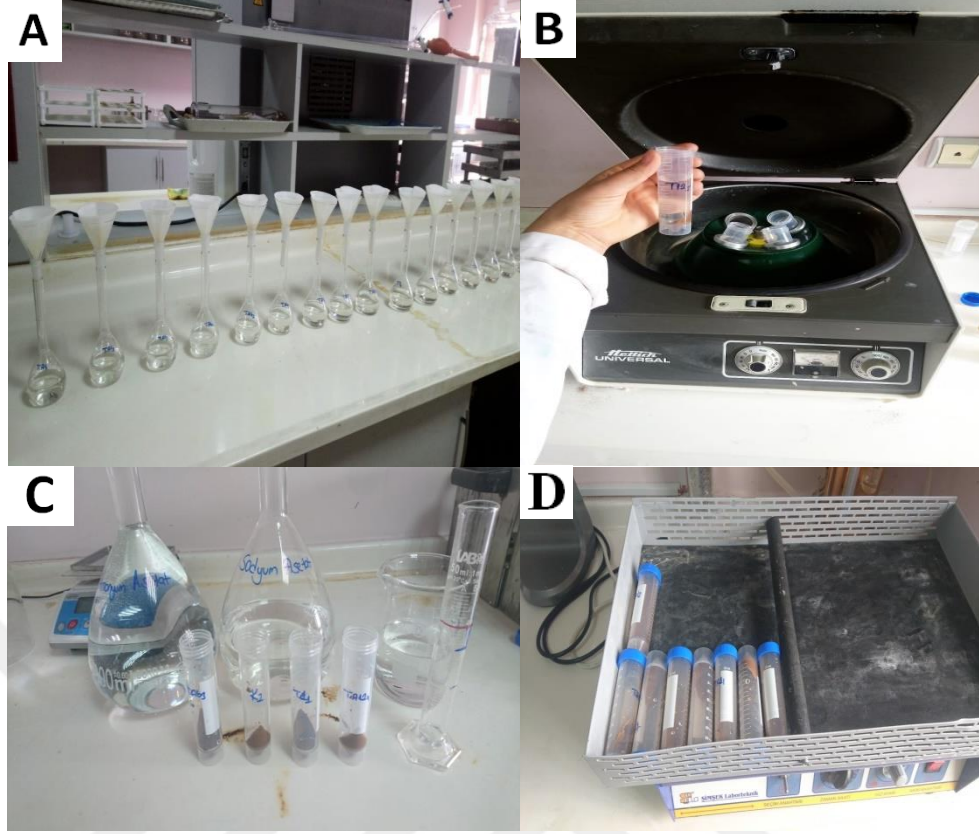
Tekstür içeriğinin belirlemede 100gr toprak örneği saturasyon kabı içerisinde alınmış ve tam doygun hale getirilene saf su ile titrasyon işlemi yapılmıştır. Saturasyon kabında ağızı kapalı halde 24 saat bekletilen toprak örneği filtre kağıdından süzülerek sıvı kısmında Şekil 3.19'da verilen WTW Multi 3620 IDS marka cihaz ile iletkenlik ve pH ölçümleri yapılmıştır. Tekstür analizi için Bouyucos hidrometre yöntemi kullanılmıştır (Bouyucos, 1951). Bu yöntemde 50 gr hava kuru toprak alınarak 250 mililitre'lik bir behere konulup üzerine 10 ml kalgon çözültisi ilave edilmiştir. Saf suyla 150 ml ye tamamlanarak cam çubuk ile karıştırılmış ve bir

gece beklemeye bırakılmış ve daha sonra mikserle aktararak ve 10 dakika karıştırılmıştır. Örnek 1 lt'lik silindire alınmış ve saf su ile hacim bir litreye tamamlanmıştır. Delikli disk ile örnek 20 defa karıştırılmış ve süre takibi yapılmıştır. 20 saniye sonra hidrometre yavaşça örneğe yerleştirilmiş olup 40. saniyede hidrometre okuması yapılmış ve sıcaklık değeri kaydedilmiştir. 2 saat sonra tekrar hidrometre okuması ve sıcaklık tespiti yapılmıştır. Hidrometre okumalarının düzeltilmesiyle elde edilen değerlerden %silt, %kum ve %kil hesaplanmıştır.



Şekil 3.10. Kireç tayininin bir görünümü

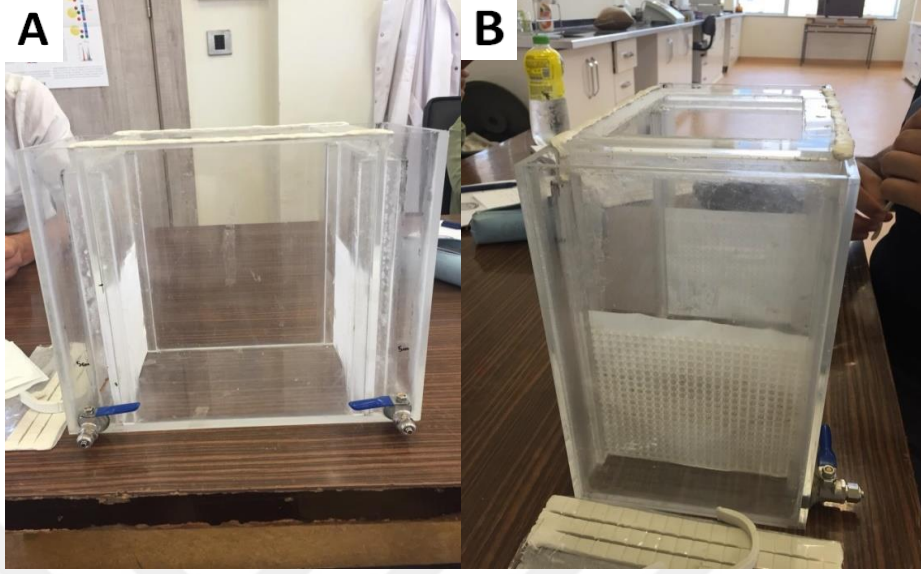
Kireç tayini için 1gr toprak örneği kalsimetre şişesine alınmış ve kalsimetre tüpüne 1+3'lük HCl (hidroklorik asit) eklenmiştir. Daha sonra kalsimetre tüpü toprağa temas ettirilmeden kalsimetre şişesine koyulmuş ve ağzı kapatılmıştır. Kalsimetrede U borusundaki su seviyeleri ayarlanmış ve hemen dış ortam musluğunu kapatılmıştır. Kalsimetre şişesi içerisindeki toprakla asit tam karışıp gaz çıkışı tamamlanincaya kadar işleme devam ettirilmiş ve gaz çıkışı tamamlandığında U borusu seviyelerini eşitlenerek, sağ tarafta dereceli borudan çıkan gaz hacmi okunmuştur. Yapılan bu kireç tayin metodu asit ile muamele edilen topraktan çıkan CO<sub>2</sub>'nin ölçülmesi esasına dayanan Scheibler kalsimetresi ile belirlenmiştir (Schlichting ve Blume, 1966).



Şekil 3.11. Şekil-A’da balon jodelere filtre edilen amonyum asetat ile yıkanmış numune, Şekil-B’de sodyum asetat ilavesi sonrası santrifüj işleminin görünümü, Şekil-C’de santrifüj kaplarına alınan toprak numuneleri ve hazırlanan kimyasallar, Şekil-D’de çalkalayıcıdan bir görünüm

KDK tayini için EPA Method 9081 kullanılmıştır. Metoda göre 4 gr toprak örneği tartılarak santrifüj tüpüne aktarıldı üzerine 33 ml sodyum asetat (1N) çözeltisi ilave edildi ve ağzı kapatılarak 5 dk çalkalandı. Çalkalama işlemi tamamlandıktan sonra çözeltinin üst kısmı berraklaşınca kadar santrifüj edildi (5dk kadar). Üstteki berrak sıvı dökülerek bu işlem iki kez daha tekrar edildi. Bu işlemin ardından tüpe 33 ml etil alkol ilave edildi ve 5 dk ağzı kapalı bir şekilde çalkalandı. Santrifüj işleminden sonra üstteki berrak sıvı 100 ml’lik balon jodede toplandı. Amonyum asetat uygulaması 2 defa daha uygulandı ve sıvılar balon jodede toplanarak balon amonyum asetat ile 100 ml’ye tamamlandı. Çözeltinin sodyum konsantrasyonu alev fotometresinde okunarak KDK hesaplandı.

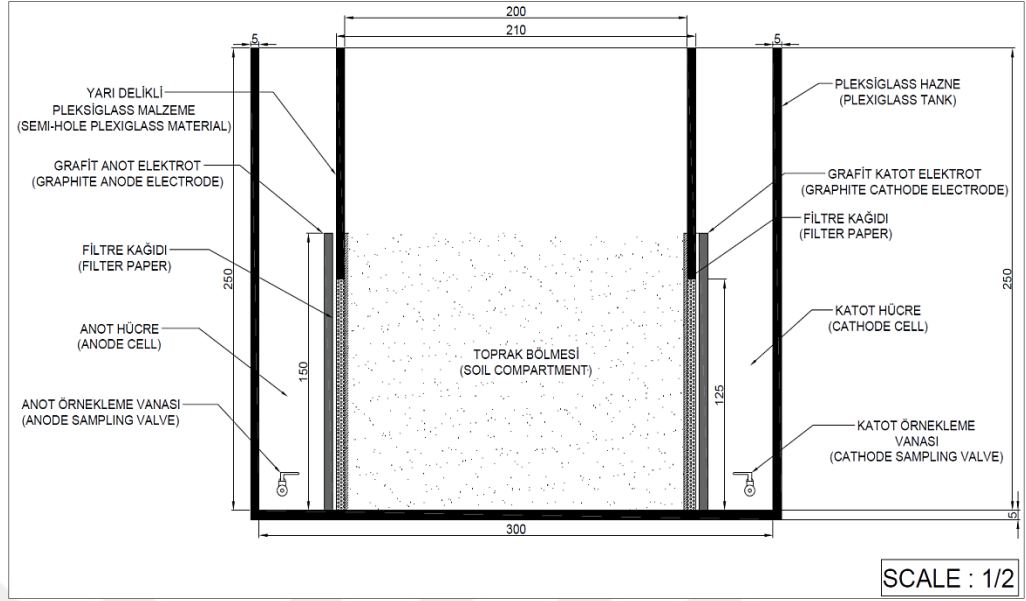
### 3.3. Prosesin Kurulumu



Şekil 3.12. Şekil A’da kurulum aşamasında prosesin önden bir görünümü, Şekil B’de yandan bir görünümü

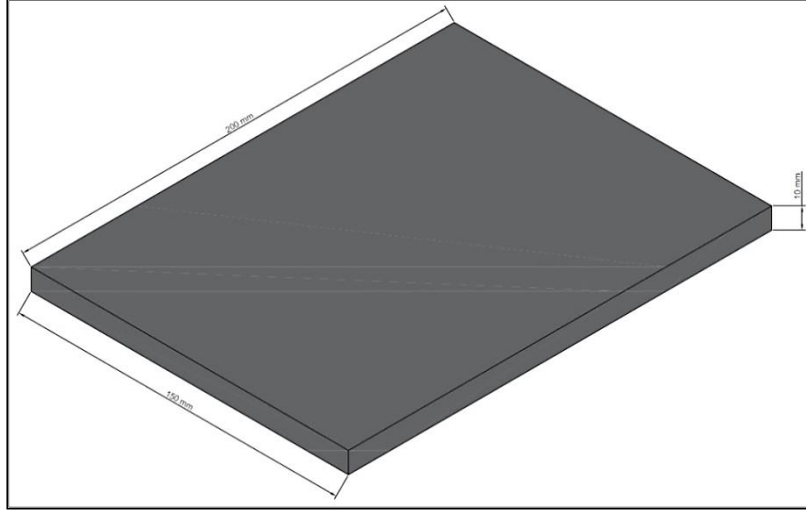
Prosesin kurulumu için gerekli ekipmanlar;

- 300 x 150 x 250 mm (uzunluk x genişlik x yükseklik) boyutlarında pleksiglass hazne,
- 10 x 150 x 200 mm (genişlik x en x boy) boyutlarında grafit elektrotlar,
- 2 adet 150 x 200 mm filtre kağıdı,
- 150 x 200 mm (en x boy) boyutlarında yarı delikli pleksiglass malzeme,
- 2 adet vana ve hortum düzeneği,
- 110 x 160 mm (en x boy) boyutlarında pleksiglass hazne kapağından oluşmaktadır.



Şekil 3.13. Elektrokinetik prosesin genel görünümü

Bu çalışmada kullanılan elektrokinetik prosesin genel görünümü Şekil 3.13’de verilmiştir. Prosesi test etmek amacıyla bir miktar toprak örneği hazne içerisinde yer alan toprak bölmesine doldurulmuştur. Elektroliz hücreleri (Anot ve Katot) arasında toprak geçişini önlemek amacıyla 150 x 200 mm (en x boy) ebatlarında 2 adet filtre kağıdı kullanılmıştır. Ayrıca filtre kağıdını desteklemek ve toprak numunesinden gelen baskıyı azaltmak amacıyla yine 2 adet 150 x 200 mm (en x boy) ebatlarında 3 mm çapında delikleri olan plexiglass malzeme kullanılmıştır. Hazne içerisinde örnekleme yapılabilmesi amacıyla 2 adet vanalı hortum düzeneği kullanılmıştır. Elektroliz sıvısı olarak saf su kullanılmıştır.



