



**MARMARA ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**



**AĞIR METALLERLE KİRLENMİŞ  
TOPRAKTA DOĞAL VE DC ELEKTRİK  
ALANI İLE DESTEKLENMİŞ  
FİTOREMEDİASYON TEKNİKLERİNİN  
KARŞILAŞTIRILMASI**

---

**TUBA NUR KABAKÇI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

Çevre Bilimleri Anabilim Dalı  
Çevre Bilimleri Programı

**DANIŞMAN**

Prof. Dr. S. Sinan KESKİN

İSTANBUL, 2021



**MARMARA UNIVERSITY  
INSTITUTE FOR GRADUATE STUDIES  
IN PURE AND APPLIED SCIENCES**



**COMPARISON OF NATURAL AND DC  
ELECTRIC FIELD AMENDED  
PHYTOREMEDIATION TECHNIQUES IN  
HEAVY METAL POLLUTED SOIL**

---

**TUBA NUR KABAĞÇI**

**MASTER THESIS**

Department of Environmental Science  
Environmental Science Program

**Thesis Supervisor**

Prof. Dr. S. Sinan KESKİN

**ISTANBUL, 2021**

---

# ÖNSÖZ

Bu yüksek lisans tez çalışmasında, sanayi tesislerinin etkisiyle ağır metallerce kirlenmiş Ergene Nehri suyu ile sulanan ve/veya yağışlar sonrasında zaman zaman taşan Ergene Nehri'nin ağır metallerce kirli suyu ile temas eden, tarımsal faaliyetin sürdürüldüğü tarımsal nitelikteki topraklar ele alınmıştır. Kirletici ve tehlikeli olarak anılan ağır metaller ile kirlenmiş olan alanların rehabilitasyonu için, ekonomik anlamda maliyeti az, ancak etkinliği yüksek olan yeni ve farklı yaklaşımlara ihtiyaç vardır. Bu kapsamda, Kırklareli İli, Babaeski İlçesi, Sinanlı Köyünde yer alan ve aktif tarımsal faaliyetin sürdürüldüğü ve zaman zaman Ergene nehri suyunun sulama suyu olarak kullanıldığı bir tarım arazisi seçilmiştir. Bu tarladan yüzey toprağı alınmış, toprağın özelliklerine uygun, kirlenmiş toprağı karşı toleransı yüksek, birim alan ve zaman başına yüksek biyokütle değerlerine ulaşabilecek ve ekonomik katma değer yaratabilecek üç farklı bitki türü olan aspir, soya fasulyesi ve kanola bitkileri seçilmiştir. Laboratuvar ortamında, alınan toprak numunelerine seçilen bitki tohumlarının ekimi yapılmıştır. Bitki türlerinin fitoremediasyon yeteneğı, doğal yolla kirleticileri bünyesine alarak topraktan uzaklaştırması ve toprağı DC elektrik alanı uygulayarak fitoremediasyon verimine etkisinin incelenmesi olmak üzere, iki farklı yaklaşım ile incelenmiştir.

Ağustos, 2021

Tuba Nur KABAKÇI

Orman Mühendisi & Peyzaj Mimarı

## TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tez çalışmamın temellerini oluşturmamda ve çalışmamın hazırlanma sürecinin her aşamasında desteğini ve ilgisini esirgemeyen, bilgi ve tecrübeleri ile bana yol gösteren çok değerli hocam Prof. Dr. S. Sinan KESKİN'e teşekkürü bir borç bilerek, en içten saygı ve şükranlarımı sunarım.

Kırklareli İli Babaeski İlçesinden toprak ve su numunesi almama yardımcı olan, Babaeski İlçe Tarım Müdürü Sayın Vet. Hekim İsmail KÜÇÜK'e, Sayın Ziraat Yük. Müh. Eyüp ÖNDİN'e, Sayın Ekrem BAŞARAN'a çok teşekkür ederim.

Toprak numunelerinin homojenizasyonu için beton karma makinasını kullanmamda yardımcı olan YTÜ İnşaat Mühendisliği Bölümü Teknisyeni Sayın Halil YAVAŞCI'ya teşekkür ederim.

Tohum temininde yardımlarını esirgemeyen ve kısa süre içerisinde tüm tohumları temin etmemi sağlayan, Çukurova Tarım İşletmesi Müdürlüğü'nden Ziraat Mühendisi Sayın Yiğit ÖNENÇ'e, Muş Yıldız Alparslan Tarım İşletmesi Müdürü Yüksek Ziraat Mühendisi Sayın Nufil YEŞİLYURT'a, Tekirdağ Sarıçiçek Tarım Ürünleri San. ve Tic. A.Ş. yöneticisi Sayın İmdat GÜNGÖR'e tüm destekleri için sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Toprak numunelerini ufalamak için çene kırıcı makinasını kullanmama olanak sağlayan Marmara Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü'ne teşekkür ederim. Arş. Gör. Sayın Özgür ÇINAR ve Arş. Gör. Sayın Burcu Nilgün ÇETİNER'e gösterdikleri tüm destek, ilgi ve motive edici yaklaşımlarından dolayı en derin şükranlarımı sunar, teşekkür ederim. Marmara Üniversitesi Mühendislik Fakültesi D-Binası sorumlusu Sayın Mahmut Boyraz'a yardımları için çok teşekkür ederim.

ICP- MS analizlerimin gerçekleştirilmesine yardımcı olan Yük. Müh. Sayın Mithat Sinan BİNİCİ'ye, Sayın Coşkun DUMAN'a ve Sayın Hüseyin Rahmi YILMAZ'a çok teşekkür ederim.

Tez çalışma sürecimde desteğini esirgemeyen kıymetli arkadaşım Özge PARSOVA'ya teşekkürlerimi sunarım.

Her daim arkamda olduğunu hissettiğim, desteklerini hiç esirgemeyen aileme yaptıkları tüm fedakarlıklar için sonsuz teşekkürü bir borç bilirim.

# İÇİNDEKİLER

|                                                                                                              |       |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| ÖNSÖZ.....                                                                                                   | i     |
| TEŞEKKÜR .....                                                                                               | ii    |
| ÖZET .....                                                                                                   | ix    |
| ABSTRACT .....                                                                                               | x     |
| SEMBOLLER .....                                                                                              | xi    |
| KISALTMALAR.....                                                                                             | xii   |
| ŞEKİL LİSTESİ.....                                                                                           | xiv   |
| TABLO LİSTESİ .....                                                                                          | xxii  |
| <br>1. GİRİŞ .....                                                                                           | <br>1 |
| 1.1 Ergene Nehri ve Ağır Metal Kirliliği .....                                                               | 5     |
| 1.2. Toprak Islahı Çalışmalarında Kullanılan Metodlar .....                                                  | 11    |
| 1.3. Topraktaki Ağır Metal Kirleticilerin Uzaklaştırılmasında Kullanılan<br>Fitoremediasyon Tekniği .....    | 14    |
| 1.4. Topraktaki Ağır Metal Kirleticilerin Uzaklaştırılmasında Kullanılan<br>Fitoremediasyon Yöntemleri ..... | 16    |
| 1.4.1. Fitostabilizasyon.....                                                                                | 16    |
| 1.4.2. Fitoekstraksiyon .....                                                                                | 16    |

|                                                                                                                                                                                  |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1.4.3 Rizofiltrasyon .....                                                                                                                                                       | 18 |
| 1.5. DC Elektrik Alanı ve Fitoremediasyona Olan Etkisi.....                                                                                                                      | 18 |
| 1.6. Aspir ( <i>Carthamus tinctoria</i> L.) , Soya Fasulyesi ( <i>Glycine max</i> ), Kanola ( <i>Brassica napus</i> ) Bitkilerinin Özellikleri ve Hiperakümülatör Etkileri ..... | 21 |
| 1.6.1. Aspir ( <i>Carthamus tinctoria</i> ) bitkisi genel özellikleri .....                                                                                                      | 21 |
| 1.6.2. Aspir ( <i>Carthamus tinctoria</i> ) bitkisi tohumu.....                                                                                                                  | 21 |
| 1.6.3. Aspir ( <i>Carthamus tinctoria</i> ) bitkisi sürgün, yaprak ve dalları .....                                                                                              | 22 |
| 1.6.4. Aspir ( <i>Carthamus tinctoria</i> ) bitkisi kök sistemi .....                                                                                                            | 23 |
| 1.6.5. Aspir ( <i>Carthamus tinctoria</i> ) bitkisinin fitoremediasyon yeteneği .....                                                                                            | 24 |
| 1.7. Soya Fasulyesi ( <i>Glycine max</i> ) Bitkisi Genel Özellikleri .....                                                                                                       | 24 |
| 1.7.1. Soya Fasulyesi ( <i>Glycine max</i> ) bitkisi tohumu.....                                                                                                                 | 25 |
| 1.7.2. Soya Fasulyesi ( <i>Glycine max</i> ) bitkisi sürgün, yaprak ve dal özellikleri .....                                                                                     | 26 |
| 1.7.3. Soya Fasulyesi ( <i>Glycine max</i> ) bitkisi kök yapısı .....                                                                                                            | 26 |
| 1.7.4. Soya Fasulyesi ( <i>Glycine max</i> ) fitoremediasyon yeteneği .....                                                                                                      | 27 |
| 1.8. Kanola ( <i>Brassica napus</i> ) Bitkisi Genel Özellikleri .....                                                                                                            | 27 |
| 1.8.1. Kanola ( <i>Brassica napus</i> ) bitkisi tohumu.....                                                                                                                      | 27 |
| 1.8.2. Kanola ( <i>Brassica napus</i> ) bitkisi sürgün, yaprak ve dal özellikleri .....                                                                                          | 28 |
| 1.8.3. Kanola ( <i>Brassica napus</i> ) bitkisi kök yapısı.....                                                                                                                  | 29 |
| 1.8.4. Kanola ( <i>Brassica napus</i> ) bitkisi fitoremediasyon yeteneği.....                                                                                                    | 29 |

## 2. MATERİYAL ve YÖNTEM ..... 30

### 2.1. Materyal ..... 30

#### 2.1.1. Toprak ve su numuneleri materyali..... 30

#### 2.1.2. Bitki tohumu materyali..... 33

### 2.2. YÖNTEM ..... 34

#### 2.2.1. Tarım arazisinden alınan toprak numunelerinde tohumdan bitki yetiştirilmesi yöntemi..... 34

##### 2.2.1.1. Toprak hazırlama yöntemi..... 34

##### 2.2.1.2. Saksıların hazırlaması yöntemi..... 37

##### 2.2.1.3. Elektrotların saksılara yerleştirilmesi ..... 39

#### 2.2.2. Birinci deney çalışmasının kurgulanması ve uygulanması ..... 40

#### 2.2.3. İkinci deney çalışmasının kurgulanması ve uygulanması ..... 44

##### 2.2.3.1. İkinci deneyin yürütülmesi kapsamında voltaj uygulanması yöntemi .. 46

#### 2.2.4. Üçüncü deney çalışmasının kurgulanması ve uygulanması..... 52

##### 2.2.4.1. Üçüncü deney çalışması kapsamında kanola (*Brassica napus*) bitkisi . 53

##### 2.2.4.2. Üçüncü deney çalışması kapsamında aspir (*Carthamus tinctorius*) bitkisi ..... 55

##### 2.2.4.3. Üçüncü deney çalışması kapsamında soya fasulyesi (*Glycine max*) bitkisi ..... 57

##### 2.2.4.4. Numune hazırlama kapsamında yapılan ön işlemler ve asitte temizleme ..... 60

|                                                                                                        |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.2.4.5. Mikrodalga destekli çözme yöntemi (microwave digestion) için numune hazırlama işlemleri ..... | 62 |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|