Şekil 3.14. 150 x 200 mm ebatında grafit elektrot

Şekil 3.14’de anot ve katot hücrelerine hazne içerisinde elektrik akımını ileterek iyonların hareketini sağlayan 10 x 150 x 200 mm (genişlik x en x boy) ebatlarında 2 adet grafit elektrotlar yerleştirilmiştir. Anot ve katot hücrelerine toprak seviyesini geçmeyecek şekilde saf su ilave edilerek prosesin kapağı kapatılmıştır. Anot ve katot olmak üzere elektrotların toplam yüzey alanı 1340 cm<sup>2</sup> olarak hesaplanmıştır.



Şekil 3.15. ETC 305D DC güç kaynağı

Proses içerisinde reaksiyonun başlaması için gerekli olan DC güç kaynağı (Şekil 3.15) elektrotlara bağlanmıştır. Proses, sabit 3 Amper (A) akım yoğunluğunda 10-20-30 Volt (V) olmak üzere üç farklı voltaj değerinde başlatılmış olup saf toprak,

%50 (yarı doymuş) ve %100 (tam doymuş) yağ konsantrasyonlarında denemeler yapılmıştır. Prosesi çalışması için gereken süre 72 saat olarak belirlenmiştir.

Çizelge 3.2. Prosesin işletilmesinde kullanılan malzeme ve özellikleri

KULLANILAN MALZEME ve ÖZELLİKLERİ	DEĞERLER
Toplam Reaktör Hacmi (cm <sup>3</sup> )	11.25 cm <sup>3</sup>
Aktif Reaktör Hacmi (cm <sup>3</sup> )	6.75 cm <sup>3</sup>
Elektrot Malzemesi	Grafit Elektrot
Elektrotların Toplam Yüzey Alanı (cm <sup>2</sup> )	1340 cm <sup>2</sup>
Reaksiyona Giren Toplam Elektrot Yüzeyi (cm <sup>2</sup> )	600 cm <sup>2</sup>
Elektrot Birim Alanına Düşen Maksimum Akım Yoğunluğu (mA/cm <sup>2</sup> )	5mA/cm <sup>2</sup>
Kullanılan DC Güç Kaynağının Maksimum Kapasitesi (V/A)	30V/5A
Reaktör İşletme Süresi (h)	72 h

Çizelge 3.2’de prosesin işletilmesinde kullanılan malzeme ve özellikleri ile ilgili teknik bilgiler verilmiştir.

#### 3.4. Kirletilmiş Toprak Örneklerinin Hazırlanması

Kirletilmiş toprak örneklerini hazırlamak için 10w 40 dizel motor yağı kullanılmıştır.

Çizelge 3.3. Kullanılan dizel motor yağının özellikleri

SAE Viskozite Sınıfı	Analiz Metodu	Sonuçlar
Yoğunluk, @ 15 °C kg/lt	ASTM D-4052	0.86
Parlama Noktası, COC, °C	ASTM D-92	220
Viskozite, 40 °C, mm <sup>2</sup> /s	ASTM D-445	91.5
Viskozite, 100 °C, mm <sup>2</sup> /s		13.9
Viskozite İndeksi	ASTM D-2270	153
T.B.N., mgKOH/g	ASTM D-2896	8.64
Akma Noktası, °C	ASTM D- 97	-42
Sülfatlı Kül, Ağırlık%	ASTM D-874	1

Çizelge 3.3’de kullanılan dizel motor yağının özellikleri verilmiştir. Kirletilmiş toprak örnekleri 40gr toprak örneğine 2,5 ml (0.054 gr/gr) ve 5ml (0.108 gr/gr) dizel motor yağı eklenecek şekilde hazırlanmıştır. Çalışma sırasında her denemede 6,0 kg

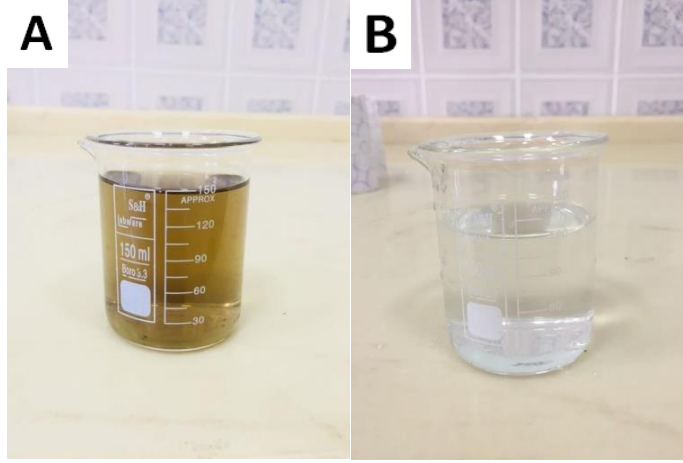
kuru toprak örneği kullanılmış olup örnek daha sonra elektrokinetik arıtım düzeneğine yerleştirilmiştir.

### 3.5. Prosesin Çalışabilirliğinin Test Edilmesi (Ön Çalışma)



Şekil 3.16. Ön çalışmadan bir görünüm

Elektrokinetik prosesin işleyişini gözlemlemek ve ortaya çıkabilecek problemleri gidermek amacıyla bir ön çalışma yapılmıştır. Sistem üzerinde 30V gerilim 5A akım yoğunluğunda bir ön çalışma yapılmış olup ön çalışmanın görünümü Şekil 3.16'da verilmiştir. Ön çalışma sırasındaki gözlemler sonucunda, anot elektrotta katot elektroda göre daha yavaş bir hava kabarcığı oluşumu gözlemlenmiştir. Bu hava kabarcığı oluşumu katot hücrede daha hızlı ve yoğun bir şekilde gerçekleşmiştir. Bu da katot elektrotta anot elektrotta göre reaksiyonun daha hızlı gerçekleştiğini göstermiştir. Proses içerisinde kısmi bir elektroliz işlemi gerçekleşmektedir. Elektroliz işlemi sonucu anot bölgesinde oksijen ( $O_2$ ) gazı açığa çıkarken, katot bölgesinde hidrojen ( $H_2$ ) gazı açığa çıktığı bilinmektedir. pH metre yardımı ile yapılan ölçümde anot hücresinde pH düşüşleri yaşanırken katot hücresinde anot hücresine zıt olarak pH artışları görülmektedir.



Şekil 3.17. A-Anot bölgesi numunesi, B-Katot bölgesi numunesi

Ayrıca Şekil 3.17-A’da anot hücreesindeki sıvıda renk değişimleri (sarı-açık kahve) gözlemlenirken, Şekil 3.17-B’de katot kısmında bir değişikliğe rastlanmamıştır. Zamanla anot hücreesindeki renk değişimi kırmızı ve siyaha doğru değişim gösterirken katot hücreesinde herhangi bir renk değişimine rastlanmamıştır. Ancak katot hücreesinde eser miktarda flok oluşumu ile birlikte dip kısımda yine eser miktarda çökeltme gözlemlenmiştir.

### 3.6. Prosesin Test Edilmesi Sonrası Ortaya Çıkan Problemler

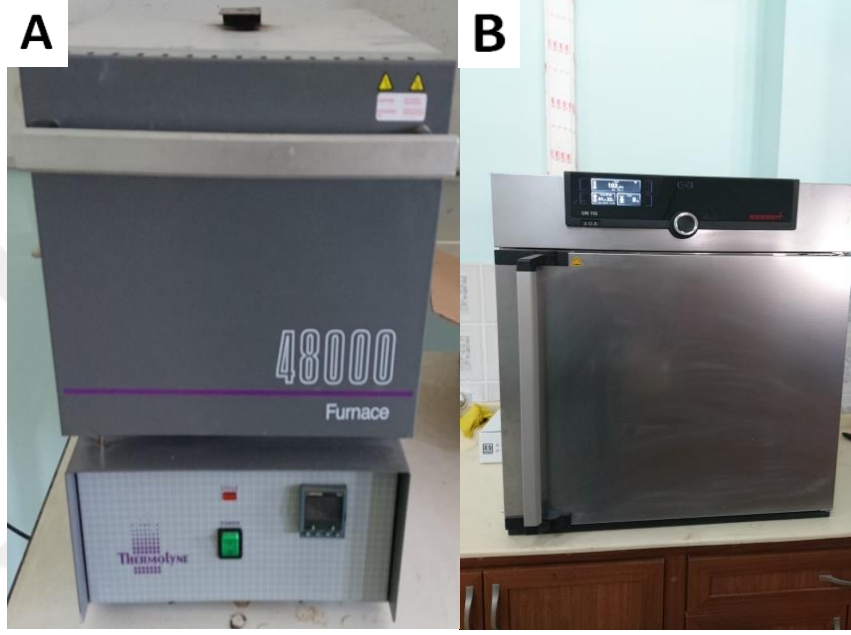
Prosesin kurulumu ve test aşaması sırasında çeşitli problemlerle karşılaşmıştır. Ancak bu problemlere alternatif çözümler getirilerek proses için gerekli tüm şartlar sağlanmıştır. Prosesin test edilmesi sonrası ortaya çıkan problemler ve çözüm önerileri Çizelge 3.4’de verilmiştir.

Çizelge 3.4. Prosesin test edilmesi sonrası ortaya çıkan problemler ve çözüm önerileri

Ortaya Çıkan Problemler	Kullanılan Alternatif Çözüm Yolu
Haznenin muhtemel kısımlardan sızdırma yapması	Soğuk silikon uygulaması
Elektrotların hücreye sabitlenememesi	Zımpara kağıdı ile elektrot çevresindeki pürüzlerin giderilmiştir.
Filtre kağıtlarının hücre içerisinde sabitlenememesi	Bant yardımı ile raylı kısma sıkıştırma yapılarak filtre kağıdı sabitlenmiştir.

### 3.7. Analiz Metodları

Toprak örnekleri 105<sup>0</sup>C'de 24 saat etüvde (MEMMERT UN110) kurutulurak su ve kuru madde içerikleri 550<sup>0</sup>C'ye ayarlanmış fırında (Thermolyne Furnace 48000) 4 saat alıkonularak ağırlık farklarından organik madde içerikleri gravimetrik olarak hesaplanmıştır.



Şekil 3.18. A-Thermolyne Furnace 48000 kül fırınının görünümü, B- MEMMERT UN110 etüv görünümü

Örneklerin pH ve iletkenlik değerini belirlemek için saturasyon çamurunda Jackson (1958) metodu kullanılmıştır. Bu amaçla 100 g toprak örneği saf su ile titrasyon edilerek 1 gün beklenmiş ve Şekil 3.6'da verilen vakum pompa düzeneği (KNF-N 022 AN 18) kullanılarak filtre edilmiştir. Filtrasyon sonrası süzöntü sıvısında pH ve iletkenlik değeri ölçülmüştür.



Şekil 3.19. WTW Multi 3620 IDS marka cihazın görünümü

Çalışmada akım yoğunluğu, sıcaklık, pH, ORP (Oksidasyon Redüksiyon Potansiyeli), EC (Elektriksel İletkenlik) parametreleri Şekil 3.19’da verilen WTW Multi 3620 IDS marka cihaz ile zamana bağlı olarak takip edilmiştir.



Şekil 3.20. FOSS Soxtec 2050 marka yağ ve gres tayin cihazı

Yağ ve gres analizleri için FOSS Soxtec 2050 marka cihaz (Şekil 3.20) kullanılmıştır. Yağ ve gres analizleri için 1-2gr toprak örneği tartılarak numune kaplarına yerleştirilmiş ve numune kaplarına 70-80ml hekzan eklenmiş ve 135<sup>0</sup>C'de 70dk hekzan uçana kadar kaynatılmıştır. Daha sonra numune kapları etüvde 1 saat bekletilmiş ve desikatörde soğutma ve nem alma işleminin ardından yağ ve gres sonucu gravimetrik olarak hesaplanmıştır.



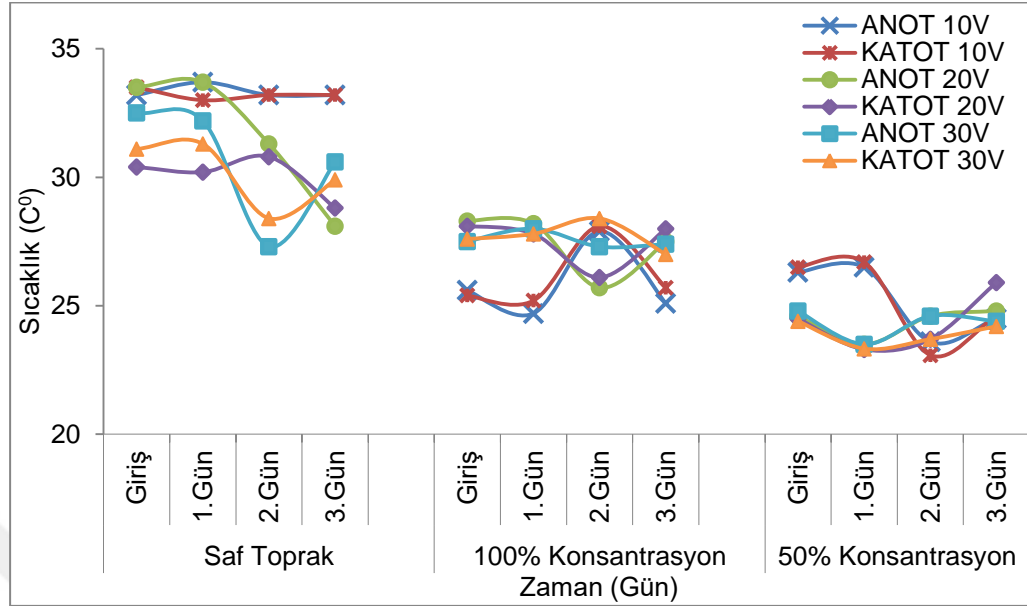
## 4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA



Şekil 4.1. Reaktörün çalışma esnasındaki görünümü

Şekil 4.1’de elektrokinetik reaktörün çalışma esnasındaki görünümü verilmiştir. Elektrokinetik reaktör toplamda 72 saat çalıştırılmış olup günlük toprak örnekleme yapılmıştır. Toprak bölmesi 3 eşit kısma (S1, S2 ve S3) ayrılmış ve ölçümler bu üç kısımdan alınan toprak örneklerinin ortalaması alınarak hesaplanmıştır. Reaktör içerisinde 6 kg toprak örneği kullanılmıştır. Reaktör üzerinde saf toprak (dizel motor yağı eklenmemiş), %50 (yarı doygun) ve %100 (tam doygun) kirlilik konsantrasyonları ile sabit 3A akım yoğunluğunda, 10V, 20V, 30V voltaj değişimlerinde denemeler yapılmış ve analiz sonuçlarına göre aşağıdaki araştırma bulgularına ulaşılmıştır.

## 4.1. Sıcaklık Ölçümleri



Şekil 4.2. Sıcaklık değerlerinin zamana bağlı değişimi

Bir elektroosmotik işlem sırasında sıcaklık değişimi, malzemenin elektriksel iletkenliği ve uygulanan elektrik alan gradyanı ile ilgilidir (Chen ve ark. 2002). Ayrıca sıcaklık viskoziteyi etkilediğinden doğrudan elektroosmotik akışa da etki etmektedir. Sıcaklık ortam koşullarından da çok çabuk etkilenmektedir. Şekil 4.2’de sıcaklık parametresinin zamana bağlı değişim grafiği verilmiştir. Her bir gerilim (10V-20V-30V) çalışması ve konsantrasyon (saf toprak, %100 kons. ve %50 kons.) farklı tarihlerde yapılmıştır.

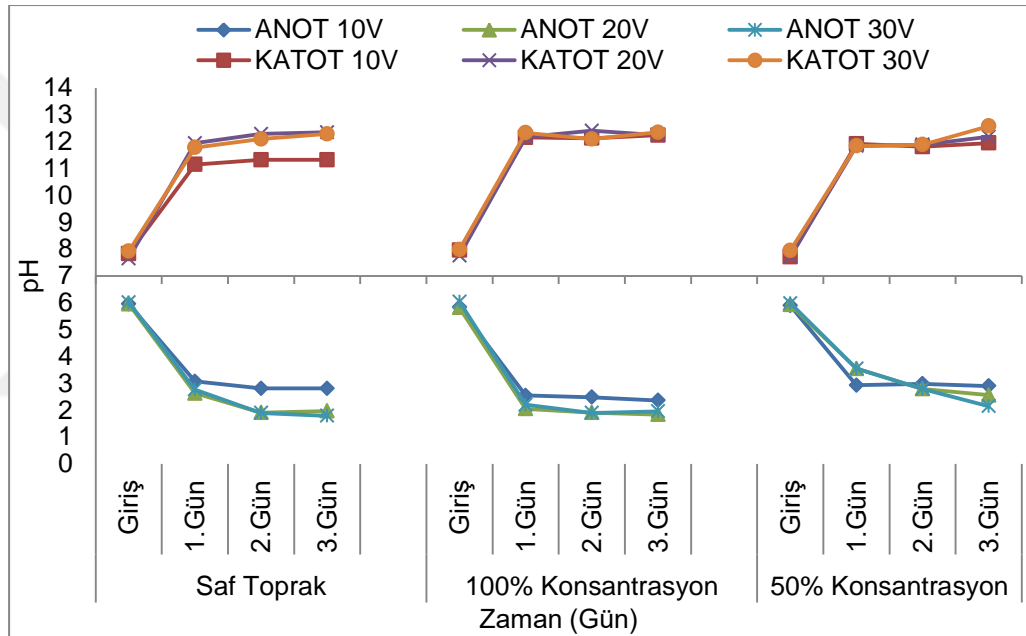
Saf toprak çalışmasında anot ve katot hücre için giriş ve 1.gün 30-35<sup>0</sup>C arasında bir değişiklik göstermiştir. 2.gün anot 20V çalışmasında 33.7<sup>0</sup>C seviyesinden 31.3<sup>0</sup>C seviyesine 30V çalışmasında ise anot ve katot hücrede 27<sup>0</sup>C seviyelerine kadar ani düşüşler görülmüştür. 3.gün ise anot ve katot hücrede 33<sup>0</sup>C ile 28<sup>0</sup>C arasında ölçülmüştür.

%100 konsantrasyon çalışmasında anot ve katot hücre için giriş ve 1.gün 24-28<sup>0</sup>C arasında bir değişiklik göstermiştir. 2.gün anot ve katot 10V çalışmasında sıcaklık 24<sup>0</sup>C seviyelerinden 28<sup>0</sup>C seviyelerine yükselmiştir. Anot ve katot 20V

çalışmasında bu değer 28<sup>0</sup>C seviyelerinden 25<sup>0</sup>C seviyelerine kadar düşmüştür. 3.gün ise sıcaklık değeri 25-28<sup>0</sup>C arasında ölçülmüştür.

%50 konsantrasyon çalışmasında anot ve katot hücre için giriş ve 1.gün 23-27<sup>0</sup>C arasında bir değişiklik göstermiştir. 2.gün anot ve katot 10V çalışmasında sıcaklık 27<sup>0</sup>C seviyelerinden 23<sup>0</sup>C seviyelerine düştüğü görülmüştür. 3.gün ise anot ve katot hücrede 24<sup>0</sup>C ile 26<sup>0</sup>C arasında ölçülmüştür.

#### 4.2. pH Ölçümleri

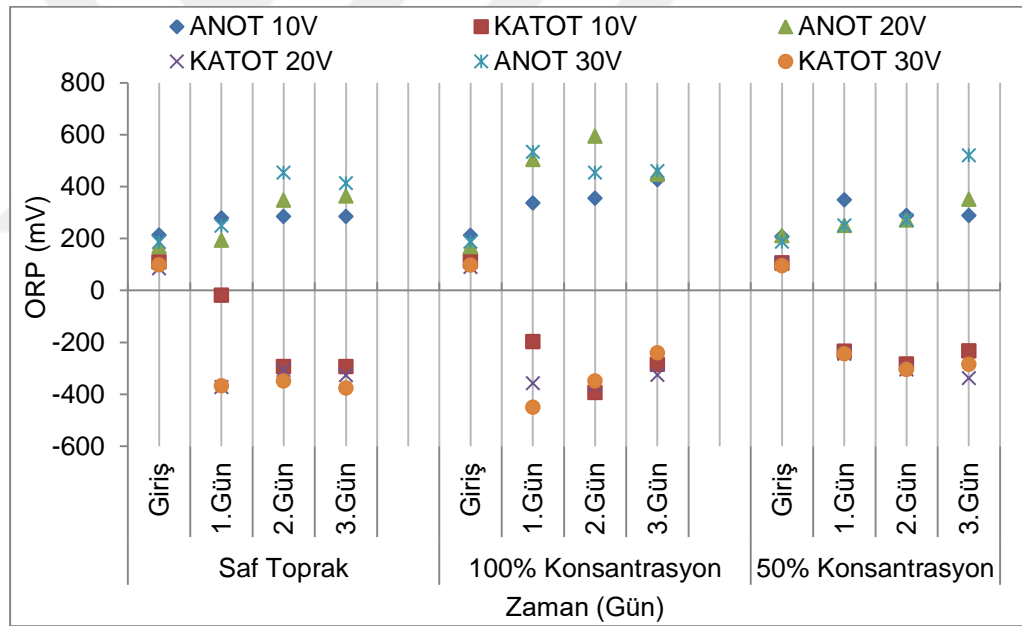


Şekil 4.3. pH miktarının farklı konsantrasyonlarda voltaj ve zamana bağlı değişimi gösterilmiştir.

pH 8'in değerini aştığında, bir kapilerin iç yüzeyindeki silano gruplarının tamamı iyonlaştığı ( $\text{SiOH}(\text{k}) \leftrightarrow \text{SiO}^-(\text{k}) + \text{H}^+(\text{aq})$ ) için elektroosmotik akış hızı pH'ı bağılı değildir. pH 4'ün altında ise silanol gruplarının birçoğu iyonlaşmadığı için pH'ın elektroosmotik akış hızı üzerinde etkisi olmamaktadır. Bu nedenle elektroosmotik akış hızı pH 4 ile 8 arasında değerlendirilmelidir (Heiger, 2000; Landers, 1994).

Şekil 4.3’de pH miktarının farklı konsantrasyonlarda voltaj ve zamana bağlı değişimi verilmiştir. Anot hücrelerinde pH, 6 seviyelerinden 2 seviyesinin altına kadar düşmüştür. Katot hücrelerinde ise yine pH, 6 seviyelerinden 12.5 seviyelerine kadar yükselmiştir (Ferri ve ark., 2009). Bunun nedeni anotta suyun oksidasyonu sonucu  $H^+$  iyonları diğer bir taraftan katotta suyun indirgenmesiyle oluşan  $OH^-$  iyonları bir baz ortamı oluşturmuştur. Proses için anot ve katot hücrelere herhangi bir ajan ilavesi yapılmamıştır. Anot elektrot çevresinde pH düşerken katot elektrot çevresinde pH seviyesi yükselmiştir (Zagury ve ark., 1999). Buda topraktaki pH’ın kirletici tutma ve elektrosmotik akışta önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir (Gomez ve ark., 2009).

### 4.3. ORP Ölçümleri

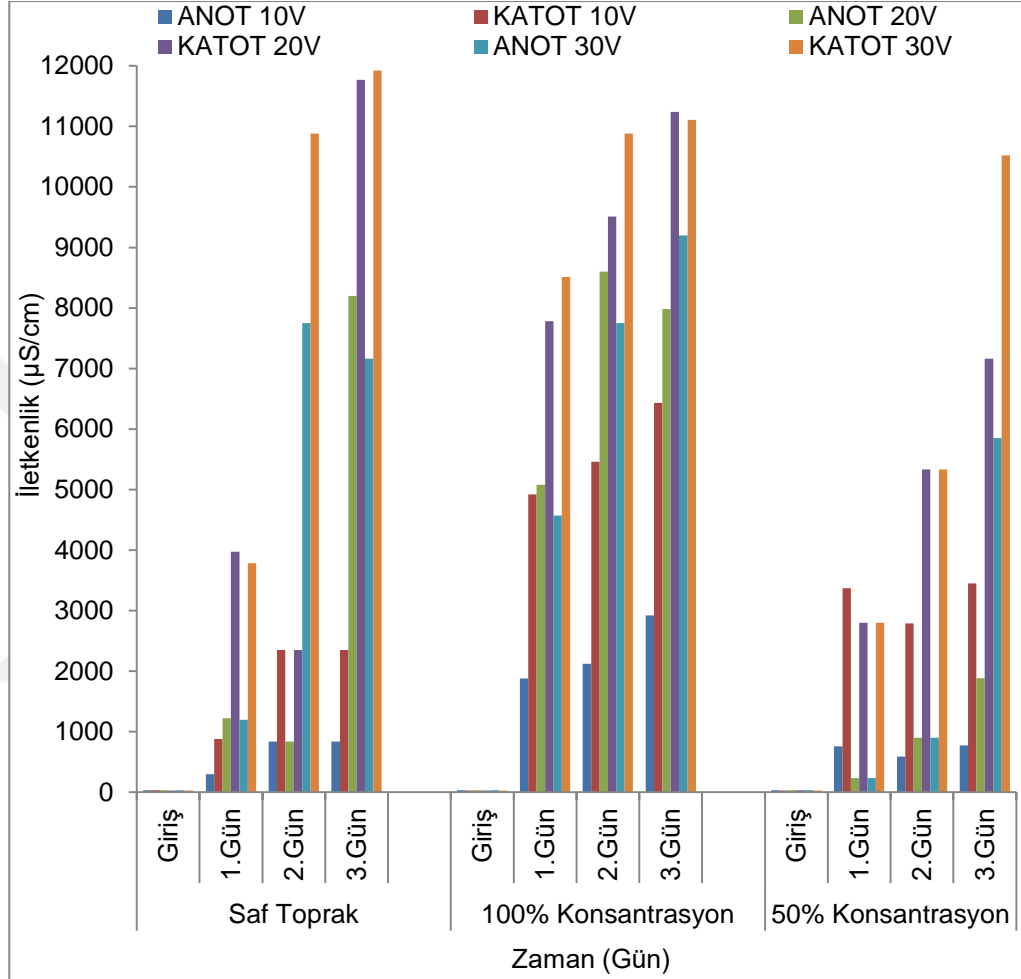


Şekil 4.4. ORP (Oksidasyon Redüksiyon Potansiyeli) parametresinin farklı konsantrasyonlarda voltaj ve zamana bağlı değişim grafiği gösterilmiştir.