### **3. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA ..... 72**

|                                                                                                                                                                                            |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.1. Alınan Ergene Havzası Tarım Toprağı Numunesinin Kimyasal Yapısı ve Fiziksel Karakteristiği.....                                                                                       | 72 |
| 3.2. Ergene Nehri'nden Alınan Su Numunesinin Element Konsantrasyonu .....                                                                                                                  | 76 |
| 3.3. Ölçüm Sonuçlarının Değerlendirilmesi .....                                                                                                                                            | 77 |
| 3.3.1 Translokasyon faktörü.....                                                                                                                                                           | 78 |
| 3.3.1.1 Aspir ( <i>Carthamus tinctorius</i> ) bitkisi translokasyon faktörü.....                                                                                                           | 78 |
| 3.3.1.2 Soya fasulyesi ( <i>Glycine max</i> ) bitkisi translokasyon faktörü .....                                                                                                          | 81 |
| 3.3.1.3 Aspir ( <i>Carthamus tinctorius</i> ) ve soya fasulyesi ( <i>Glycine max</i> ) bitkilerinin Translokasyon Faktörlerinin karşılaştırılması .....                                    | 84 |
| 3.3.1.4 Kanola ( <i>Brassica napus</i> ) bitkisi translokasyon faktörü.....                                                                                                                | 86 |
| 3.3.1.5. Aspir ( <i>Carthamus tinctorius</i> ), soya fasulyesi ( <i>Glycine max</i> ) ve kanola ( <i>Brassica napus</i> ) bitkilerinin translokasyon faktörlerinin karşılaştırılması ..... | 88 |
| 3.3.2 Biyoyoğunlaşma Faktörü (BCF) .....                                                                                                                                                   | 89 |
| 3.3.2.1. Aspir ( <i>Carthamus tinctorius</i> ) bitkisi biyoyoğunlaşma faktörü.....                                                                                                         | 90 |
| 3.3.2.2. Soya fasulyesi ( <i>Glycine max</i> ) bitkisi biyoyoğunlaşma faktörü .....                                                                                                        | 93 |
| 3.3.2.3 Aspir ( <i>Carthamus tinctorius</i> ) ve soya fasulyesi ( <i>Glycine max</i> ) bitkilerinin biyoyoğunlaşma faktörlerinin karşılaştırılması .....                                   | 96 |
| 3.3.2.4. Kanola ( <i>Brassica napus</i> ) bitkisi biyoyoğunlaşma faktörü .....                                                                                                             | 98 |

|                                                                                                                                                                                                                             |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 3.3.2.5. Aspir ( <i>Carthamus tinctorius</i> ), soya fasulyesi ( <i>Glycine max</i> ) ve kanola ( <i>Brassica napus</i> ) bitkilerinin biyoyoğunlaşma faktörlerinin karşılaştırılması .                                     | 100 |
| 3.3.3 Zenginleşme Katsayısı ( $EC_f$ ).....                                                                                                                                                                                 | 102 |
| 3.3.3.1. Aspir ( <i>Carthamus tinctorius</i> ) bitkisi zenginleşme katsayısı.....                                                                                                                                           | 103 |
| 3.3.3.2. Soya fasulyesi ( <i>Glycine max</i> ) bitkisi zenginleşme katsayısı .....                                                                                                                                          | 105 |
| 3.3.3.3 Aspir ( <i>Carthamus tinctorius</i> ) ve soya fasulyesi ( <i>Glycine max</i> ) bitkilerinin zenginleşme katsayılarının karşılaştırılması.....                                                                       | 108 |
| 3.3.3.4 Kanola bitkisi zenginleştirme katsayısı değerleri.....                                                                                                                                                              | 110 |
| 3.3.3.5. Aspir ( <i>Carthamus tinctorius</i> ), soya fasulyesi ( <i>Glycine max</i> ) ve kanola ( <i>Brassica napus</i> ) bitkilerinin zenginleşme katsayılarının karşılaştırılması.....                                    | 112 |
| 3.3.4. Bitki / Toprak Oranı Yüzdesi.....                                                                                                                                                                                    | 113 |
| 3.3.4.1. Aspir ( <i>Carthamus tinctorius</i> ) bitkisi için bitki/toprak oranı yüzdesi ..                                                                                                                                   | 114 |
| 3.3.4.2. Soya fasulyesi ( <i>Glycine max</i> ) bitkisi için bitki/toprak oranı yüzdesi ..                                                                                                                                   | 116 |
| Tablo 3.32: Soya fasulyesi ( <i>Glycine max</i> ) bitkisi için bitki/toprak oranı yüzdesi .....                                                                                                                             | 117 |
| 3.3.4.3. Aspir ( <i>Carthamus tinctorius</i> ) ve soya fasulyesi ( <i>Glycine max</i> ) bitkilerinin bitki/toprak oranı yüzdesi karşılaştırması .....                                                                       | 119 |
| 3.3.4.4. Kanola ( <i>Carthamus tinctorius</i> ) bitki/toprak oranı yüzdesi.....                                                                                                                                             | 121 |
| 3.3.4.5. Voltaj uygulaması yapılmayan aspir ( <i>Carthamus tinctorius</i> ), soya fasulyesi ( <i>Glycine max</i> ) ve kanola ( <i>Brassica napus</i> ) bitkilerinin bitki/toprak oranı yüzdelerinin karşılaştırılması ..... | 122 |

|                          |            |
|--------------------------|------------|
| <b>4. SONUÇLAR.....</b>  | <b>123</b> |
| <b>5. KAYNAKLAR.....</b> | <b>128</b> |
| <b>6. EKLER .....</b>    | <b>136</b> |



## ÖZET

### AĞIR METALLERLE KİRLENMİŞ TOPRAKTA DOĞAL VE DC ELEKTRİK ALANI İLE DESTEKLENMİŞ FİTOREMEDİASYON TEKNİKLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI

Kirlenmiş olan toprakların kirliliklerinin kimyasal ve fiziksel uygulamalar ile giderilmesi ve rehabilitasyonunun sağlanması için, hem ekolojik tabanlı olan hem de maliyet açısından ekonomik olan çeşitli yöntemler geliştirilmiştir. Bu çalışma kapsamında, Ergene Havzası içinde ve Ergene Nehri kıyısında bulunan Sinanlı Köyü sınırları içinde tarımsal faaliyetin sürdürüldüğü ve kirlilik seviyesi yüksek nehir suyunun zaman zaman sulama suyu olarak kullanıldığı bir mısır tarlası çalışma alanı olarak seçilmiştir. Çalışma kapsamında bu araziden 200 kg ve Ergene Nehri'nden su numunesi alınmıştır. Fitoremediasyon performanslarını incelemek üzere, toprağın yapısına uygun, kirlenmiş toprağa karşı toleransı yüksek, birim alan ve zaman başına yüksek biyokütle değerlerine ulaşabilecek ve gıda dışı kullanımda ekonomik değer üretebilecek bitki türleri seçimi yapılmıştır. Bu seçimin yapılmasında, Trakya yöresi yetiştirme şartlarına uygun, biyoyakıt üretiminde kullanılabilecek yağlı tohumlu türler olmasına dikkat edilmiştir. Asteraceae familyasından *Carthamus tinctorius* (aspir), Fabaceae familyasından *Glycine max* (soya fasulyesi) ve Brassicaceae familyasından ise *Brassica napus* (kanola) bitkileri seçilmiştir. Alınan tarım toprağı numunelerine tohum ekimleri yapılmıştır. Bu bitki türlerinin her birinin fitoremediasyon yeteneği, hem doğal yolla kirleticileri bünyesine alarak topraktan uzaklaştırma performansları, hem de bu süreci kuvvetlendirmek adına toprağa DC elektrik voltajı uygulaması yapılarak değerlendirilmiştir. Bu çalışmada, voltaj uygulaması yapılmayan aspir, soya fasulyesi ve kanola bitkileri ile sabit kutuplu (polariteli) ve değişken kutuplu (polariteli) DC voltaj uygulanan aspir ve soya fasulyesi bitkileri yer almışlardır. Bitki tohumları ekilerek, uygun şartlarda çimlenmeleri ve yetiştirilmeleri sağlanmıştır. Hasat sonrası, bitkilerin yaprak, gövde ve kök kısımları ile yetiştirildikleri toprak ayrı ayrı incelenmiş ve içerdikleri elementlerden 24 adedi ICP-MS analizi ile belirlenmiştir. Elde edilen ölçüm sonuçları, bitkilerin fitoremediasyon performanslarının değerlendirilmesinde kullanılan Translokasyon Faktörü (TF), Biyoyoğunlaşma Faktörü (BCF), Zenginleşme Katsayısı ( $EC_f$ ) ve Bitki/Toprak Oranı Yüzdesi olmak üzere, dört farklı performans kriterine göre değerlendirilmiştir. İncelenen bitkilerin, Ag, B, Cd, Mo, Na, Sb, Si, Sn, Zn ve Na elementleri için fitoremediasyon potansiyeline sahip oldukları gözlenmiştir.

## ABSTRACT

### COMPARISON OF NATURAL AND DC ELECTRIC FIELD AMENDED PHYTOREMEDIATION TECHNIQUES IN HEAVY METAL POLLUTED SOIL

Various methods, both ecologically based and cost-effective, have been developed in order to remove the pollution of contaminated soils with chemical and physical applications and to ensure their rehabilitation. Within the scope of this study, a corn field where agricultural activities are carried out and river water with high pollution level is used as irrigation water from time to time was chosen. The selected field was located within the borders of Sinanlı Village located on the banks of the Ergene River and in the Ergene Basin. Within the scope of the study, 200 kg of soil from the field and water samples from Ergene River were taken. In order to examine the phytoremediation performances, plant species that are suitable for the soil structure, have high tolerance to polluted soil, can reach high biomass values per unit area and time and produce economic value in non-food use were selected. In making this selection, attention was paid to the selection of oilseed species suitable for the growing conditions of the Thrace region and which can be used in biofuel production. *Carthamus tinctorius* (safflower) from the Asteraceae family, *Glycine max* (soybean) from the Fabaceae family and *Brassica napus* (canola) from the Brassicaceae family were selected. Seeds were planted on the agricultural soil samples taken. The phytoremediation ability of each of these plant species was evaluated both by their natural removal of pollutants from the soil and by applying DC electrical voltage to the soil in order to strengthen this process. In this study, safflower, soybean and canola plants without voltage application and safflower and soybean plants with fixed polarity and variable polarity DC voltage were included. Plant seeds were planted and they were germinated and grown under suitable conditions. After the harvest, the leaves, stem and root parts of the plants and the soil in which they were grown were examined separately and 24 of the elements they contained were determined by ICP-MS analysis. The obtained measurement results were evaluated according to four different performance criteria, namely Translocation Factor (TF), Bioconcentration Factor (BCF), Enrichment Coefficient (ECf) and Percent Plant/Soil Ratio, which are used to evaluate the phytoremediation performance of plants. It was observed that the examined plants have phytoremediation potential for Ag, B, Cd, Mo, Na, Sb, Si, Sn, Zn and Na elements.

## SEMBOLLER

**Ag:** Gümüş

**Al:** Alüminyum

**As:** Arsenik

**B:** Bor

**Ba:** Baryum

**Be:** Berilyum

**Cd:** Kadmiyum

**Co:** Kobalt

**Cr:** Krom

**Cu:** Bakır

**Fe:** Demir

**Li:** Lityum

**Mn:** Mangan

**Mo:** Molibden

**Na:** Sodyum

**Ni:** Nikel

**Pb:** Kurşun

**Sb:** Antimon

**Se:** Selenyum

**Si:** Silisyum

**Sn:** Kalay

**Ti:** Titanyum

**V:** Vanadyum

**Zn:** Çinko

**cm :** Santimetre

**g:** Gram

**µg:** Mikrogram

**ml:** Mililitre

**V:** Volt

**W :** Watt

## KISALTMALAR

- T 0:** Ham tarla toprağı
- T 1:** Voltaj uygulanmayan aspir bitkisi toprağı
- T 2:** Voltaj uygulanmayan soya fasulyesi bitkisi toprağı
- T 3:** Sabit kutuplu aspir bitkisi toprağı
- T 4:** Sabit kutuplu soya fasulyesi bitkisi toprağı
- T 5:** Değışken kutuplu aspir bitkisi toprağı
- T 6:** Değışken kutuplu soya fasulyesi bitkisi toprağı
- T 7:** Şahit numune toprağı
- T 7 - B:** Şahit numune toprağının belirsizlik oranı
- T 8:** Kanola bitkisi toprağı
- 1 A:** Voltaj uygulanmayan aspir bitkisi yaprağı
- 1 B:** Voltaj uygulanmayan aspir bitkisi gövdesi
- 1 C:** Voltaj uygulanmayan aspir bitkisi kökü
- 2 A:** Voltaj uygulanmayan soya fasulyesi bitkisi yaprağı
- 2 B:** Voltaj uygulanmayan soya fasulyesi bitkisi gövdesi
- 2 C:** Voltaj uygulanmayan soya fasulyesi bitkisi kökü
- 2 D:** Voltaj uygulanmayan soya fasulyesi bitkisi tohumu
- 2 E:** Voltaj uygulanmayan soya fasulyesi bitkisi tohum kabuğı
- 3 A:** Sabit kutup voltaj uygulanan aspir bitkisi yaprağı
- 3 B:** Sabit kutup voltaj uygulanan aspir bitkisi gövdesi
- 3 C:** Sabit kutup voltaj uygulanan aspir bitkisi kökü
- 4 A:** Sabit kutup voltaj uygulanan soya fasulyesi bitkisi yaprağı
- 4 B:** Sabit kutup voltaj uygulanan soya fasulyesi bitkisi gövdesi
- 4 C:** Sabit kutup voltaj uygulanan soya fasulyesi bitkisi kökü
- 5 A:** Değışken kutup voltaj uygulanan aspir bitkisi yaprağı
- 5 B:** Değışken kutup voltaj uygulanan aspir bitkisi gövdesi
- 5 C:** Değışken kutup voltaj uygulanan aspir bitkisi kökü
- 6 A:** Değışken kutup voltaj uygulanan soya fasulyesi bitkisi yaprağı
- 6 B:** Değışken kutup voltaj uygulanan soya fasulyesi bitkisi gövdesi