Şekil 4.4’de ORP (Oksidasyon Redüksiyon Potansiyeli) parametresinin farklı konsantrasyonlarda voltaj ve zamana bağlı değişim grafiği verilmiştir. Anot hücrelerinde ORP değeri en yüksek 600 mV seviyelerinde iken katot hücrelerinde bu değer -450 mV seviyelerine kadar düşmüştür. Burada ORP’nin yükselmesi anot

hücrenin bozucu/çürütücü etkisinin olduğu, katot hücrenin ise ORP'nin düşmesi sonucu indirgeyici koşullar oluştuğu görülmüştür.

#### 4.4. İletkenlik Ölçümleri

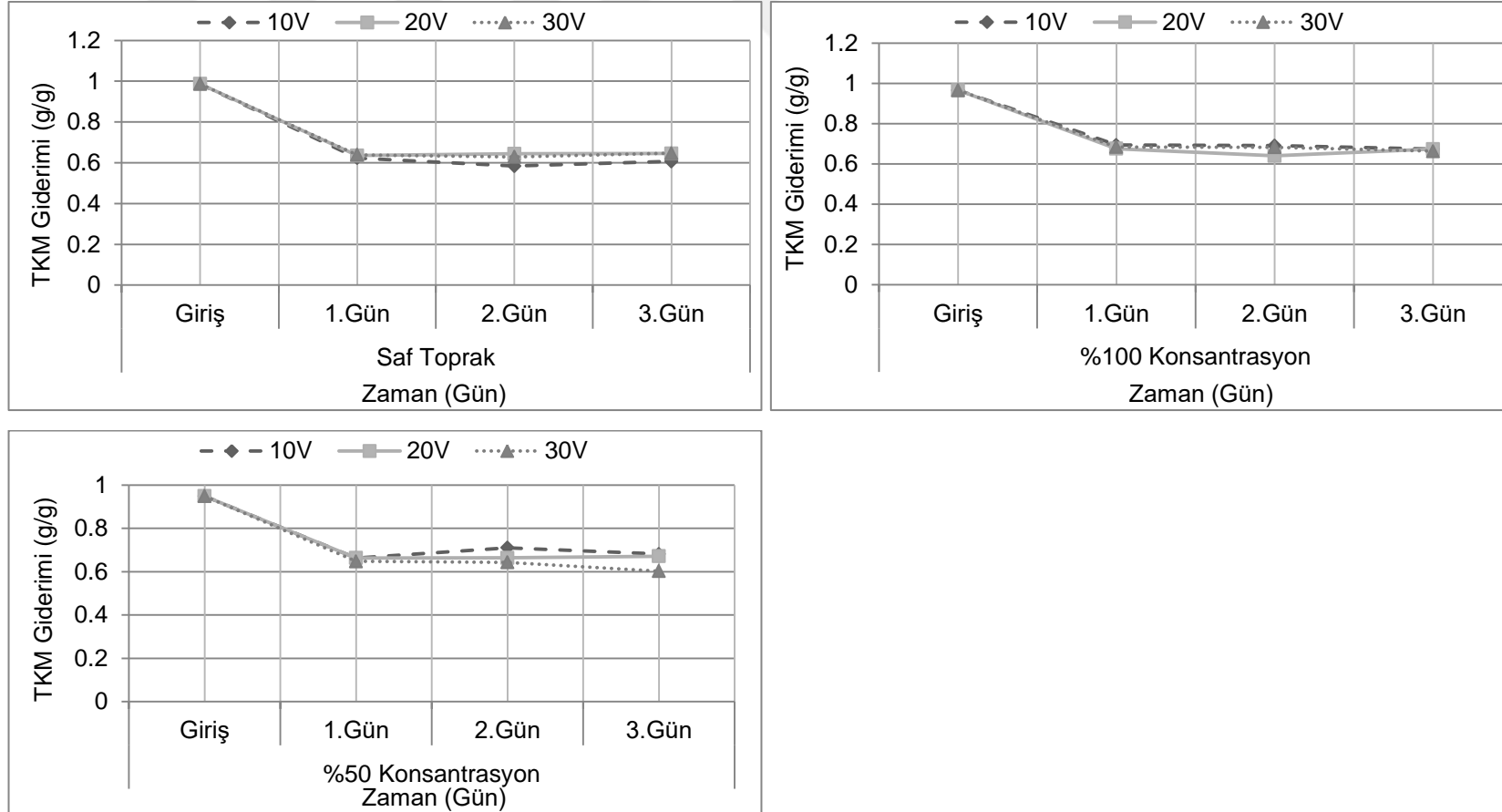


Şekil 4.5. EC (Elektriksel İletkenlik) parametresinin farklı konsantrasyonlarda, voltaj ve zamana bağlı değişim grafiği

İletkenlik parametresi elektrokinetik reaktörün anot ve katot hücrelerinden alınan numune örneklerinde ölçülmüştür. Şekil 4.5’de EC (Elektriksel İletkenlik) parametresinin farklı konsantrasyonlarda, voltaj ve zamana bağlı değişim grafiği verilmiştir. Tüm çalışmalar için giriş iletkenlik değeri 28-33  $\mu\text{S}/\text{cm}$  aralığında ölçülmüştür. Katot hücrende iletkenlik en yüksek 11920  $\mu\text{S}/\text{cm}$  seviyelerinde iken anot hücrende bu değer 880  $\mu\text{S}/\text{cm}$  seviyelerine ölçülmüştür. Katot hücrende elektromigrasyon olayla topraktaki katyonların geçerek bu kısımda iletkenliği

artırdığı düşünülmektedir. Ayrıca anot ve katot hücrelerinde iletkenlik artışı gerilim ve yağ ve gres konsantrasyonu artışı ile doğru orantılı olarak artmıştır. Bunun nedeni kullanılan dizel motor yağının içeriğinde bulunan katyonların iletkenliği artırması olarak açıklanabilir. Ayrıca toprak taneleri arasındaki boşluk suyunda adsorpsiyon/desorpsiyon, çözünme ve çökme olaylarının anot ve katot hücreye iletkenliğe sebep olan iyonların geçişini engellemesi de iletkenliği etkilemektedir. Şekil 4.5’de 1.gün en yüksek iletkenlik değeri 8510 $\mu$ S/cm ile %100 konsantrasyonun 30V 3A katot hücresinde, en düşük iletkenlik değeri ise 231 $\mu$ S/cm ile %50 konsantrasyonun 20V 3A değerinde anot hücresinde gerçekleşmiştir. 2.gün en yüksek iletkenlik değeri saf toprağın 10880  $\mu$ S/cm ile 30V 3A katot hücresinde, en düşük iletkenlik değeri ise 586  $\mu$ S/cm ile %50 konsantrasyonun 10V 3A anot hücresinde gerçekleşmiştir. 3.gün en yüksek iletkenlik değeri 11920  $\mu$ S/cm ile saf toprağın 30V 3A katot hücresinde, en düşük iletkenlik değeri ise 771  $\mu$ S/cm ile %50 konsantrasyonun 10V 3A anot hücresinde gerçekleşmiştir.

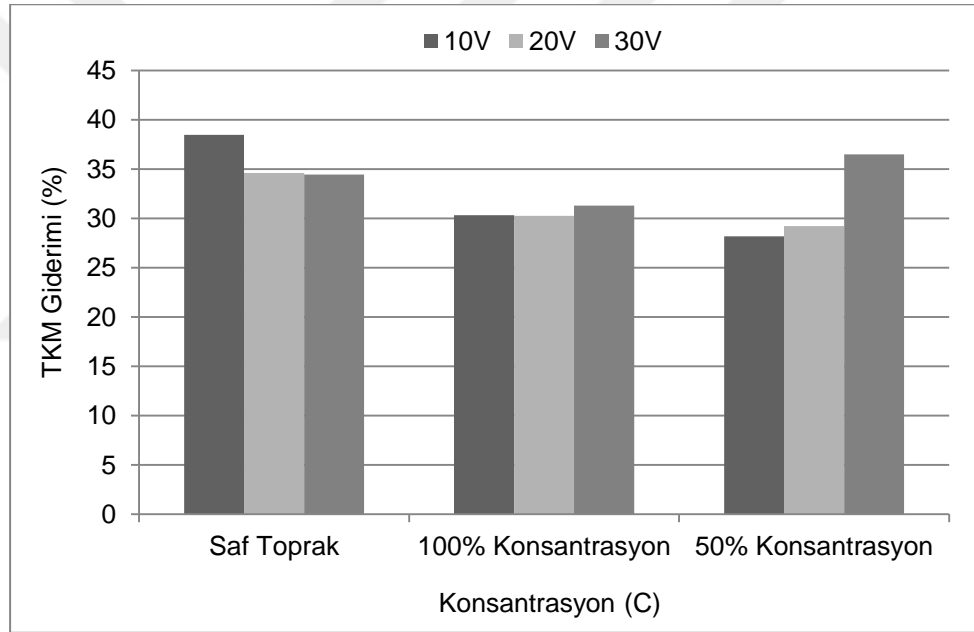
## 4.5. TKM-UKM Ölçümleri



Şekil 4.6. Saf toprak, % 100 konsantrasyon ve % 50 konsantrasyon'da yapılan çalışmaların TKM giderimleri

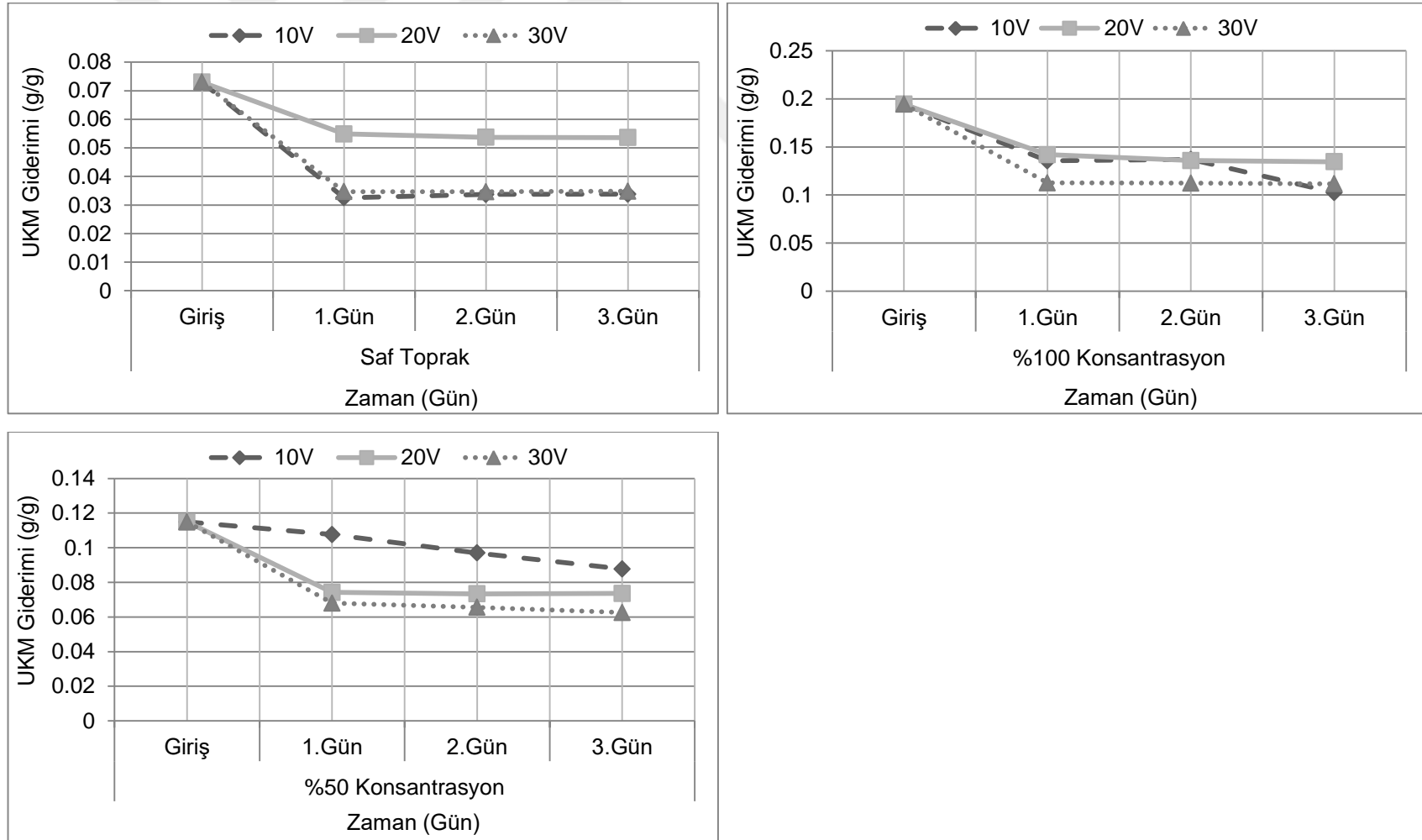
Saf toprak, %100 konsantrasyon ve %50 konsantrasyon'da yapılan çalışmaların TKM-UKM (g/g) giderimleri Şekil 4.6'da verilmiştir. Yapılan TKM-UKM analizleri toprak bölmesinden 3 ayrı noktadan alınan toprak numunelerinin ortalaması ile hesaplanmıştır. Burada amaç topraktaki organik ve inorganik madde miktarını belirleyerek petrolün topraktan giderimini kontrol etmektir.