**6 C:** Değişken kutup voltaj uygulanan soya fasulyesi bitkisi kökü

**7 A:** Voltaj uygulanmayan kanola bitkisi yaprağı

**7 B:** Voltaj uygulanmayan kanola bitkisi gövdesi

**7 C:** Voltaj uygulanmayan kanola bitkisi kökü

**bktb:** bitki kısımlarının toplam belirsizliği

**bktk:** bitki kısımlarının toplam konstanstrasyonu

**DI:** Deiyonize su

**gkbo:** gövdedeki kirleticinin belirsizlik oranı

**ICP-MS:** Endüktif Eşleşmiş Plazma Kütle Spektrometresi

**kkk:** kökteki kirleticinin konsantrasyonu

**kkbo:** kökteki kirleticinin belirsizlik oranı

**NHR-1:** Ergene Nehri suyu numumesi (yalnızca filtreden geçirilmiş)

**NHR-2:** Ergene Nehri suyu numumesi (yalnızca filtreden geçirilmiş)

**NR-1:** Ergene Nehri suyu numumesi

**NR-2:** Ergene Nehri suyu numumesi

**pH:** Hidrojen iyonları konsantrasyonunun negatif logaritması

**POPs :** Kalıcı organik kirletici maddeler

**tb:** toprağın element konsantrasyonundaki belirsizlik miktarı

**ttek:** topraktaki toplam element konsantrasyonu

**ykbo:** yapraktaki kirleticinin belirsizlik oranı

**ykk:** yapraktaki kirleticinin konsantrasyonu

## ŞEKİL LİSTESİ

|                                                                                                   |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 1.1. Topraktaki ağır metal kirliliğinin kaynakları .....                                    | 2  |
| Şekil 1.2. Ergene Havzası' nın konumu .....                                                       | 5  |
| Şekil 1.3. Ergene Nehri'nin su kalite sınıfının değişimi .....                                    | 7  |
| Şekil 1.4. Ergene Havzası arazi kullanımının dağılımı.....                                        | 7  |
| Şekil 1.5. Ergene Havzası genel arazi kullanımı.....                                              | 8  |
| Şekil 1.6. Havzadaki Sanayi Kuruluşlarının Dağılımları .....                                      | 9  |
| Şekil 1.7. Ergene Havzası'nda yer alan sanayi kuruluşlarının sayısal değişimi .....               | 9  |
| Şekil 1.8. Farklı toprak temizleme yöntemlerinin karşılaştırılması .....                          | 12 |
| Şekil 1.9. Toprağın kirleticilerden uzaklaştırılması yöntemleri .....                             | 13 |
| Şekil 1.10. Fitoekstraksiyon süreci.....                                                          | 17 |
| Şekil 1.11. DC elektrik alanı ile oluşturulan toprak iyileştirme metodu .....                     | 18 |
| Şekil 1.12. Aspir ( <i>Carthamus tinctoria</i> ) bitkisi yetiştirme alanı .....                   | 21 |
| Şekil 1.13. Aspir ( <i>Carthamus tinctoria</i> ) bitkisi tohumu .....                             | 22 |
| Şekil 1.14 Aspir ( <i>Carthamus tinctoria</i> ) bitkisi tohumu boyutu.....                        | 22 |
| Şekil 1.15. Aspir bitkisi yaprakları üstten görünümü .....                                        | 23 |
| Şekil 1.16. Aspir bitkisi yaprakları görünümü.....                                                | 23 |
| Şekil 1.17. Aspir bitkisi yaprak, gövde ve kök yapısı genel görünümü .....                        | 24 |
| Şekil 1.18. Soya fasulyesi ( <i>Glycine max</i> ) tohumu .....                                    | 25 |
| Şekil 1.19. Soya fasulyesi ( <i>Glycine max</i> ) tohum çapı ölçüsü.....                          | 26 |
| Şekil 1.20. Soya Fasulyesi ( <i>Glycine max</i> ) yaprak ve meyvesi genel görünümü .....          | 26 |
| Şekil 1.21. Soya Fasulyesi ( <i>Glycine max</i> ) yaprak, gövde ve kök yapısı genel görünümü..... | 27 |
| Şekil 1.22. Kanola ( <i>Brassica napus</i> ) bitkisi tohumu.....                                  | 28 |

|                                                                                                                                                                               |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Şekil 1.23.</b> Kanola ( <i>Brassica napus</i> ) bitkisi tohumu boyutu.....                                                                                                | 28 |
| <b>Şekil 1.24.</b> <i>Brassica napus</i> bitkisinin tohum ekiminden 7 (yedi) gün sonraki gelişimi ..                                                                          | 29 |
| <b>Şekil 1.25.</b> <i>Brassica napus</i> bitkisinin gelişim aşamaları .....                                                                                                   | 29 |
| <b>Şekil 1.26.</b> <i>Brassica napus</i> bitkisinin kök, yaprak ve gövdesinin genel görünümü .....                                                                            | 29 |
| <b>Şekil 2.1.</b> Toprak numunesi alınan tarım arazisinin Google Earth konumu.....                                                                                            | 31 |
| <b>Şekil 2.2.</b> Toprak ve su numunesi alınan alanın çevresel görünümleri.....                                                                                               | 31 |
| <b>Şekil 2.3</b> Toprak numunesi alınan tarım arazisinin genel görünümü.....                                                                                                  | 32 |
| <b>Şekil 2.4.</b> Tarım arazisinden toprak numunesi alımı.....                                                                                                                | 32 |
| <b>Şekil 2.5.</b> Ergene Nehri'nden su numunesi alımı.....                                                                                                                    | 33 |
| <b>Şekil 2.6.</b> Hasat sonrası arazide kalarak rastlanılan mısır ( <i>Zea mays</i> L.).....                                                                                  | 33 |
| <b>Şekil 2.7.</b> Aspir ( <i>Carthamus tinctoria</i> ) tohumu (sol), soya fasulyesi ( <i>Glycine max</i> ) tohumu (orta), kanola ( <i>Brassica napus</i> ) tohumu (sağ) ..... | 34 |
| <b>Şekil 2.8.</b> Kuruması için serilen toprak numunesi.....                                                                                                                  | 35 |
| <b>Şekil 2.9.</b> Sert toprak parçalarının daha küçük boyutlara getirilmesi işlemi.....                                                                                       | 35 |
| <b>Şekil 2.10.</b> Toprak numunesinin elekten geçirilmesi işlemi .....                                                                                                        | 36 |
| <b>Şekil 2.11.</b> Toprağın karıştırılmasında kullanılan betoniye makinası.....                                                                                               | 36 |
| <b>Şekil 2.12.</b> Toprağın betoniye ile karıştırılması işlemi.....                                                                                                           | 37 |
| <b>Şekil 2.13.</b> Voltaj uygulamasına tabi tutulmayan aspir (sol) ve soya fasulyesi (sağ) saksıları.....                                                                     | 37 |
| <b>Şekil 2.14.</b> Sabit kutuplu voltaj uygulamasına tabi tutulan aspir (sol) ve soya fasulyesi (sağ) saksıları.....                                                          | 38 |
| <b>Şekil 2.15.</b> Değişken kutuplu voltaj uygulamasına tabi tutulan aspir (sol) ve soya fasulyesi (sağ) saksıları.....                                                       | 38 |
| <b>Şekil 2.16.</b> Şahit numune saksısı.....                                                                                                                                  | 38 |
| <b>Şekil 2.17.</b> Saksı içinde sağ ve sol başlarda yer alan grafit elektrot.....                                                                                             | 39 |
| <b>Şekil 2.18.</b> Saksıların ortasında yer alan grafit elektrotlar.....                                                                                                      | 39 |

|                                                                                                                                                                  |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Şekil 2.19.</b> Aspir ve soya fasulyesi bitkisine ait toprak dolu saksılar.....                                                                               | 40 |
| <b>Şekil 2.20.</b> Sabit kutuplu voltaj uygulaması yapılacak olan aspir bitkisi saksısı.....                                                                     | 40 |
| <b>Şekil 2.21.</b> Değişken kutuplu voltaj uygulaması yapılacak olan aspir bitkisi saksısı.....                                                                  | 41 |
| <b>Şekil 2.22.</b> Yalnızca toprak dolu şahit numune saksısı.....                                                                                                | 41 |
| <b>Şekil 2.23.</b> Aspir ve soya fasulyesi tohumu ekimi.....                                                                                                     | 42 |
| <b>Şekil 2.24.</b> Tohum ekiminden sonraki ilk sulama.....                                                                                                       | 42 |
| <b>Şekil 2.25.</b> Sulama suyu olarak kullanılan deiyonize su ve cihazı.....                                                                                     | 43 |
| <b>Şekil 2.26.</b> Aspir (ön) ve Soya fasulyesi (arka) çimlenme sonrası gelişimleri.....                                                                         | 43 |
| <b>Şekil 2.27.</b> Aspir (ön) ve Soya fasulyesi (arka) yeterli gelişimin sağlanamaması.....                                                                      | 44 |
| <b>Şekil 2.28.</b> Sabit kutuplu voltaj uygulanacak olan aspir bitkisi (sol) değişken kutuplu voltaj uygulanacak olan aspir bitkisi (sağ) gelişim durumları..... | 45 |
| <b>Şekil 2.29.</b> Voltaj uygulanmayacak olan aspir bitkisi (sol), sabit kutuplu voltaj uygulanacak olan soya fasulyesi bitkisi (sağ) gelişim durumları.....     | 45 |
| <b>Şekil 2.30.</b> Laboratuvar ortamına taşınıp ve aydınlatma düzeneği etkisi ile gelişimlerine devam eden bitkiler.....                                         | 45 |
| <b>Şekil 2.31.</b> Voltaj uygulamasında yararlanılan DC güç kaynağı.....                                                                                         | 46 |
| <b>Şekil 2.32.</b> Metal mandallar ile bakır levhaların elektrotlara tutturulması.....                                                                           | 46 |
| <b>Şekil 2.33.</b> Sabit kutuplu voltaj uygulaması yapılan soya fasulyesi bitkisi.....                                                                           | 47 |
| <b>Şekil 2.34.</b> Değişken kutuplu voltaj uygulaması yapılan soya fasulyesi bitkisi.....                                                                        | 47 |
| <b>Şekil 2.35.</b> Bakır levhaya lehim yapılan kabloların kontaktöre bağlanması ve kontaktörün timer ile olan bağlantı sistemi.....                              | 48 |
| <b>Şekil 2. 36.</b> Güç kaynağına kablo bağlantısının yapılması.....                                                                                             | 50 |
| <b>Şekil 2.37.</b> DC elektrik alanı ile desteklenmiş fitoremediasyon yöntemi uygulaması....                                                                     | 50 |
| <b>Şekil 2.38.</b> Voltmetre cihazı.....                                                                                                                         | 50 |
| <b>Şekil 2. 39.</b> Voltaj uygulanmayan (sol) ve sabit kutuplu voltaj uygulanan aspir bitkisi.                                                                   | 51 |

|                                                                                                                                                                                                |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Şekil 2.40.</b> Değişken kutuplu (sol) ve sabit kutuplu voltaj uygulanan soya fasulyesi bitkisi .....                                                                                       | 51 |
| <b>Şekil 2.41.</b> Genel kullanım katı bitki besini (gübre), (sağ fotoğraf; gübrenin fiziksel formu).....                                                                                      | 53 |
| <b>Şekil 2.42.</b> Kanola bitkisinin gelişim süreci (sol; tohum ekiminden bir hafta sonra, orta; tohum ekiminden on beş gün sonra, sağ; tohum ekiminden yirmi gün sonraki gelişim durumu)..... | 53 |
| <b>Şekil 2.43.</b> Kanola bitkisinin tohum ekiminden bir ay sonraki gelişimi.....                                                                                                              | 54 |
| <b>Şekil 2.44.</b> Kanola bitkisinin üç ay sonraki gelişim durumu ve yapraklarındaki sararmalar.....                                                                                           | 54 |
| <b>Şekil 2.45.</b> Kanola bitkisinin oda sıcaklığında kurumaya alınması.....                                                                                                                   | 54 |
| <b>Şekil 2.46.</b> Aspir bitkisinin gelişim durumu (tohum ekiminden iki hafta sonra).....                                                                                                      | 55 |
| <b>Şekil 2.47.</b> Aspir bitkisinin gelişim durumu (tohum ekiminden bir ay sonra).....                                                                                                         | 55 |
| <b>Şekil 2.48.</b> Değişken kutuplu voltaj (sol) ve sabit kutuplu voltaj (sağ) uygulaması yapılan aspir bitkileri.....                                                                         | 56 |
| <b>Şekil 2.49.</b> Gelişimlerini tamamlayan aspir bitkileri.....                                                                                                                               | 56 |
| <b>Şekil 2.50.</b> Gelişimlerini tamamlayarak oda sıcaklığında kurumaya alınan aspir bitkileri.....                                                                                            | 57 |
| <b>Şekil 2.51.</b> Voltaj uygulanması yapılmayan soya fasulyesi bitkisinin gelişimi .....                                                                                                      | 57 |
| <b>Şekil 2.52.</b> Sabit kutuplu voltaj uygulaması yürütülen soya fasulyesi bitkisinin gelişimi .....                                                                                          | 58 |
| <b>Şekil 2.53.</b> Erken gelişim göstererek yaprakları sararan soya fasulyesi bitkisi .....                                                                                                    | 58 |
| <b>Şekil 2.54.</b> Gelişimini tamamlayan fasulyelerin toplanması .....                                                                                                                         | 59 |
| <b>Şekil 2.55.</b> Gelişimlerini tamamlayarak oda sıcaklığında kurumaya alınan soya fasulyesi bitkileri.....                                                                                   | 59 |
| <b>Şekil 2.56.</b> DC elektrik alanı ile fitoremediasyonu destekleme deneyinin uygulanması süreci .....                                                                                        | 60 |

|                                                                                                        |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Şekil 2.57.</b> SIGMA – ALDRICH, %70'lik HNO <sub>3</sub> .....                                     | 61 |
| <b>Şekil 2.58.</b> Asit çözeltisi içerisinde bekletilen malzemeler.....                                | 61 |
| <b>Şekil 2.59.</b> Etüv içerisinde kurumaya bırakılan malzemeler.....                                  | 61 |
| <b>Şekil 2.60.</b> Mettler Toledo AG245 hassas terazi.....                                             | 62 |
| <b>Şekil 2.61.</b> Bitkilerin deiyonize su ile yıkanması işlemi .....                                  | 63 |
| <b>Şekil 2.62.</b> Yıkama sonrası bitkilerin etiketli cam petri kaplarına alınması .....               | 63 |
| <b>Şekil 2.63.</b> Deiyonize su ile yıkanmış bitkilerin etüvde kurutulması.....                        | 64 |
| <b>Şekil 2.64.</b> Yıkanmış ve etüvde kurutulmuş bitkilerin biyokütle kuru ağırlıklarının tartımı..... | 64 |
| <b>Şekil 2.65.</b> Bitki numunelerinin akik havanda öğütülmesi.....                                    | 65 |
| <b>Şekil 2.66.</b> Bitki numunelerinden 500 mg tartım işlemi.....                                      | 66 |
| <b>Şekil 2.67.</b> Numunelere asit ilavesi.....                                                        | 68 |
| <b>Şekil 2.68.</b> Çözme işleminde kullanılan hidroklorik asit ve nitrik asit.....                     | 68 |
| <b>Şekil 2.69.</b> Mikrodalga cihazının haznesi ve yerleştirilmeye başlanan tüpler.....                | 69 |
| <b>Şekil 2.70.</b> Mikrodalga cihazında asit yardımı ile çözünen numune.....                           | 69 |
| <b>Şekil 2.71.</b> Çözünmüş numunenin filtreden geçirilmesi.....                                       | 70 |
| <b>Şekil 2.72.</b> Tüp cidarlarındaki kalıntıların deiyonize su ile çalkalanarak geri kazanımı.....    | 70 |
| <b>Şekil 2.73.</b> Nehir suyu numuneleri.....                                                          | 71 |
| <b>Şekil 2.74.</b> ICP-MS analizi uygulanmasına hazır hale getirilen numuneler.....                    | 72 |
| <b>Şekil 2.75.</b> Perkin Elmer® ICP Mass Spectrometer 300 X.....                                      | 73 |
| <b>Şekil 3.1:</b> Aspir (Carthamus tinctorius) bitkisinin 24 element için translokasyon faktörü.....   | 80 |

|                                                                                                                                                                                                 |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Şekil 3.2:</b> Aspir ( <i>Carthamus tinctorius</i> ) bitkisinin biriktirici olduğu elementler.....                                                                                           | 80  |
| <b>Şekil 3.3:</b> Soya fasulyesi ( <i>Glycine max</i> ) bitkisinin 24 elemente ait traslokasyon faktörleri.....                                                                                 | 82  |
| <b>Şekil 3.4:</b> Soya fasulyesi ( <i>Glycine max</i> ) bitkisinin biriktirici olduğu elementler.....                                                                                           | 83  |
| <b>Şekil 3.5:</b> Sabit kutuplu voltaj uygulanan aspir ( <i>Carthamus tinctorius</i> ) ve soya fasulyesi ( <i>Glycine max</i> ) bitkilerinin translokasyon faktörleri karşılaştırması .....     | 84  |
| <b>Şekil 3.6:</b> Değişken kutuplu aspir ( <i>Carthamus tinctorius</i> ) ve soya fasulyesi ( <i>Glycine max</i> ) bitkilerinin translokasyon faktörleri karşılaştırması.....                    | 86  |
| <b>Şekil 3.7:</b> Kanola ( <i>Brassica napus</i> ) bitkisinin 24 elemente ait traslokasyon faktörleri.....                                                                                      | 87  |
| <b>Şekil 3.8:</b> Kanola ( <i>Brassica napus</i> ) bitkisinin biriktirici olabileceği elementler.....                                                                                           | 88  |
| <b>Şekil 3.9:</b> Aspir ( <i>Carthamus tinctorius</i> ), soya fasulyesi ( <i>Glycine max</i> ) ve kanola ( <i>Brassica napus</i> ) bitkilerinin translokasyon faktörleri karşılaştırması.....   | 89  |
| <b>Şekil 3.10:</b> Aspir ( <i>Carthamus tinctorius</i> ) bitkisinin 24 elemente ait biyoyoğunlaşma faktörü.....                                                                                 | 91  |
| <b>Şekil 3.11:</b> Aspir ( <i>Carthamus tinctorius</i> ) bitkisi için BCF>1 olan elementler.....                                                                                                | 92  |
| <b>Şekil 3.12:</b> Soya fasulyesi ( <i>Glycine max</i> ) bitkisinin 24 elemente ait biyoyoğunlaşma faktörü.....                                                                                 | 94  |
| <b>Şekil 3.13:</b> Soya fasulyesi ( <i>Glycine max</i> ) bitkisi için BCF>1 olduğu elementler.....                                                                                              | 95  |
| <b>Şekil 3.14:</b> Sabit kutuplu aspir ( <i>Carthamus tinctorius</i> ) ve soya fasulyesi ( <i>Glycine max</i> ) bitkilerinin biyoyoğunlaşma faktörleri karşılaştırması .....                    | 96  |
| <b>Şekil 3.15:</b> Değişken kutuplu voltaj uygulanan aspir ( <i>Carthamus tinctorius</i> ) ve soya fasulyesi ( <i>Glycine max</i> ) bitkilerinin biyoyoğunlaşma faktörleri karşılaştırması..... | 98  |
| <b>Şekil 3.16:</b> Kanola ( <i>Brassica napus</i> ) bitkisinin 24 elemente ait biyoyoğunlaşma faktörü.....                                                                                      | 99  |
| <b>Şekil 3.17:</b> Kanola ( <i>Brassica napus</i> ) bitkisinin BCF>1 olduğu elementler.....                                                                                                     | 100 |

|                                                                                                                                                                                                 |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Şekil 3.18:</b> Aspir ( <i>Carthamus tinctorius</i> ), soya fasulyesi ( <i>Glycine max</i> ) ve kanola ( <i>Brassica napus</i> ) bitkilerinin biyoyoğunlaşma faktörleri karşılaştırması..... | 101 |
| <b>Şekil 3.19:</b> Aspir ( <i>Carthamus tinctorius</i> ) bitkisinin 24 elemente ait zenginleşme katsayısı.....                                                                                  | 103 |
| <b>Şekil 3.20:</b> Aspir ( <i>Carthamus tinctorius</i> ) bitkisi için $EC_f > 1$ olan elementler.....                                                                                           | 105 |
| <b>Şekil 3.21:</b> Soya fasulyesi ( <i>Glycine max</i> ) bitkisinin 24 elemente ait zenginleşme katsayısı.....                                                                                  | 106 |
| <b>Şekil 3.22:</b> Soya fasulyesi ( <i>Glycine max</i> ) bitkisi için $EC_f > 1$ olan elementler.....                                                                                           | 107 |
| <b>Şekil 3.23:</b> Sabit kutuplu aspir ( <i>Carthamus tinctorius</i> ) ve soya fasulyesi ( <i>Glycine max</i> ) bitkilerinin zenginleşme katsayısı karşılaştırması .....                        | 108 |
| <b>Şekil 3.24:</b> Değişken kutuplu DC voltaj uygulanan aspir ( <i>Carthamus tinctorius</i> ) ve soya fasulyesi ( <i>Glycine max</i> ) bitkilerinin zenginleşme katsayısı karşılaştırması ..... | 109 |
| <b>Şekil 3.25:</b> Kanola ( <i>Brassica napus</i> ) bitkisinin 24 elemente ait zenginleşme katsayısı değerleri .....                                                                            | 111 |
| <b>Şekil 3.26:</b> Kanola ( <i>Brassica napus</i> ) bitkisi için $EC_f > 1$ olan elementler.....                                                                                                | 112 |
| <b>Şekil 3.27:</b> Aspir ( <i>Carthamus tinctorius</i> ), soya fasulyesi ( <i>Glycine max</i> ) ve kanola ( <i>Brassica napus</i> ) bitkilerinin zenginleşme katsayısı karşılaştırması.....     | 113 |
| <b>Şekil 3.28:</b> Aspir ( <i>Carthamus tinctorius</i> ) bitkisi için bitki/ toprak Oranı yüzdesi.....                                                                                          | 115 |
| <b>Şekil 3.29:</b> Aspir ( <i>Carthamus tinctorius</i> ) bitkisinin etkili olduğu elementler.....                                                                                               | 116 |
| <b>Şekil 3.30:</b> Soya fasulyesi ( <i>Glycine max</i> ) bitkisi için bitki / toprak oranı Yüzdesi.....                                                                                         | 117 |
| <b>Şekil 3.31:</b> Soya fasulyesi ( <i>Glycine max</i> ) bitkisinin etkili olduğu elementler.....                                                                                               | 118 |

|                                                                                                                                                                                                                      |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Şekil 3.32:</b> Sabit kutuplu aspir ( <i>Carthamus tinctorius</i> ) ve soya fasulyesi ( <i>Glycine max</i> ) bitkilerinin etkili olduğu elementlerin karşılaştırılması.....                                       | 119 |
| <b>Şekil 3.33:</b> Değişken kutuplu DC voltaj uygulanan aspir ( <i>Carthamus tinctorius</i> ) ve soya fasulyesi ( <i>Glycine max</i> ) bitkilerinin etkili olduğu elementlerin karşılaştırılması.....                | 120 |
| <b>Şekil 3.34:</b> Kanola ( <i>Carthamus tinctorius</i> ) bitkisinin etkili olduğu elementler.....                                                                                                                   | 121 |
| <b>Şekil 3.35:</b> Voltaj uygulanmamış aspir ( <i>Carthamus tinctorius</i> ), soya fasulyesi ( <i>Glycine max</i> ), kanola ( <i>Brassica napus</i> ) bitkilerinin etkili olduğu elementlerin karşılaştırılması..... | 122 |