TKM giderimi için saf toprak, %100 ve %50 konsantrasyonlarında yapılan çalışmalarda 1. gün yaklaşık 1.0 g/g seviyelerinden 0.7-0.6 g/g seviyelerinde kadar düşmüştür. 2. gün ve 3. gün ise ciddi bir giderim görülmemiş olup sistemin giderimi durma noktasına gelmiştir.



Şekil 4.7. TKM parametresinin farklı konsantrasyonlarda gerilime bağlı giderimi

Şekil 4.7'de saf toprak, %100 konsantrasyon ve %50 konsantrasyon'da yapılan çalışmalar sonucu TKM (%) giderimleri verilmiştir. Dizel motor yağı eklenmeyen saf toprak için elektrokinetik arıtım prosesinde en iyi giderim %38.5 ile 10V denemesinde, %100 konsantrasyon (tam doygun) için en iyi giderim %31.3 ile 30V denemesinde, %50 konsantrasyon'da (yarı doygun) ise en iyi giderim %36.5 giderim ile 30V denemesinde gerçekleşmiştir.



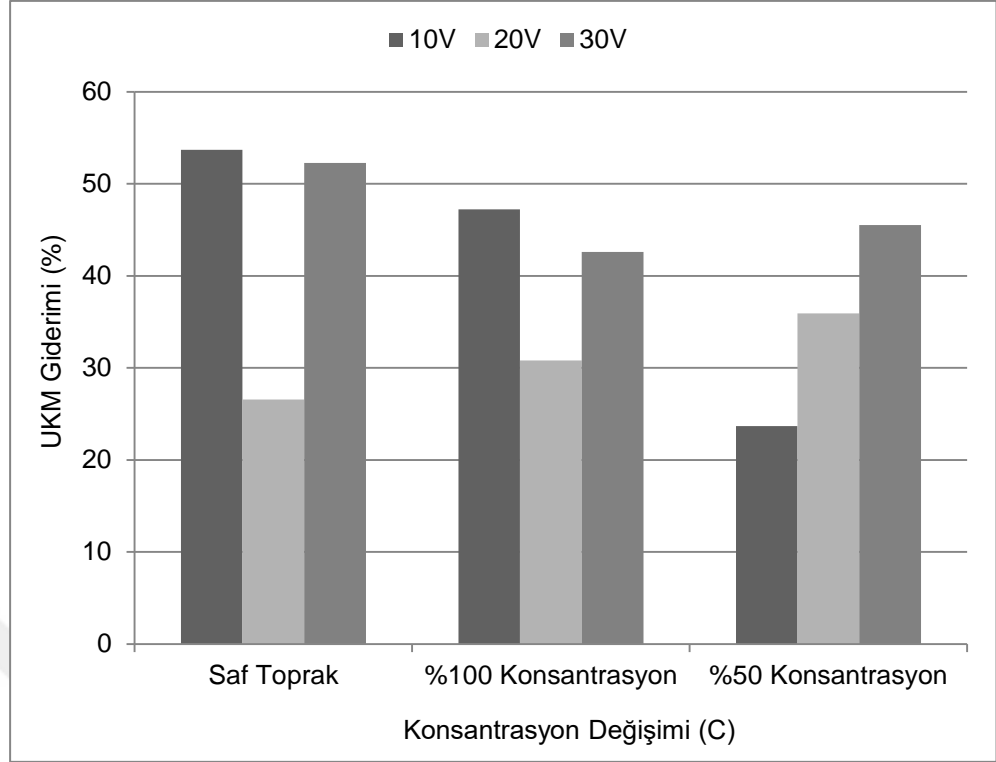
Şekil 4.8. Saf toprak, %100 konsantrasyon ve % 50 konsantrasyon'da yapılan çalışmaların UKM giderimleri

Şekil 4.8’de saf toprak, %100 konsantrasyon ve %50 konsantrasyon’da yapılan çalışmaların UKM (g/g) giderimleri verilmiştir.

UKM giderimi için saf toprak numunesinde yapılan çalışmada 10V ve 30V gerilim uygulandığında 1. gün giderim 0.07 (g/g) seviyelerinden 0.03 (g/g) seviyelerine kadar düşmüştür. 2. gün ve 3. gün ise ciddi bir giderim görülmemiştir. 20V gerilim denemesinde ise 0.07 (g/g) seviyelerinden 0.05 (g/g) seviyelerine kadar düşmüştür. 2. gün ve 3. gün ise yine ciddi bir giderim görülmemiştir.

UKM giderimi için %100 konsantrasyon (tam doygun) numunesinde yapılan çalışmada 10V ve 20V gerilim uygulandığında 1. gün giderim 0.19 (g/g) seviyelerinde 0.14 (g/g) seviyelerine kadar düşmüştür. 2. gün ciddi bir giderim görülmemiştir. Ancak 3.gün 10V gerilim uygulamasında 0.14 (g/g) seviyelerinden 0.11 (g/g) seviyelerine düşmüştür. 30V gerilim uygulamasında ise 1.gün 0.19 (g/g) seviyelerinden 0.11 (g/g) seviyelerine kadar düşmüştür. 2. gün ve 3. gün ise yine ciddi bir giderim görülmemiştir.

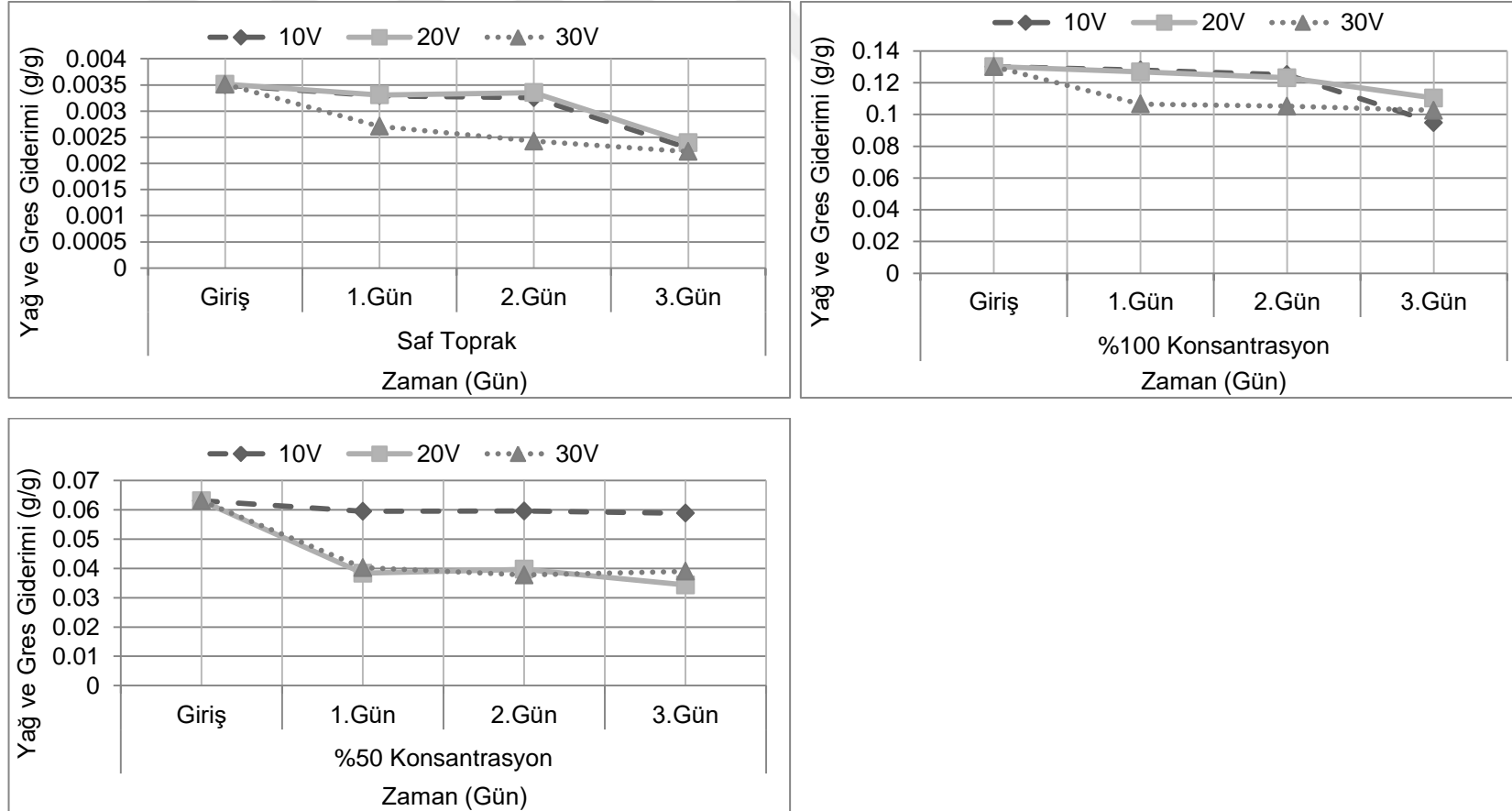
UKM giderimi için %50 konsantrasyon (yarı doygun) numunesinde yapılan çalışmada 20V ve 30V gerilim uygulandığında 1. gün giderim 0.11 (g/g) seviyelerinde 0.06 (g/g) seviyelerine kadar düşmüştür. 2.gün ve 3.gün ciddi bir giderim görülmemiştir. 10V gerilim uygulamasında ise 3.gün sonunda 0.11 (g/g) seviyelerinden 0.08 (g/g) seviyelerine kadar bir giderim sağlanmıştır.



Şekil 4.9. UKM parametresinin farklı konsantrasyonlarda gerilime bağlı giderimi

Şekil 4.9’da saf toprak, %100 konsantrasyon ve %50 konsantrasyon’da yapılan çalışmalar sonucu UKM (%) giderimleri verilmiştir. Dizel motor yağı eklenmeyen saf toprak için elektrokinetik arıtım prosesinde en iyi giderim %53.7 ile 10V denemesinde, %100 konsantrasyon (tam doygun) için en iyi giderim %47.2 ile 10V denemesinde, %50 konsantrasyon’da (yarı doygun) ise en iyi giderim %45.5 giderim ile 30V denemesinde gerçekleşmiştir.

## 4.6. Yağ ve Gres Ölçümleri



Şekil 4.10. Saf toprak, %100 konsantrasyon ve % 50 konsantrasyon'da yapılan çalışmaların Yağ ve Gres giderimleri

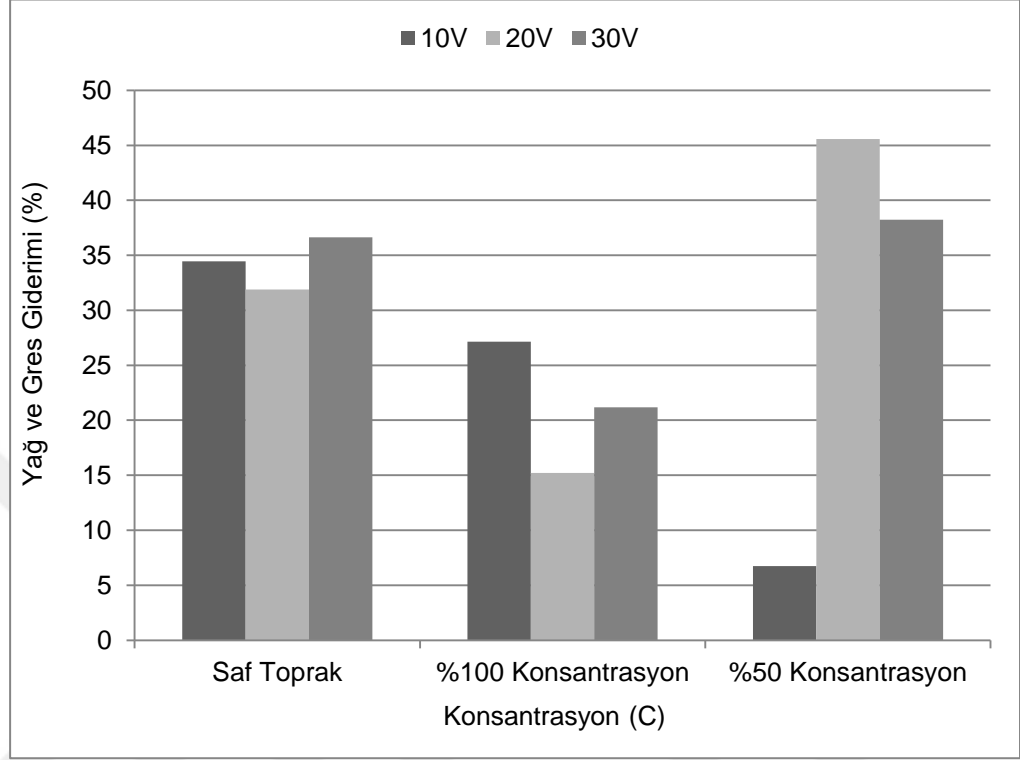
Şekil 4.10'da saf toprak, %100 konsantrasyon ve %50 konsantrasyon'da yapılan çalışmaların Yağ ve Gres (g/g) giderimleri verilmiştir.