## TABLO LİSTESİ

|                                                                                                                                                           |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Tablo 1.1.</b> Ağır metallerin toksisite seviyelere göre sınıflandırılması .....                                                                       | 2  |
| <b>Tablo 1.2:</b> Bitkiler üzerinde kronik zararlı etkileri olan ağır metaller ve meydana<br>..getirdiği etkiler .....                                    | 3  |
| <b>Tablo 1.3.</b> Topraktaki ağır metallerin uzaklaştırılmasında kullanılan fitoekstraksiyon<br>metodunda etkili olan bazı hiperakümülatör bitkiler ..... | 17 |
| <b>Tablo 2.1.</b> Timer çalışma saati düzeni.....                                                                                                         | 49 |
| <b>Tablo 2.2.</b> Kullanılan gübrenin içeriği.....                                                                                                        | 52 |
| <b>Tablo 2.3.</b> Oda sıcaklığında kurutulan bitkilerin net ağırlıkları.....                                                                              | 62 |
| <b>Tablo 2.4.</b> 80 °C’de 48 saat kurutulmuş bitki numunelerinin biyokütle kuru<br>ağırlıkları.....                                                      | 65 |
| <b>Tablo 2.5.</b> Öğütülmüş bitki numunelerinin mikrodalga çözme işlemi için<br>tartımı.....                                                              | 67 |
| <b>Tablo 2.6.</b> Toprak numunelerinin mikrodalga çözme işlemi için tartımı.....                                                                          | 67 |
| <b>Tablo 3.1:</b> Alınan Ergene Havzası tarım toprağı numunesinin kimyasal yapısı ve fiziksel<br>karakteristiği.....                                      | 73 |
| <b>Tablo 3.2:</b> ICP-MS ile Ergene Havzası tarım toprağı numunesinin element içerikleri...                                                               | 75 |
| <b>Tablo 3.3:</b> Ergene Nehri’nden alınan su numunesinin element içerikleri.....                                                                         | 76 |
| <b>Tablo 3.4:</b> Aspir ( <i>Carthamus tinctorius</i> ) bitkisi Translokasyon Faktörü değerleri.....                                                      | 79 |
| <b>Tablo 3.5:</b> Aspir ( <i>Carthamus tinctorius</i> ) bitkisinin biriktirici olduğu elementler.....                                                     | 81 |
| <b>Tablo 3.6:</b> Soya fasulyesi ( <i>Glycine max</i> ) bitkisinin Traslokasyon Faktörü değerleri.....                                                    | 82 |
| <b>Tablo 3.7:</b> Soya fasulyesi ( <i>Glycine max</i> ) bitkisinin biriktirici olduğu elementler.....                                                     | 83 |

|                                                                                                                                                                                                  |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Tablo 3.8:</b> Sabit kutuplu Aspir ( <i>Carthamus tinctorius</i> ) ve Soya fasulyesi ( <i>Glycine max</i> ) bitkilerinin Translokasyon Faktörleri karşılaştırması .....                       | 85  |
| <b>Tablo 3.9:</b> Değişken kutuplu aspir ( <i>Carthamus tinctorius</i> ) ve soya fasulyesi ( <i>Glycine max</i> ) bitkilerinin translokasyon faktörleri karşılaştırması .....                    | 85  |
| <b>Tablo 3.10:</b> Kanola ( <i>Brassica napus</i> ) traslokasyon faktörleri.....                                                                                                                 | 87  |
| <b>Tablo 3.11:</b> Aspir ( <i>Carthamus tinctorius</i> ), soya fasulyesi ( <i>Glycine max</i> ) ve kanola ( <i>Brassica napus</i> ) bitkilerinin Translokasyon Faktörleri karşılaştırması.....   | 88  |
| <b>Tablo 3.12:</b> Aspir ( <i>Carthamus tinctorius</i> ) bitkisinin biyoyoğunlaşma faktörü.....                                                                                                  | 91  |
| <b>Tablo 3.13:</b> Aspir ( <i>Carthamus tinctorius</i> ) bitkisi için BCF>1 olduğu elementler.....                                                                                               | 93  |
| <b>Tablo 3.14:</b> Soya Fasulyesi ( <i>Glycine max</i> ) bitkisinin biyoyoğunlaşma faktörü.....                                                                                                  | 94  |
| <b>Tablo 3.15:</b> Soya Fasulyesi ( <i>Glycine max</i> ) bitkisi için BCF>1 olan elementler.....                                                                                                 | 95  |
| <b>Tablo 3.16:</b> Sabit kutuplu aspir ( <i>Carthamus tinctorius</i> ) ve soya fasulyesi ( <i>Glycine max</i> ) bitkilerinin biyoyoğunlaşma faktörleri karşılaştırması .....                     | 97  |
| <b>Tablo 3.17:</b> Değişken kutuplu voltaj uygulanan aspir ( <i>Carthamus tinctorius</i> ) ve soya fasulyesi ( <i>Glycine max</i> ) bitkilerinin biyoyoğunlaşma faktörleri karşılaştırması ..... | 97  |
| <b>Tablo 3.18:</b> Kanola ( <i>Brassica napus</i> ) bitkisi biyoyoğunlaşma faktörü.....                                                                                                          | 99  |
| <b>Tablo 3.19:</b> Kanola ( <i>Brassica napus</i> ) bitkisinin BCF>1 olduğu elementler.....                                                                                                      | 100 |
| <b>Tablo 3.20:</b> Aspir ( <i>Carthamus tinctorius</i> ), soya fasulyesi ( <i>Glycine max</i> ) ve kanola ( <i>Brassica napus</i> ) bitkilerinin biyoyoğunlaşma faktörleri karşılaştırması.....  | 101 |
| <b>Tablo 3.21:</b> Aspir ( <i>Carthamus tinctorius</i> ) bitkisi zenginleşme katsayısı .....                                                                                                     | 104 |
| <b>Tablo 3.22:</b> Aspir ( <i>Carthamus tinctorius</i> ) bitkisi için $EC_f > 1$ olan elementler.....                                                                                            | 105 |
| <b>Tablo 3.23:</b> Soya fasulyesi ( <i>Glycine max</i> ) bitkisinin zenginleştirme katsayısı değerleri.....                                                                                      | 106 |
| <b>Tablo 3.24:</b> Soya fasulyesi ( <i>Glycine max</i> ) bitkisi için $EC_f > 1$ olan elementler.....                                                                                            | 107 |
| <b>Tablo 3.25:</b> Sabit kutuplu DC voltaj uygulanan aspir ( <i>Carthamus tinctorius</i> ) ve soya fasulyesi ( <i>Glycine max</i> ) bitkilerinin zenginleşme katsayısı karşılaştırması .....     | 109 |

|                                                                                                                                                                                                                      |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Tablo 3.26:</b> Değişken kutuplu DC voltaj uygulanan aspir ( <i>Carthamus tinctorius</i> ) ve soya fasulyesi ( <i>Glycine max</i> ) bitkilerinin zenginleşme katsayısı karşılaştırması.....                       | 110 |
| <b>Tablo 3.27:</b> Kanola ( <i>Brassica napus</i> ) bitkisi zenginleşme katsayısı.....                                                                                                                               | 110 |
| <b>Tablo 3.28:</b> Kanola ( <i>Brassica napus</i> ) bitkisi için $EC_f > 1$ olan elementler.....                                                                                                                     | 111 |
| <b>Tablo 3.29:</b> Aspir ( <i>Carthamus tinctorius</i> ), soya fasulyesi ( <i>Glycine max</i> ) ve kanola ( <i>Brassica napus</i> ) bitkilerinin zenginleşme katsayılarının karşılaştırılması.....                   | 112 |
| <b>Tablo 3.30:</b> Aspir ( <i>Carthamus tinctorius</i> ) bitkisi için bitki / toprak oranı<br>Yüzdesi.....                                                                                                           | 114 |
| <b>Tablo 3.31:</b> Aspir ( <i>Carthamus tinctorius</i> ) bitkisinin etkili olduğu<br>elementler.....                                                                                                                 | 115 |
| <b>Tablo 3.32:</b> Soya fasulyesi ( <i>Glycine max</i> ) bitkisi için Bitki / Toprak Oranı<br>Yüzdesi.....                                                                                                           | 117 |
| <b>Tablo 3.33:</b> Soya fasulyesi ( <i>Glycine max</i> ) bitkisinin etkili olduğu<br>elementler.....                                                                                                                 | 118 |
| <b>Tablo 3.34:</b> Sabit kutuplu DC voltaj uygulanan aspir ( <i>Carthamus tinctorius</i> ) ve soya fasulyesi ( <i>Glycine max</i> ) bitkilerinin etkili olduğu elementlerin karşılaştırılması.....                   | 119 |
| <b>Tablo 3.35:</b> Değişken kutuplu DC voltaj uygulanan aspir ( <i>Carthamus tinctorius</i> ) ve soya fasulyesi ( <i>Glycine max</i> ) bitkilerinin etkili olduğu elementlerin karşılaştırılması.....                | 120 |
| <b>Tablo 3.36:</b> Kanola ( <i>Carthamus tinctorius</i> ) bitkisinin etkili olduğu<br>elementler.....                                                                                                                | 121 |
| <b>Tablo 3.37:</b> Voltaj uygulanmamış aspir ( <i>Carthamus tinctorius</i> ), soya fasulyesi ( <i>Glycine max</i> ), kanola ( <i>Brassica napus</i> ) bitkilerinin etkili olduğu elementlerin karşılaştırılması..... | 122 |

# 1. GİRİŞ

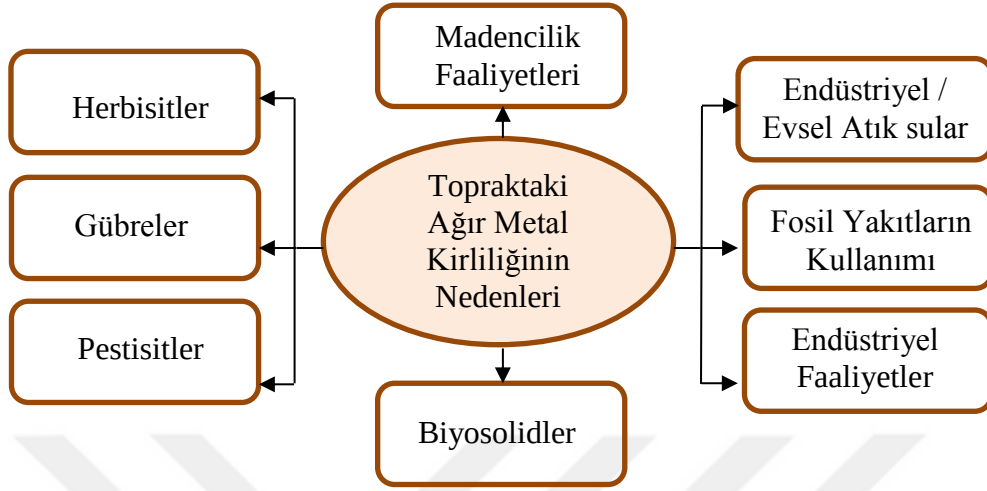
Yirminci yüzyılın ikinci yarısında başlayan ve dünya gündeminde oldukça sık yer bulan çevre kirliliği, nüfus artışı, kentleşme, sanayileşme, enerji ve yakıt tüketimi, bilinçsiz çeşitli tarım uygulamaları gibi faaliyetler, ekolojik çevreyi tahrip ederek büyük ölçüde zarar veren boyutlara ulaşmıştır. Günümüzde bu durum daha çok su kirliliği ve hava kirliliği olarak dikkat çekmiş, ancak üretimin temeli olan tarım topraklarında da zaman zaman ciddi boyutlara ulaşan kirlilik problemleri ortaya çıkmıştır. Su toplama havzaları, temiz ve ucuz su temini açısından ciddi öneme sahiptir. Son yıllarda farklı araştırmacılar tarafından gerçekleştirilen çalışmalar, havzalardaki kirlenmenin su kaynaklarını tehdit eder boyutlara gelmiş olduğunu ortaya koymuş olup, bu olumsuz durumun da artarak devam etmesi beklenmektedir.

Ülkemizde de havza bazında kirlenme problemleri, gerek plansız sanayileşme ve gerek yanlış tarım uygulamaları sonucu son yıllarda gündeme gelmektedir. Geçmişten günümüze insanlığın geleneksel tarımda da oldukça fazla miktarlarda kullandığı kimyasal nitelikteki pestisid ve gübreler, biyolojik olarak ayrışmayan ve rehabilitasyonu mümkün olamayan metal-ağır metal tuzları ihtiva etmektedirler (Karakaş, 2013).

Literatürde ağır metal tanımlamaları ilgi alanına göre farklılık gösterebilmektedir. Bir tanıma göre ağır metaller, özgül ağırlığı  $5 \text{ g/cm}^3$ 'ten fazla ve atom ağırlığı 63.54 - 200.59 arasında olan elementlerdir (Kennish, 1992). Alüminyum bu tanıma uymamasına rağmen, tıbbi toksisite etkisi bakımından ağır metal olarak kabul edilebilmektedir. Alüminyum (Al), Kurşun (Pb), Cıva (Hg), Kadmiyum (Cd), Nikel (Ni), Kobalt (Co), Demir (Fe), Çinko (Zn), Bakır (Cu), Mn (Manganez) gibi ağır metaller doğada iyonik veya kolloidal şekillerde görülmektedirler ve toprakta çözünebilirler. Bu nedenle, organik kirleticilerden çok daha farklılardır ve biyolojik olarak ayrıştırılması gerçekleşemez (Elliott ve ark., 1986; Connell ve ark., 1984).

Toprağın yüksek miktarda ağır metal girişlerine maruz kalarak kirlenmesine sebebiyet veren unsurlar, başta antropojenik ve jeolojik faaliyetlerdir (Keshavarzi ve ark. 2015; Liu ve ark., 2018). Tarımsal faaliyetlerin sürdürüldüğü ve tarımsal faaliyetlerin sürdürülmediği topraklar en fazla, sanayi tesislerinin artışı ile etkisini gösteren endüstriyel atık sular, evsel atık sular, madencilik faaliyetleri sebebiyle oluşan atıklar, yakıt üretim proseslerinde ortaya çıkan atıklar ve kullanılan çeşitli kimyasallar ile zirai faaliyetlerde kullanılan kimyasallar

sebebiyle yoğun miktarlarda ağır metal girişlerine maruz kalmaktadırlar (Marrugo ve ark., 2017; Yan ve ark., 2018) (Şekil 1.1).



**Şekil 1.1.** Topraktaki ağır metal kirliliğinin kaynakları (Ashraf ve ark., 2019)

Ağır metaller, toksisite düzeylerine göre çok yüksek derecede toksik, orta derecede toksik ve az toksik olmak üzere üç kategoride sınıflandırılmaktadır (Mukesh ve ark., 2008) (Tablo 1.1).

**Tablo 1.1.** Ağır metallerin toksisite seviyelere göre sınıflandırılması (Mukesh ve ark., 2008)

| <u><b>Ağır Metaller</b></u>                                                                | <u><b>Toksisite Derecesi</b></u> |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------|
| <b>Zn (Çinko), Cd (Kadmiyum), Hg (Cıva),<br/>As (Arsenik), Se (Selenyum), Kurşun (Pb),</b> | Çok                              |
| <b>Co (Kobalt), Cu (Bakır), Ni (Nikel),<br/>Mo (Molibden), Cr (Krom)</b>                   | Orta                             |
| <b>Ba (Baryum), Mn (Manganez), Sr (Stronsiyum)</b>                                         | Az                               |

Tarımda oldukça sık olarak kullanılmakta olan herbisit, pestisit ve kimyasal gübreler, ihtiva ettikleri metal-ağır metal tuzları sebebiyle, kirletici olan ağır metallerin toprakta birikmesine ve dolayısıyla bitki tarafından bünyesine alınmasına sebebiyet verirler (Bitew ve Alemayehu, 2017). Toprağın maruz kaldığı ve etkileştiği bu ağır metaller toksik etki yaratarak, tarımsal ürünlerde verim kaybına neden olabildiği gibi, bitkilerde biyobirikim

yoluyla tüm canlıların içerisinde bulunduğu besin zincirine de karışmaktadırlar. Diğer zarar verebilme kapasitesi yüksek ve insanlar tarafından bertarafı zor olan ağır metallerin, biyolojik bozulmalara karşı mukavemetleri oldukça yüksektir. Ağır metallerin sahip oldukları lipofil niteliklerinden dolayı, fauna ve flora üzerinde yüksek miktarda zarar oluşturarak, bu zararlı etkilerini çok uzun süreler boyunca devam ettirebilmektedirler (Tablo 1.2). Bu nedenlerden dolayı ağır metaller, tüm canlı ve canlı yaşamını sağlayan sistem üzerindeki en riskli ve kirleticisi özelliği çok yüksek maddeler olarak kabul edilmektedirler (Karakaş, 2013).

**Tablo 1.2:** Bitkiler üzerinde kronik zararlı etkileri olan ağır metaller ve meydana getirdiği etkiler (Tok 1997, Turan ve Horuz, 2012)

| <b>Ağır Metaller</b> | <b>Ağır Metallerin Bitkiler Üzerinde Meydana Getirdiği Etkiler</b>                              |
|----------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Co</b>            | Fe eksikliği ile ilişkili olup, üst yaprak uçlarının ve kenarlarının beyazlaşmasına neden olur. |
| <b>Cd</b>            | Yaprak uçlarında görülen kahverengileşme ve zayıf kök yapısına neden olur.                      |
| <b>Cr</b>            | Bitkilerin yeni sürgünlerinde sararmalara neden olur.                                           |
| <b>Cu</b>            | İnce ve zayıf kök yapısı, yapraklarda koyu lekelenmelere neden olur.                            |
| <b>Fe</b>            | Yaprak renginin koyulaşmasına, kök ve gövdenin ise bodurlaşmasına neden olur.                   |
| <b>Ni</b>            | Yeni olgunlaşan yapraklarda sarı lekelerin oluşmasına neden olur.                               |
| <b>Mn</b>            | Yapraklarda sararma, kuruma, uç kısımlarda ise yanıklara neden olur.                            |

Fazla miktarlarda bulunan ve toksik etkiye sahip elementlerden bazıları bitkilerin yaşam döngüsü için mutlak surette önem arz etmektedirler. Bu elementler; Co (Kobalt), Fe (Demir), Mo (Molibden), Zn (Çinko), Mn (Manganez), Cu (Bakır) ve toprak ile bitki ihtiyaçlarına istinaden Ni (Nikel)'dir. Bunların haricinde, Hg (Cıva), Cd (Kadmiyum), Pb (Kurşun) ve Cr (Krom) olmak üzere, bu ağır metaller sanayi faaliyetleri neticesinde ortaya çıkan atık ürünlerle ve sularla doğal fauna, flora ve genel olarak tüm ekosistemleri

etkileyerek, çevre kirliliğine sebebiyet vermektedirler (Dağdeviren, 2007).

Ağır metaller, organik maddelerin aksine, biyolojik olarak parçalanmadıkları için oldukça yüksek toksik ekti yaratırlar. Doğada 20 yıldan fazla bir ömre sahip olmaları sebebiyle kalıcıdırlar (Jan ve ark., 2015; Ayangbenro ve Babalola, 2017; Fatima ve Ahmed, 2018). Ağır metaller, toksisite (kimyasal bir maddenin zarar verebilme kapasitesi) ve bulunduğu ortamda sürekli olma niteliklerinden dolayı kirlletici maddeler olarak nitelendirilmektedirler (Boamponsen, ve ark., 2010; Carreras ve ark., 2007).

Topraklarda sürekli olarak gerçekleşen bir dizi biyokimyasal tepkimeler sonucunda, ağır metaller doğrudan birbirleriyle etkileşmektedirler. Bunun sonucunda gerçekleşen tepkimeler ise, başlıca olarak; organik maddelerde gerçekleşen mineralizasyon, enzimlerin aktivitesi, solunum aktivitesi ve nitrifikasyon tepkimeleridir. Ağır metallerin, doğrudan bitkiler ve toprağın üzerindeki etkisini ve toksisitesini saptayabilmek amacıyla indikatör niteliği gören bir dizi reaksiyonlar söz konusudur. Bunlar başlıca, mikroorganizmalar tarafından topraktaki CO<sub>2</sub> (karbondioksit) üretimi reaksiyonları, toprakta gerçekleşen enzimlerin faaliyetleri ve nitrifikasyon reaksiyonlarıdır (Dağdeviren, 2007).

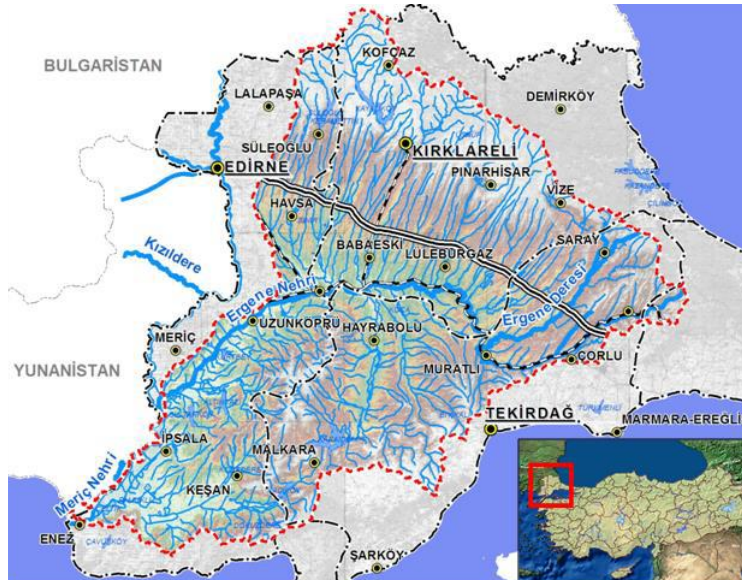
Kirlletici ve tehlikeli olarak anılan ağır metaller ile kirlenmiş olan alanların rehabilitasyonu için, ekonomik maliyeti az olmasına rağmen başarı şansı fazla olan yeni ve farklı yaklaşımlara ihtiyaç vardır. Kirlenen bu tarım alanlarının rehabilitasyonunda kullanılan fitoremediasyon metodu, bitkilerin kirlleticileri topraktan alması olarak tanımlanmaktadır. Ayrıca fitoremediasyon, biyolojik materyalleri kullanarak çeşitli kirlleticilerle bulaşık durumda bulunan toprağı, suyu veya her ikisini de rehabilite edebilmek ve geri kazanım sağlayabilmek için, kirlleticileri etkileşim halinde bulunduğu sudan veya topraktan uzaklaştırarak, etkisini azaltan ve ortamın temizlenebilmesini sağlayan ekolojik tabanlı ekonomik bir metottur. (Gisbert ve ark., 2003). Bu metodun uygulanabilmesi için hiperakümülatör yani, kirlilik içeren topraklarda yaşamını sürdürebilen ve bu zararlı maddeleri etkin biçimde kökleri ile alarak bünyelerinde depolayabilen bitkilerin kullanılabilmesi son derece önemlidir. Son yıllarda bu tür bitkilerin tespiti önem kazanmıştır (Rascio ve ark. 2011).

Bu çalışma kapsamında, Ergene Havzası'nda yer alan ve Ergene Nehri sularıya da zaman zaman sulanan bir tarım alanı seçilmiştir. Ergene Havzası, Edirne, Tekirdağ ve Kırklareli illeri sınırları içerisinde yer almaktadır. Havzadaki en önemli yüzey suyu Ergene Nehri'dir.