Yağ ve Gres (g/g) giderimi için saf toprak numunesinde uygulanan 10V ve 20V gerilim altında yapılan çalışmalar benzer sonuçlar vermiştir. 1.gün giriş yağ ve gres konsantrasyonu olan 0.0035 g/g seviyelerinden yaklaşık olarak 0.0033 g/g seviyelerinde kadar düşmüştür. 2. gün giderimde bir değişim olmamıştır. 3. gün ise 0.0033 g/g seviyelerinden 0.0024 g/g seviyelerine kadar giderimin devam ettiği görülmüştür. 30V gerilim uygulandığında ise 1.gün 0.0035 g/g seviyesinden 0.0027 g/g seviyesine, 2.gün 0.0024 g/g seviyesine, 3.gün 0.0022 g/g seviyelerine kadar devam etmiştir.

Yağ ve Gres (g/g) giderimi için %100 konsantrasyon numunesinde 10V gerilim altında yapılan çalışmalarda 1.gün giriş yağ ve gres konsantrasyonu olan 0.130 g/g seviyelerinden yaklaşık olarak 0.128 g/g seviyelerinde kadar düşmüştür. 2.gün bu değer 0.128 g/g seviyelerinden 0.125 g/g seviyelerinde kadar düşmüştür. 3. gün ise 0.095 g/g seviyelerine kadar giderim devam etmiştir. 20V gerilim uygulandığında ise 1.gün 0.130 g/g seviyesinden 0.127 g/g seviyesine, 2.gün bu değer 0.127 g/g seviyelerinden 0.123 g/g seviyelerinde kadar düşmüştür. 3.gün ise 0.110 g/g seviyesine kadar giderim sağlanmıştır. 30V gerilim uygulandığında ise 1.gün 0.130 g/g seviyesinden 0.106 g/g seviyesine, 2.gün bu değer 0.106 g/g seviyelerinden 0.105 g/g seviyelerinde kadar düşmüştür. 3.gün ise 0.102 g/g seviyesine kadar gerilemiştir.

Yağ ve Gres (g/g) giderimi için %50 konsantrasyon numunesinde 10V gerilim altında yapılan çalışmalarda 1.gün giriş konsantrasyonu olan 0.063 g/g seviyelerinden 0.059 g/g seviyesine kadar giderim sağlanmıştır. 2.gün giderimde ciddi bir değişime rastlanmamıştır. 3.gün ise 0.058 g/g seviyesine kadar giderim devam etmiştir. 20V ve 30V gerilim altında yapılan çalışmalar benzer sonuçlar vermiştir. 20V gerilim altında yapılan çalışmada 1.gün 0.063 g/g seviyesinden 0.038 g/g seviyesine kadar giderim sağlanmıştır. 2.gün giderimde ciddi bir değişime rastlanmamıştır. 3.gün ise 0.034 g/g seviyesine kadar giderim devam etmiştir. 30V

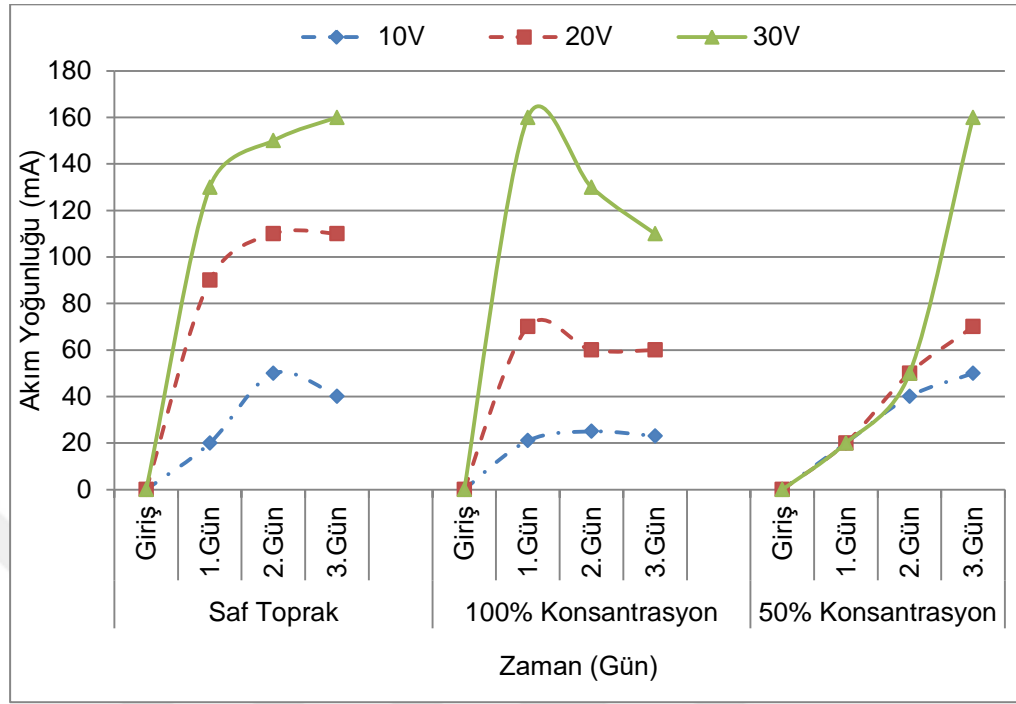
gerilim altına yapılan çalışmada 1.gün 0.063 g/g seviyesinden 0.040 g/g seviyesine kadar giderim sağlanmıştır. 2. ve 3.gün ise 0.038 seviyelerinde giderim sağlanmıştır.



Şekil 4.11. Yağ ve Gres parametresinin farklı konsantrasyonlarda gerilime bağlı giderimi

Şekil 4.11’de saf toprak, %100 konsantrasyon ve %50 konsantrasyon’da yapılan çalışmalar sonucu Yağ ve Gres (%) giderimleri verilmiştir. Dizel motor yağı eklenmeyen saf toprak için elektrokinetik arıtım prosesinde en iyi giderim %36.6 ile 30V denemesinde, %100 konsantrasyon (tam doygun) için en iyi giderim %27.1 ile 10V denemesinde, %50 konsantrasyon’da (yarı doygun) ise en iyi giderim %45.6 giderim ile 20V denemesinde gerçekleşmiştir.

## 4.7. Akım Yoğunluğu Ölçümleri



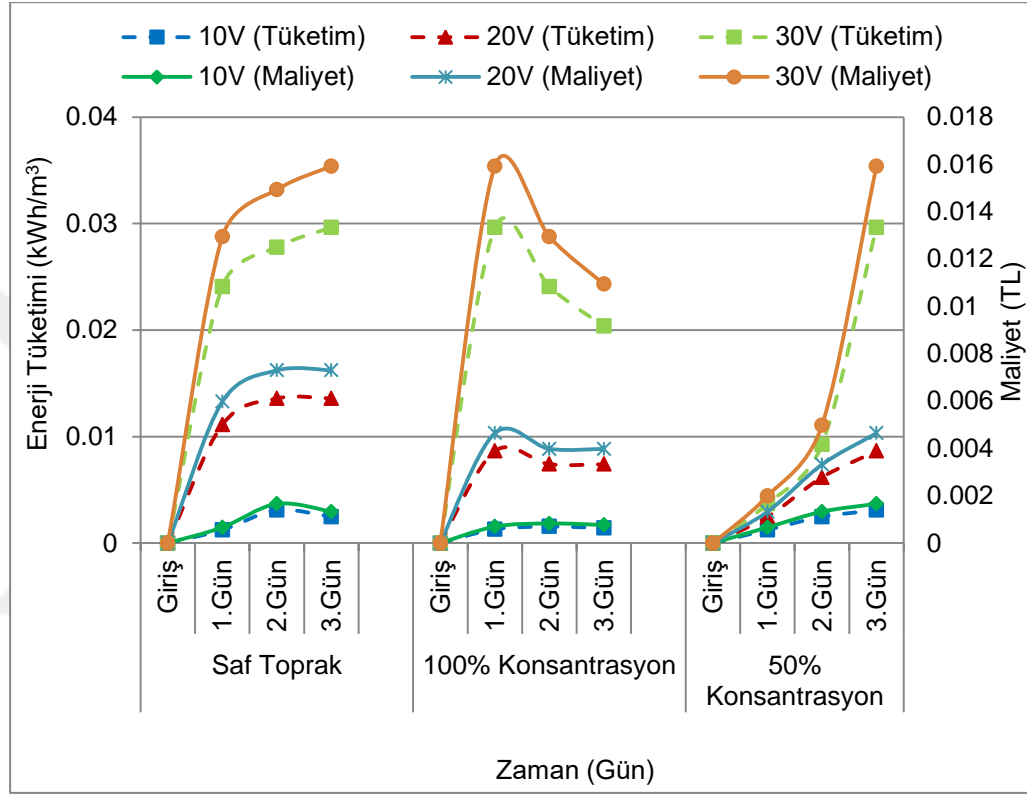
Şekil 4.12. Zamana bağlı akım yoğunluğu grafiği

Sistemin akım yoğunluğu kullanılan akım ve voltaj göstergeli DC güç kaynağı ile günlük olarak takip edilmiştir (Şekil 3.15). Kullanılan DC güç kaynağı ile akım yoğunluğu ölçümünü anot ve katot elektrotlar arasındaki iletkenliğe bağlı olarak iletkenin birim kesitinden geçen akımın miktarına göre hesaplamaktadır.

Şekil 4.12’de akım yoğunluğunun zamana bağlı değişimi verilmiştir. Akım yoğunluğundaki artış iletkenliğin artışı ile doğru orantılıdır. Sisteme uygulanan gerilimin (10V-20V-30V) artırılması toprak içerisindeki iyonların (Anyon ve Katyonlar) geçişini hızlandırmış olup anot ve katot hücrede iletkenliğin zamana bağlı olarak artması ile reaksiyon hızlanmış sistemin akım yoğunluğu da artmıştır. Bu tür sistemlerde akım yoğunluğu kirlilik gideriminin kontrolünde büyük önem taşıyan bir parametredir. Kısacası akım yoğunluğu sistemin iletkenliği ve buna bağlı olarak reaksiyon hızı hakkında bize bilgi verdiğinden doğal olarakta kirleticilerin giderimi hakkında da tahmin yürütülebilmektedir. Ancak, her zaman yüksek akım yoğunluğu yüksek giderim anlamına gelmemektedir. Bu sistemin pH’sına, tamponlama

kapasitesine ve konsantrasyonuna da bağlıdır. Bu nedenle sistem arıtılabileceği kapasitede arıtmış olur ancak optimum koşullar aşıldığında sistem sadece enerji israfı ve fazla maliyet getirmektedir.

#### 4.8. Enerji Tüketimi ve Maliyet Hesabı



Şekil 4.13. Zamana bağlı enerji tüketimi ve maliyet grafiği

Enerjik ve ekonomik yönler, temiz metodolojilerin geliştirilmesinde kilit bir rol oynamaktadır, bu nedenle toprağın bir m<sup>3</sup>'ü için kWh başına reel enerji tüketimi hesabı 4.1'de maliyet hesabı ise 4.2'de verilmiştir.

$$\text{Enerji Tüketimi} \left( \frac{\text{kWh}}{\text{m}^3} \right) = \frac{\text{Enerji Testi (W * h/1000)}}{\text{Hacim(m}^3\text{)}} \quad (4.1)$$

$$\text{Maliyet} \left( \frac{\text{Gerçek}}{\text{m}^3} \right) = \text{Enerji Tüketimi} \left( \frac{\text{kWh}}{\text{m}^3} \right) * 0.5375 \left( \frac{\text{Gerçek}}{\text{m}^3} \right) \quad (4.2)$$

Şekil 4.13’de verilen enerji tüketimi-maliyet grafiğinde EPDK (Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu) tarafından ulusal tarifelerde açıklanan Mart 2019 tarihli tek zamanlı mesken elektrik kWh fiyatı 0.5375 TL/kWh üzerinden hesaplanmıştır. Saf toprak için yapılan çalışmada toplam enerji tüketimi 0.13 kWh/m<sup>3</sup>, toplam maliyeti 0.07 TL/m<sup>3</sup>’tür. %50 konsantrasyonda yapılan çalışmada toplam enerji tüketimi 0.07 kWh/m<sup>3</sup>, toplam maliyeti 0.04 TL/m<sup>3</sup>’tür. %100 konsantrasyonda yapılan çalışmada toplam enerji tüketimi ise 0.10 kWh/m<sup>3</sup>, toplam maliyeti ise 0.06 TL/m<sup>3</sup>’tür olarak hesaplanmıştır. Enerji tüketimi uygulanan akım yoğunluğuna ve konsantrasyon değişimine bağlı olarak artış göstermiştir. En yüksek enerji tüketimi %100 konsantrasyonun 1.gün’ü ile gerçekleşmiştir.