Ergene Nehri'nin suyu geçmişten günümüze kadar uzanan kontrolsüz sanayileşme, bilinçsiz tarım uygulamaları ve yetersiz atıksu idaresi nedenleriyle, Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği'ne göre 4. Sınıf (en yüksek seviyede kirli su) su sınıfında bulunmaktadır. Bu nehir, Kırklareli sınırlarındaki Istranca Dağı'ndan başlayarak, Ergene Nehri boyunca 283 km uzanarak akışını sürdürmektedir. Ancak, bu akış ile ihtiva ettiği sanayi ve evsel nitelikteki atıksular sebebiyle debisi artmakta olup, sonunda da başlangıçtaki doğal debisinin çok üzerine çıkmaktadır (Ergene Havzası Koruma Eylem Planı, 2018).

### 1.1 Ergene Nehri ve Ağır Metal Kirliliği

Ergene Havzası, Türkiye'nin Avrupa kıtasında ve ülkenin de kuzey batısı yönünde bulunmaktadır (Hanedar, 2015). Doğu yönünde İstanbul ili ile sınır olup, batı bölgesi yönünde ise Bulgaristan ve Yunanistan ülkelerinin hudut hattı ile biten alanı barındırmaktadır (Şekil 1.2). Coğrafi nitelikleri bakımından ise, denize kapalı olan Ergene Havzasının toplam yüzölçüm alanı 11.325 km<sup>2</sup>'dir. Ergene Havzasının doğudan batıya olan hat uzunluğu 160 km, kuzey-güney doğrultusunda olan hattın uzunluğu ise 140 km olup, toplamda üç adet ili kapsamaktadır. Ergene Havzası, birçok tarımsal arazileri kapsamaktadır. Havzadaki toplam alanın %37.9'luk bir bölümü 2. sınıf tarım arazisi olarak nitelendirilmiştir (Meriç-Ergene Koruma Eylem Planı, 2008).



Şekil 1.2. Ergene Havzası' nın konumu (Ergene Havzası Koruma Eylem Planı, 2018)

Ergene Yöresi tarım topraklarında, killi-kireçli kahverengi orman toprağı tipi hakimdir. Ayrıca, bu topraklarda dönen toprak anlamına gelen vertisoller de görülmektedir.

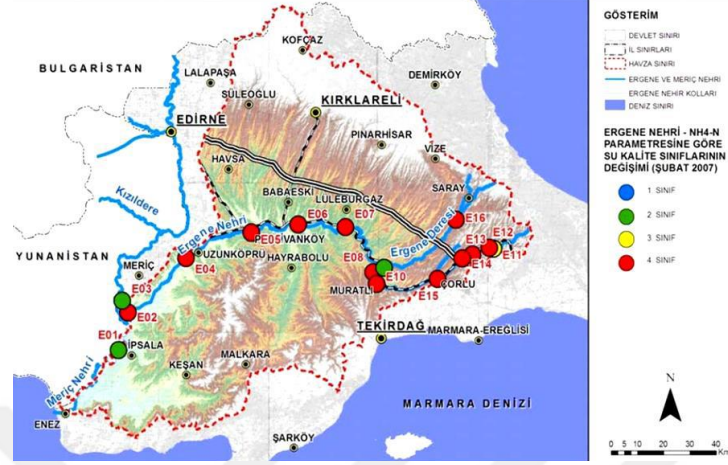
Toprağın killi yapısından dolayı oluşan çatlaklar nedeniyle üst topraktaki materyaller alt katmanlara, alt katmandaki materyaller ise üst katmanlara taşınarak bir sirkülasyon yaratır. Bu yaşanan devirdaim serisine vertisol denmektedir (Kanarya, 2013).

Ergene Nehri, Meriç Nehrinin en önemli uzantısı ve kolu niteliğindedir. Trakya bölgesinde yer alan 1., 2. ve 3. sınıf niteliğindeki ve yaklaşık yüzölçümü 300.000 dekar olan tarım arazileri bakımından büyük önem arz etmektedir. Bu havzaya komşu olan İstanbul şehrinin gelişip yayılarak, ihtiva ettiği sanayi ve endüstriyel kapasitesini çevresindeki diğer bölge ve şehirlere paylaştırmasından dolayı, Trakya bölgesi nüfusu ve buna bağlı olarak da yoğunluğu her yıl sürekli olarak düzenli periyodlarla artış göstermektedir. Trakya ve özellikle de Ergene Bölgesi'nde genel itibari ile her ne kadar tarım sektörü önemini ve canlılığını koruyorsa da, sanayideki gelişme ve ivmeler, kırsal nüfustaki yoğunluğun azalmasına ve kent nüfusunun ise hızla artışa geçmesine yol açmıştır. Günümüzde, havza sınırları içerisinde toplam 12 adet organize sanayi bölgesi ile diğer çeşitli sektörler ya da faaliyet alanlarında bulunan yaklaşık 1300 adet işletme yer almaktadır. Buna bağlı olarak ise, gelişen endüstriyel ve tarımsal işletmeler ile evsel kaynaklı olarak ortaya çıkan atıksuların tamamı doğrudan veya dolaylı olarak Ergene Nehri'ne deşarj edilmektedir. Trakya Bölgesindeki yerleşim merkezleri olan köy, kasaba ve ilçe merkezlerinden geçmekte olan Ergene Nehri, tarımsal sulama maksatlı olarak sıkça kullanılmaktadır. Bu sebeple, nehirde yaşanan su kirliliği, toprak kirliliği ve buna bağlı olarak da toprakta bitki gelişimini büyük ölçüde engelleyen çoraklaşmalara sebep olmaktadır. Sonuçta, tarımsal ürünlerde bozulma ve verimsizlik baş göstermektedir (Hanedar, 2015).

Bir suyun kirlilik derecesi, bünyesinde ihtiva ettiği biyokimyasal oksijen ihtiyacı (BOİ), pH-asitlik düzeyi ile elektriksel iletkenlik düzeyi, suyun sıcaklığı, toplam askıdaki katı maddenin miktarı (TAKM), Azot miktarı, atık su miktarı, Fosfor miktarı, endüstrilerde sıkça kullanılmakta olan gres yağı miktarı ve Klorür miktarı parametrelerine göre saptanmaktadır (Environment Canada, 1997). Ergene Nehri suları bahsi geçen parametreler esas alındığında kirli olup, bu kirliliğin en büyük nedeni ise nehir kıyılarında konumlanan sanayi kuruluşları ve kirlilik oluşturmakta olan diğer çeşitli işletmelerdir (DSİ 11. Bölge Müdürlüğü, 2009).

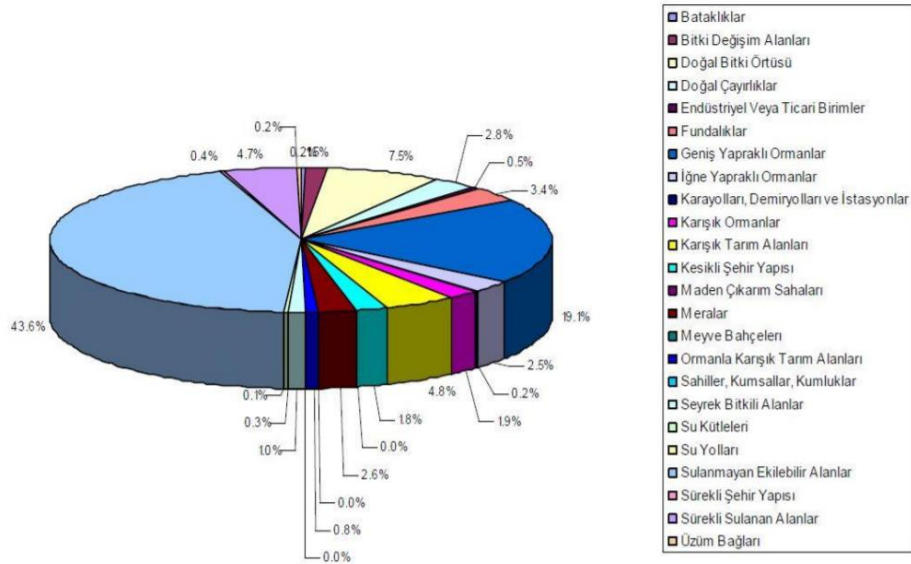
Ergene Nehri suları, doğduğu konumdan, çeşitli sanayi kuruluşlarının bulunduğu Çerkezköy ve Çorlu ilçelerine kadar temiz su olarak akışını sürdürmekteyken, sanayi

kuruluşu ve işletmelere ulaşım, bu alanı geçtiği bölgede aşırı şekilde kirlenmeye maruz kalmakta ve yukarıda bahsi geçen parametrelere göre kirliliği tespit edilmektedir. (Şekil 1.3)

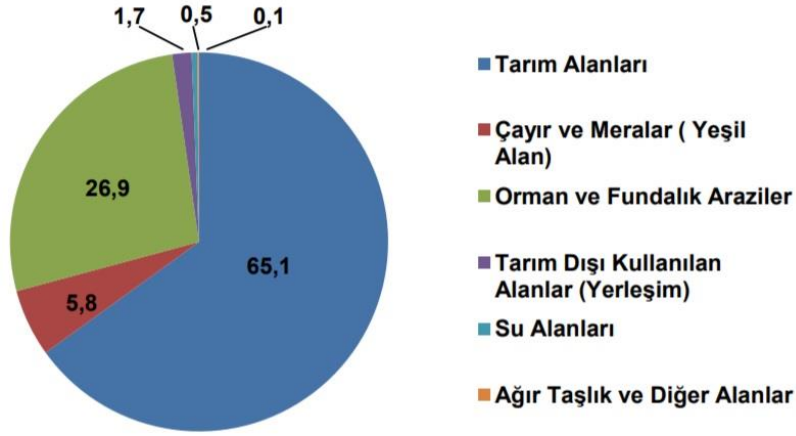


**Şekil 1.3.** Ergene Nehri'nin su kalite sınıfının değişimi (Ergene Havzası Koruma Eylem Planı, 2011)

Havzanın büyük bir kısmını tarım arazileri oluşturmaktadır. Sulu tarım yapılan alanlar, havzanın toplam yüz ölçümünün % 4,7'sini, kuru tarım yapılan ve buna elverişli olan alanlar ise toplam Ergene Havzası'nın %43,6'sını oluşturmaktadır. (Şekil 1.4 ve Şekil 1.5)