Çizelge 4.1. 10V 3A Saf Toprak, %100 ve %50 Konsantrasyonda kirlenmiş toprak örneklerinin analiz sonuçları

	Zaman (GÜN)	pH		İletkenlik ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )		ORP (mV)		Akım Yoğunluğu (A)	Sıcaklık ( $^{\circ}\text{C}$ )		Yağ ve Gres Giderimi (g/g)	
		Anot	Katot	Anot	Katot	Anot	Katot		Anot	Katot		
10V 3A ANALİZLERİ	SAF TOPRAK	GİRİŞ	5.95	7.83	33.7	29	212.6	110.1	0.000	33.2	33.5	0.0035
		1.GÜN	3.07	11.15	297	880	278	-19	0.020	33.7	33	0.0033
		2.GÜN	2.81	11.32	835	2350	285.1	-293	0.050	33.2	33.2	0.0033
		3.GÜN	2.81	11.32	835	2350	285.1	-293	0.040	33.2	33.2	0.0023
	%100 KONS.	GİRİŞ	5.83	7.96	31.5	28.4	211.5	113.4	0.000	25.6	25.4	0.1302
		1.GÜN	2.55	12.16	1875	4920	337	-197.4	0.021	24.7	25.2	0.1279
		2.GÜN	2.48	12.13	2120	5460	354.9	-392.8	0.025	27.9	28.1	0.1251
		3.GÜN	2.36	12.24	2920	6430	426.4	-285.5	0.023	25.1	25.7	0.0948
	50% KONS.	GİRİŞ	5.89	7.71	32.3	28.7	207.4	106.1	0.000	26.3	26.5	0.0631
		1.GÜN	2.93	11.92	754	3370	348.6	-234.2	0.020	26.5	26.7	0.0595
		2.GÜN	2.98	11.81	586	2790	288.7	-284.2	0.040	23.6	23.1	0.0595
		3.GÜN	2.9	11.95	771	3450	288.2	-233	0.050	24.5	24.6	0.0589

Çizelge 4.2. 20V 3A Saf Toprak, %100 ve %50 Konsantrasyonda kirlenmiş toprak örneklerinin analiz sonuçları

	Zaman (GÜN)	pH		İletkenlik ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )		ORP (mV)		Akım Yoğunluğu (A)	Sıcaklık ( $^{\circ}\text{C}$ )		Yağ ve Gres Giderimi (g/g)	
		Anot	Katot	Anot	Katot	Anot	Katot		Anot	Katot		
20V 3A ANALİZLERİ	SAF TOPRAK	GİRİŞ	5.96	7.65	32.6	28.2	168.7	85.4	0.000	33.5	30.4	0.0035
		1.GÜN	2.63	11.94	1223	3970	193	-372	0.090	33.7	30.2	0.0033
		2.GÜN	1.91	12.29	835	2350	347.8	-307.3	0.110	31.3	30.8	0.0034
		3.GÜN	1.97	12.35	8200	11770	363.7	-327.4	0.110	28.1	28.8	0.0024
	%100 KONS.	GİRİŞ	5.82	7.76	33.2	28.8	169.1	90.5	0.000	28.3	28.1	0.1302
		1.GÜN	2.05	12.17	5080	7780	504.3	-357.8	0.070	28.2	27.8	0.1268
		2.GÜN	1.91	12.41	8600	9510	594	-362.6	0.060	25.7	26.1	0.1231
		3.GÜN	1.84	12.24	7980	11240	447.9	-325.5	0.060	27.5	28	0.1104
	%50 KONS.	GİRİŞ	5.93	7.72	33.6	29	211.3	101.8	0.000	24.6	24.5	0.0631
		1.GÜN	3.55	11.84	231	2800	250.5	-244.1	0.020	23.5	23.3	0.0384
		2.GÜN	2.79	11.89	901	5330	270.9	-304.7	0.050	24.6	23.7	0.0397
		3.GÜN	2.56	12.18	1885	7160	351.9	-338.3	0.070	24.8	25.9	0.0344

Çizelge 4.3. 30V-3A Saf Toprak, %100 ve %50 Konsantrasyonda kirletilmiş toprak örneklerinin analiz sonuçları

	Zaman (GÜN)	pH		İletkenlik ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )		ORP (mV)		Akım Yoğunluğu (A)	Sıcaklık ( $^{\circ}\text{C}$ )		Yağ ve Gres Giderimi (g/g)	
		Anot	Katot	Anot	Katot	Anot	Katot		Anot	Katot		
30V 3A ANALİZLERİ	SAF TOPRAK	GİRİŞ	6.02	7.92	33.1	28.5	185.5	98.5	0.000	32.5	31.1	0.0035
		1.GÜN	2.77	11.78	1196	3780	248.6	-367.6	0.130	32.2	31.3	0.0027
		2.GÜN	1.9	12.1	7750	10880	453.8	-349.1	0.150	27.3	28.4	0.0024
		3.GÜN	1.79	12.29	7160	11920	412.6	-376.1	0.160	30.6	29.9	0.0022
	%100 KONS.	GİRİŞ	6.04	7.98	31.3	28.3	187.4	97.5	0.000	27.5	27.6	0.1302
		1.GÜN	2.2	12.33	4570	8510	533.5	-449.8	0.160	28	27.8	0.1065
		2.GÜN	1.9	12.1	7750	10880	453.8	-349.1	0.130	27.3	28.4	0.1052
		3.GÜN	1.96	12.35	9200	11110	459.8	-240.6	0.110	27.4	27	0.1026
	%50 KONS.	GİRİŞ	5.98	7.95	31.9	28.7	187.5	94.3	0.000	24.8	24.4	0.0631
		1.GÜN	3.55	11.84	231	2800	250.5	-244.1	0.020	23.5	23.33	0.0402
		2.GÜN	2.79	11.89	901	5330	270.9	-304.7	0.050	24.6	23.7	0.0377
		3.GÜN	2.15	12.58	5850	10520	520.7	-284.6	0.160	24.4	24.2	0.0389

## 5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Bu çalışma, Şanlıurfa Kısas Köyü Apalı Mevkii'den alınan yüksek kil içeriğine sahip Şanlıurfa ili Harran Ovası Harran Toprak Serisi numunelerin elektrokinetik yöntem ile analizini kapsamaktadır.

Çalışma kapsamında bir elektrokinetik arıtım prosesi tasarlanmıştır. Tasarlanan proses ile %50 konsantrasyonda (yarı doygun) kirletilmiş toprak numunesinde toplamda %45.6 yağ ve gres giderimine ulaşılmıştır. %50 konsantrasyonda yapılan çalışma için optimum giderim 20V gerilim uygulamasında gerçekleşmiştir. Yağ ve gres gideriminin yapıldığı %100 konsantrasyonda (tam doygun) yapılan çalışmada ise en yüksek %27.1'lik giderim ile 10V gerilim altında sağlanmıştır. %100 konsantrasyonda yapılan çalışma için optimum giderim 10V gerilim uygulamasında gerçekleşmiştir. Çalışmada yağ ve gres konsantrasyonunun artması toprak taneleri arasında elektroosmotik akışı yavaşlatarak arıtım süresine, doğal olarakta arıtım verimine olumsuz yönde etki ettiğini ortaya koymuştur. Akım yoğunluğunun artması iyonların hareketini doğal olarakta elektroosmotik akışı hızlandırdığında giderim veriminide doğru oranda artırmıştır.

Yapılan çalışmada TKM-UKM gideriminde alınan toprak numunelerinin homojen olması önemlidir. Ayrıca ölçümden kaynaklanan hata paylarını en aza indirmek için prosesin daha uzun süreli çalıştırılması önem arz etmektedir. Giriş kirletici konsantrasyonu göz önünde bulundurulduğunda TKM için optimum giderim 30V gerilim altında %31.3'lük giderim ile %100 konsantrasyon çalışmasında gerçekleşmiştir(Şekil 4.7). UKM giderimi için 10V gerilim altında %47.2'lik giderim ile %100 konsantrasyon çalışmasında gerçekleşmiştir(Şekil 4.9).

Şekil 4.5'de verilen iletkenlik anot hücresinde en düşük 231  $\mu\text{S}/\text{cm}$  seviyelerinde iken katot hücreinde en yüksek 11920  $\mu\text{S}/\text{cm}$  olarak ölçülmüştür. Anot ve katot hücrelerindeki bu iletkenlik farkı toprak içerisinde elektromigrasyon olayla katyonların geçerek bu kısımda iletkenliği artırdığını ortaya koymuştur.

pH parametresi ağır metallerin elektrokinetikle giderim miktarını tahmin etmede en önemli faktördür. Çünkü sorbsiyon/desorbsiyon hem de çökelme/çözünme gibi mekanizmalar ortam pH'ından çok fazla etkilenmektedir. Şekil 4.3'de verilen pH parametresinin ilk 24 saat içerisinde anotta 2, katotta 12.5 seviyelerine kadar değişiklik göstermesi burada kirleticilerin giderimini büyük orada etkilemiştir. Yüksek asidik yada alkali pH değerlerinde giderim veriminin durma noktasına geldiği sonucuna varılmıştır.

Proses içerisinde elektrolit kullanılması ve pH'nın dengelenmesi sistemin sürekliliği için önemlidir.

Yağ ve Gres giderimi için yapılmış olan laboratuvar ölçekli elektrokinetik arıtım prosesinin kesikli sistem yerine sürekli sistem şeklinde yapılması yöntemin arazide uygulanabilmesi açısından önem arz etmektedir.

Araştırmada uygulanan elektrokinetik işleminin süresi artırılarak Yağ ve Gres giderimi açısından daha fazla verim elde edilebilir.

Kullanılan grafit elektrodun yüzey alanı ve miktarı gibi parametreler değiştirilerek bu parametrelerin elektrokinetik verimini ne yönde etkileyeceği araştırılabilir.

Elektrot kütleindeki artış hesaplanarak elektrot yüzeyine çökelen grafitin ne kadarının harcandığı bulunabilir.

Proses üzerinden toprak örnekleme için daha hassas yapılabilmesi için farklı sistemler tasarlanabilir.

Proses içerisinde kullanılan filtre kağıdı yerine iyonların hareketini hızlandıracak yeni teknolojiler (proton değişim membranı) kullanılabilir.

## KAYNAKLAR

- ABDULLAH, W.S., AL-ABADÍ, A.M., 2010. Cationic-electrokinetic improvement of an expansive soil, *Applied Clay Science*, 47, 343-350.
- ACAR, Y.B., ALSHAWABKEH, A.N., 1993. Principles of Electrokinetic Remediation. *Environmental Sciences and Technology* 27(13), 2638-2647.
- ACAR, Y.B., GALE, R.J., ALSHAWABKEH, A.N., MARKS, R.E., 1995. "Electrokinetic remediation: Basics and technology status." *Journal of Hazardous Materials*. 40(2), pp. 117-137.
- ALSHAWABKEH, A.N., 2001. Basics and application of electrokinetic remediation. Handouts prepared for a short course, in *Handouts Prepared for a Short Course*, Federal University of Rio de Janeiro: Rio de Janeiro, pp. 95.
- ALTIN, A., 2004. "Yeraltısuyu ve Toprak Kirliliği Arıtımında Kullanılan Yöntemler", I. Ulusal Çevre Kongresi Bildiri Kitabı, 173-182, Sivas.
- B. YARON, R. CALVET, R. PROST 1996. *Soil pollution, Processes and Dynamics* 313 pp.
- BASS, D.H., HASTINGS, N.A., BROWN, R.A., 2000, Performance of Air Sparging Systems: case studies, *Journal of Hazardous Materials*, Vol:72, pp. 101-119.
- BİLGİN, M., ve AKINCI, G. 2010. Petrol Hidrokarbonları ile Kirlenmiş Doğal Toprağın Elektrokinetik Yöntemle Arıtımı. *DEÜ Mühendislik Fakültesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 12(2), 1-16.
- BOUYOUCOS, G.J., 1951. Hydrometer Method Improved For Marking Particle Size Analysis of Soils. *Agronomy J.* 54, pp: 464-465.
- BLOWES, D.W., PTACEK, C.J., BENNER, S.G., MCRAE, C.W.T., BENNETT, T.A., PULS, R.W., 2000. Treatment of Organic Contaminants Using Permeable Reactive Barriers, *Journal of Contaminant Hydrology*, Vol:45, pp. 143-137.
- CHANG, J.H., LİAO, Y.C., 2006. The effect of critical operational parameters on the circulation-enhanced electrokinetics. *Journal of Hazardous Materials B* 129, 186-193.
- CZURDA, K.A., HAUS, R., 2002. Reactive Barriers, with Fly Ash Zeolites for In Situ, Groundwater Remediation, *Applied Science*, Vol:21, pp-13-20.
- EPA, 1990. State of Technology Review, Soil Vapor Extraction System Technology, EPA/600/2-90/024.
- EPA, 1992. *Vitrification Technologies for Treatment of Hazardous and Radioactive Waste*, Handbook, EPA/625/R-92/002.
- EPA, 1994. *Engineering Bulletin: In-Situ Biodegradation Treatment*, EPA/540/S-94/502.
- ESTABRAGH, A.R., NASEH, M., JAVADÍ, A.A., 2014. Improvement of clay soil by electro-osmosis technique, *Applied Clay Science*, 95, 32-36, 2014.
- EVANKO, C.R. and DZOMBAK, D.A., 1997. *Remediation of Metals-Contaminated Soils and Groundwater*. Technology Evaluation Report, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, PA.
- FETTER, C.W., 1993, *Contaminant Hydrogeology*, McMillian Publishing, New York.
- FERRARESE E., ANDREOTTOLA G., 2010. Application of Electrochemical Techniques For The Remediation Of Soils Contaminated With Organic

- Pollutants Proceedings of the Annual International Conference on Soils, Sediments, Water and Energy, Article 26.
- GLENDINNING, S., JONES, C.J.F.P., LAMONT-BLACK, J., The use of electrokinetic geosynthetics (EKG) to improve soft soils, Chapter 35, Ground Improvement - Case Histories, Elsevier Geo-Engineering Book Series, 3, 997-1043, Elsevier, 2005.
- GOMEZ J., ALCANTARA M.T., PAZOS M., SANROMAN M.A, 2009. A two stage process using electrokinetic remediation and electrochemical degradation for treating benzo[a]pyrene spiked kaolin. *Chemosphere*, 74(11), pp. 1516 – 1521.
- GÜNİSTER,E., 2002. Bentonit Dispersiyonlarına Organik ve İnorganik Katkıların Adsorbsiyonunun Reolojik Özelliklere Etkisi Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- GILL, R. T., HARBOTTLE, M. J., SMITH, J. W. N., & THORNTON, S. F., 2014. Electrokinetic-enhanced bioremediation of organic contaminants: A review of processes and environmental applications. *Chemosphere*, 107, 31–42. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere>.
- HASSAN, I., ve MOHAMEDHASSAN, E. (2012). Electrokinetic Remediation with Solar Power for a Homogeneous Soft Clay Contaminated with Copper. *International Journal of Environmental Pollution and Remediation*, 1(1). <https://doi.org/10.11159/ijepr.2012.010>.
- HEIGER, D., 2000. High Performance Capillary Electrophoresis An Introduction, Agilent Technologies, Germany.
- IYER, R., "Electrokinetic Remediation." *Particulate Science and Technology*. 192001, pp. 219-228.
- J. VIRKUTYTEA, M. SILLANPÄÄ, P. LATOSTENMAA, 2002. *Science of the Total Environment* 289 97.
- JENSEN J.B., KURES V., KUBAL M, 1994. Electrokinetic remediation of soils polluted by heavy metals: Removal of zinc and copper using a new concept, *Environmental Technology* 15, 1077-1082.
- KIRTLAND, B.C., AELION, C.M., 2000. Petroleum Mass Removal from Low Permeability Sediment Using Air Sparging/Soil Vapor Extraction: impact of continuous or pulsed operation, *Journal of Contaminant Hydrology*, Vol:41, pp. 367-383
- LANDERS J.P., 1994. *Handbook of Capillary Electrophoresis*, CRC Press, USA.
- LEE, MH., An Experimental and Analytical Study of Electrokinetic Consolidation, MSc Thesis, St. Catherine's College, University of Oxford, 2000.
- LI Z., YU J.W, NERETNĪEKS I, 1996. A new approach to electrokinetic remediation of soils poluted by heavy metals, *Contaminant Hydrology* 22, 241-253.
- LI, Z., YU, J.W., NERETNĪEKS, I., 1997. Removal of Pb(II), Cd(II) and Cr(III) from sand by electromigration. *Journal of Hazardous Materials* 55, 295-304.
- M.V. VÁZQUEZ, F. HERNÁNDEZ, D. BENJUMEA, D. GRANDOSO, M. LEMUS, C.D. ARBELO, 2007. *Science of the Total Environment*, 378 214.
- MUHSINA, M., CHANDRAKARAN, S., & SCHOLOR, M. T. (2015). Electrochemical Remediation of Oil Contaminated Fine Grained Soil, 03(04), 301–309.

- MULLIGAN, C.N., YONG, R.N., GIBBS, B.F., 2001. Remediation Technologies for Metal-contaminated Soils and Ground Water: an evaluation, *Engineering Geology*, Vol:60, pp. 193-207.
- MULLIGAN, C.N., YONG, R.N., GIBBS, B.F., 2001. An Evaluation of Technologies for Heavy Metal Remediation of Dredged Sediments, *Journal of Hazardous Materials*, Vol:85, pp. 145-163.
- MOK, C. K., Design and Modelling of Electroosmotic Dewatering, PhD Thesis, School of Civil Engineering and Geosciences, University of Newcastle upon Tyne, 2006.
- MOSAVAT, N., OH, E., CHAI, G., 2012. A review of electrokinetic treatment technique for improving the engineering characteristics of low permeable problematic soils, *International Journal of Geomate*, 2, 2, 266-272.
- OH, E., MOSAVAT, N., and CHAI, G. 2012. A Review of Electrokinetic Treatment Technique for Improving the Engineering Characteristics of Low Permeable Problematic Soils, <https://doi.org/10.21660/2012.4.3i>, (July 2016).
- PARTICLE SCIENCES, 2012. An Overview of the Zeta Potential, Technical Brief 2012. vol.2.
- PETERS, R. W., 1999. "Chelant Extraction of Heavy Metals From Contaminated Soils", *Journal of Hazardous Materials*, 66: 151-210.
- RAVERA M., CÍCCARELLÍ C., GASTALDÍ D., RÍNAUDO C., CASTELLÍ C., OSELLA D., 2006. An Experiment In The Electrokinetic Removal Of Copper From Soil Contaminated By The Brass Industry, *Chemosphere Volume 63*, Issue 6, Pages 950-955,
- SALANITRO, JP. 2001. Bioremediasyon of petroleum hydrocarbons in soil. *Adv Argon* 72: 53-105.
- SCHLICHTING, E., and BLUME, E., 1966. *Bodenkundliches Praktikum*. Verlag Paul Parey. Hamburg and Berlin.
- SHEN, Z., CHEN, X., JIA, J., QU, L., WANG, W., 2007. Comparison of electrokinetic soil remediation methods using one fixed anode and approaching anodes. *Environmental Pollution* 150, 193-199.
- SIKDAR, S.K, GROSSE, D, ROGUT, I., 1998. Membrane Technologies for Remediating Contaminated Soils: a critical review, *Journal of Membrane Science*, Vol:151, pp. 75-85.
- TANG, J., HE, J., XIN, X., HU, H., LIU T., 2018. Biosurfactants enhanced heavy metals removal from sludge in the electrokinetic treatment, *Chemical Engineering Journal* 334 2579–2592.
- TRAN, L.H., DROGUÍ, P., MERCIER, G., BLAIS, J.F., 2009. Electrochemical degradation of polycyclic aromatic hydrocarbons in creosote solution using ruthenium oxide on titanium expanded mesh anode. *Journal of Hazardous Materials* 164, 1118–1129.
- UYANIK, G., 1985. "Fizikokimya", Karadeniz Teknik Üniv. Yayınları, Trabzon, 150s.
- FERRI, V., FERRO, S., MARTINEZ-HUITLE, C.A., DE BATTISTI, A., 2009. Electrokinetic extraction of surfactants and heavy metals from sewage sludge, *Electrochim, Acta*, 54 2108-2118.
- VIRKUTYTE, J., SILLANPAA, M., LATOSTENMAA, P., 2002. Electrokinetic soil remediation – critical overview, *The Science of The Total Environment*, 289, 97-121, 72.

- WANG J. Y., HUANG X. J., KAO J. C. M., STABNÍKOVA O., 2006. Removal of Heavy Metals From Kaolin Using An Upward Electrokinetic Soil Remedial (UESR) Technology, *Journal of Hazardous Materials*, Volume 136, Issue 3, Pages 532-541.
- WANG J. Y., HUANG X. J., KAO J. C. M., STABNÍKOVA O., 2007. Simultaneous Removal Of Organic Contaminants and Heavy Metals From Kaolin Using An Upward Electrokinetic Soil Remediation Process, *Journal of Hazardous Materials* Volume 144, Issues 1–2, Pages 292-299.
- YEUNG, A.T., 2011 Milestone developments, myths and future directions of electrokinetic remediation, *Separation and Purification Technology*, 79, 124-132.
- ZAGURY, G.J., DARTIGUENAVE, Y., SETIER J-C, 1999. Ex situ electroremediation of heavy metals contaminated sludge: pilot scale study, *J. Environmental Engineering* October, 972-978.
- ZEREN, A. 1999. "Elektrokimya", Birsen Yayınevi , İstanbul., 170 s.
- ZHOU D.M., CANG L., ALSHAWABKEH A. N., WANG Y.J., HAO X. Z., 2006. Pilot-Scale Electrokinetic Treatment Of A Cu Contaminated Red Soil, *Chemosphere* Cilt 63, Sayı 6 , Sayfa 964-971,

## ÖZGEÇMİŞ

### KİŞİSEL BİLGİLER

**Adı Soyadı** : Kerem GÜLPINAR  
**Uyruğu** : T.C.  
**Doğum Yeri ve Tarihi**: GAZİANTEP 24/05/1994  
**Telefon** : 0 (541) 295 39 46  
**Faks** : ----  
**E-mail** : keremgulpinar@hotmail.com

### EĞİTİM

Derece	Adı, İlçe, İl	Bitirme Yılı
Lise	: Gaziantep Lisesi, Şahinbey, GAZİANTEP	2009
Üniversite	: Adıyaman Üniversitesi, Merkez, ADIYAMAN	2013
Yüksek Lisans	: Harran Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı, Haliliye, ŞANLIURFA	2019

### İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	Kurum	Görevi
2014	Gaziantep Büyükşehir Belediyesi Su ve Kanalizasyon İdaresi GASKİ Genel Müdürlüğü / Kimya-Atıksu-Mikrobiyoloji Laboratuvarı	Stajyer
2016	Gaziantep Büyükşehir Belediyesi Metro Tıbbi Atık ve Geri Dönüşüm San. Tic. Ltd. Şti.	Uygulamalı Mühendislik Eğitimi (UME)
2018-2019	Harran Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri	Araştırmacı

### UZMANLIK ALANI

Çevre Mühendisliği alanında; Atıksu ve İçme Suyu Arıtma, Projelendirme, Katı Atık.

### YABANCI DİL

İngilizce-Orta Düzey

## YAYINLAR

- TMMOB ÇMO V. Öğrenci Kurultayı & I. Mersin Çevre Kongresi / Adıyaman İli Hava Kirliliği Karakterizasyonu Kapsamında Hareketli Kaynakların Araştırılması ve Alınabilecek Önlemler (Bildiri)
- Adıyaman Üniversitesi Bilim Kültür ve Sanat Sempozyumu / Adıyaman İli Eğri Çayı ve Çevresinin “Mikrohavza Dispozisyonu” Ön Tanımlaması (Poster-03.04.2015)
- Gaziantep Üniversitesi Ulusal Katı Atık Yönetimi Sempozyumu / Adıyaman İli Günümüz ve Gelecekteki Katı Atık Yönetiminin AB İle Uyum Çerçevesinde Değerlendirilmesi (Sunum)
- Eğri Çayına Deşarj Edilen Adıyaman OSB Karışık Endüstriyel Atıksuyunun Elektrofotasyon İle Arıtılabilirliğinin Araştırılması (BAP – Lisans Projesi)
- Uluslararası GAP Yenilenebilir Enerji ve Enerji Verimliliği (GAPYENEV) Kongresi / Sulamanın Topraktaki Karbondioksit Emisyonuna Etkisi (Sunum-11.05.2018)
- Uluslararası GAP Yenilenebilir Enerji ve Enerji Verimliliği (GAPYENEV) Kongresi / Sıcaklığın Topraktaki Karbondioksit Emisyonuna Etkisi (Sunum-11.05.2018)
- Uluslararası GAP Yenilenebilir Enerji ve Enerji Verimliliği (GAPYENEV) Kongresi / Arazi Tesviyesinin Topraktaki Karbondioksit Emisyonuna Etkisi (Sunum-11.05.2018)