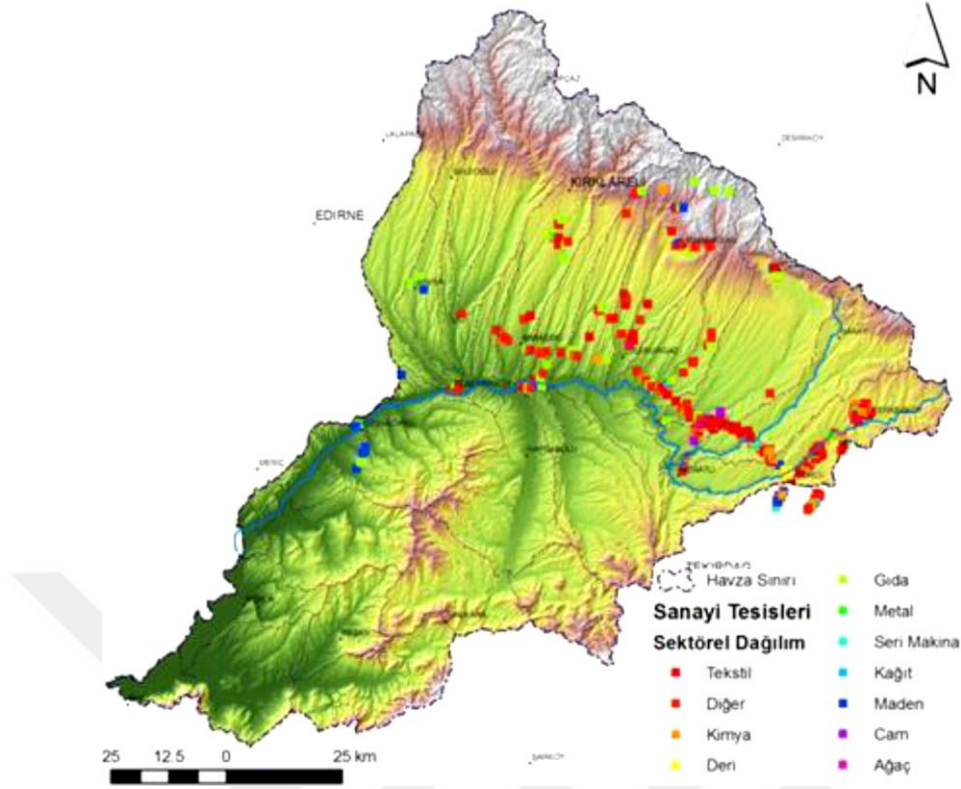


**Şekil 1.4.** Ergene Havzası arazi kullanımının dağılımı (Meriç-Ergene Havzası Koruma Eylem Planı, 2008)

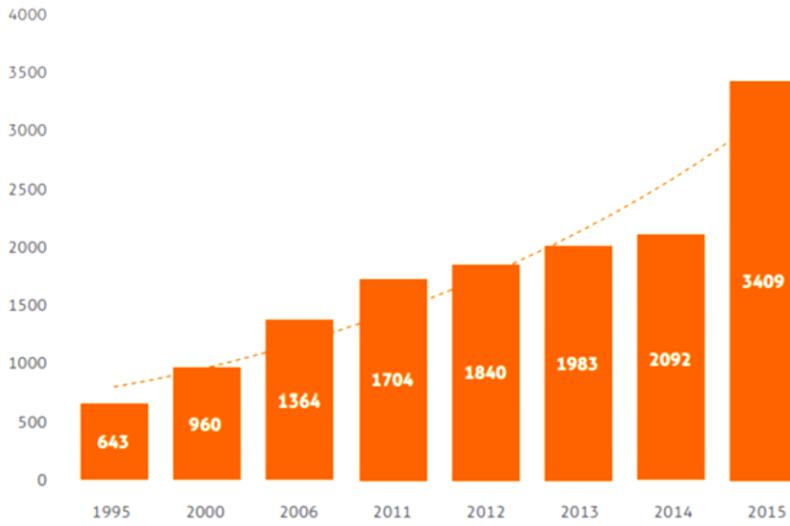


**Şekil 1.5.** Ergene Havzası genel arazi kullanımı (Meriç-Ergene Havzası Koruma Eylem Planı, 2008)

Tarımsal faaliyetlerin sürdürülebilmesi için gerekli olan sulama altyapılarının yer aldığı tarım alanları, genellikle eğimin düşük ve nispeten düze yakın olduğu akarsu yatakları ve civarlarında yer almaktadır. Ergene Havzası'ndaki sulamaya ait yapılar DSİ tarafından inşa edilmiş olup, tarımsal faaliyetler için hizmet etmekte olan gölet ve barajlardan oluşmaktadır. Ayrıca bunun yanında, Ergene Nehri'nden ve nehrin kollarından çiftçilerin kendi imkanları ile çektiği sularla da tarımsal sulama gerçekleştirilmektedir. Ergene Nehri suları ile Meriç Nehri sularının kesiştiği ve konum itibarı ile Keşan İlçesinin batı tarafında kalan nispeten daha düşük eğimli arazilerde, pirinç yetiştiriciliği yoğun olarak gerçekleştirilmektedir (Meriç – Ergene Havzası Koruma Eylem Planı, 2008). Ergene Havzası'ndaki en önemli çevresel nitelikteki sorun, Ergene Nehri su kalitesindeki yaşanan ciddi bozulmalar ve bu bozulmalara bağlı olarak etkisini hızlıca gösteren çevre kirliliğidir. Havzada, 1990'lı yıllardan itibaren başlayan ve günümüze kadar etkisini gün geçtikçe arttıran sanayileşme ve buna bağlı olarak gelişen hızlı nüfus ve yoğunluktaki artışlar, yüksek miktarlarda atıkların üretilmesine ve birikimine neden olmuştur (Şekil 1.6 ve Şekil 1.7). Gerek evsel ve gerekse sanayileşmenin getirdiği endüstriyel atıklar, herhangi bir arıtmaya tabi tutulmadan doğrudan Ergene Nehri'nin birçok farklı kesimlerine boşaltılarak deşarj edilmektedir. Kirlenmenin iyice belirginleşmesiyle beraber, bazı işletmelerin üretim işlemleri sonucu oluşan atık sularını arıtması sonucu değiştirememiştir.



**Şekil 1.6.** Havzadaki Sanayi Kuruluşlarının Dağılımları (Ergene Havzası Koruma Eylem Planı, 2011)



**Şekil 1.7.** Ergene Havzası'nda yer alan sanayi kuruluşlarının sayısal değişimi (Ergene Havzası Koruma Eylem Planı, 2018)

Günümüzde de birçok tesis ve işletmeler artırma yapmadan, kontrolsüz bir biçimde atıklarını Ergene Nehri'ne boşaltarak deşarj etmektedir. Ergene Nehri kıyısındaki yerleşim alanları ve kentler, arıtıma yönelik bir alt yapı sistemi geliştirmeden hızlı bir büyüme ve

ivme göstererek, arıtılmamış evsel ve sını atık sularını doğrudan Ergene Nehri'ne boşaltmaktadırlar. Kontrolsüz biçimde gerçekleşen bu endüstrileşme ve kentleşme, en yoğun biçimde nehrin ana kaynağı olarak nitelendirilen havzanın başlangıç bölümünden kaynaklanmaktadır. Bu sebeple de, atık su deşarjlarının etkisini azaltacak şekilde, kirliliği seyreletecek ve temiz olarak nitelendirilecek bir su girişi olamamaktadır. Üst bölgeden gelerek, alt havzalara ulaşan ve topraktan süzülen sular, tamamiyle kirlilik ihtiva ederek nehre ulaşmaktadır. Bu kirlenmenin miktarının saptanabilmesi için birçok kurum ve kuruluş tarafından çeşitli araştırmalar yapılmış ve çeşitli değişkenler ile organik ve inorganik kirliliğinin miktarı ve derecesi ortaya konmuştur. Havzada düzenli ve sistemli bir şekilde gözlem incelemeleri yalnızca DSİ tarafından güncel olarak yürütülmektedir. Diğer farklı kurum ve kuruluşlar ise, iki ayda bir olacak şekilde aralıklarla ölçümler yapmaktadır. DSİ bünyesinde düzenli ve sistematik olarak yürütülen gözlemler dışında, yapılan tüm diğer araştırmalarda da sudaki ağır metal içeriği incelenmiştir. Ağır metaller, zarar verme kapasiteleri ve çevrede çok büyük oranda kalıcı davranabilme nitelikleri nedeniyle tehlikeli ve kirlletici madde grupları kategorisinde değerlendirilmektedirler (Boamponsen, ve ark., 2010; Carreras ve ark.).

İstanbul'da endüstrileşme ve yoğun kentleşme ile beraber gerçekleşen aşırı nüfus artışı ve İstanbul'un çevresi boyunca genişleyen endüstri ve sanayi kuruluşları, Çorlu ile Çerkezköy ilçeleri boyunca konumlanmışlardır. Başlangıçta arıtma sistemlerine sahip olmayan endüstri kuruluşları, atık sularını arıtmaksızın doğrudan Ergene Havzası'nı beslemekte olan Ergene Nehri'ne ve bu nehri oluşturan kollara boşaltmışlardır. Sonraki yıllarda, yasal mevzuatlar gereğince arıtma tesisleri kurulmuş olsa da, bu tesisler düzenli ve sistematik bir biçimde faaliyet göstermemiştir. Bu olumsuz duruma, kontrolsüz kentleşme ile ortaya çıkan evsel nitelikteki atıklar ile tarımda sıkça kullanılan suni gübre ve tarımsal amaçlı kullanıma yönelik birçok farklı kimyasallar da eklenince, Ergene Nehri'nin daha da fazla kirlenmesine yol açılmıştır (Kocaman ve ark., 2011).

Ergene Nehri, içerdiği kirlilik sebebiyle, geçtiği hat boyunca çevresinde yer alan fauna, flora ve insanların sağlığını olumsuz etkilemektedir (Sürek, 2003). Amerika Birleşik Devletleri Çevre Koruma Ajansı'na (US-EPA) göre, toprak ağır metal kirliliği tüm dünyada yaklaşık olarak 10 milyon insan için sağlık sorunlarına neden olmuştur (U.S. EPA, 2016).

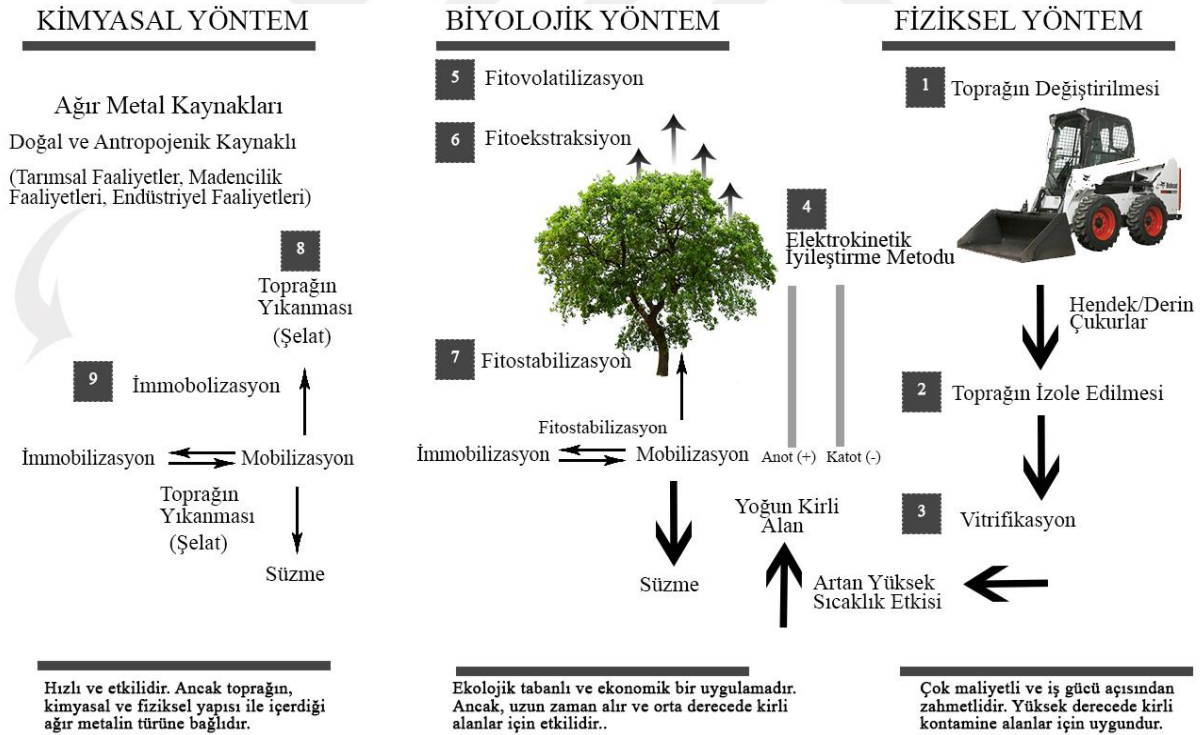
Bu durum, insan sağlığını tehdit etmenin yanı sıra, tarımsal nitelikteki arazilerin bozulmasına ve bu araziler üzerindeki ürünlerde verim kaybına neden olmaktadır (Sürek, 2003).

Kirlenmiş nehir suyuyla civardaki tarlalarda tarımsal amaçlı olarak sulama yapılmaktadır. Dolayısıyla bu kirlilikten, büyük ölçüde tarım amaçlı kullanılan topraklar ve bu topraklarda üretilen ürünler etkilenmektedir. Bu tür topraklarda yapılan tarımda belli başlı problemler saptanmış olup bunlar, ekimi yapılan tohumlardaki çimlenme süresinin normalden çok uzun olması, bitki boyunun normalden kısa olması, yaprak ve gövde boyutundaki anormal oranlar, yaprak çapının küçük olması, gövde çapının çok az olması olarak sayılabilirler (Sürek, 2003 Kocaman ve ark. (2011) yaptıkları araştırmaya göre, sulaması Ergene Nehri'nden gerçekleşmeyen tarım arazilerinin potansiyel verimlerinin, Ergene Nehri'nden sulaması yapılan tarım arazilerine göre çok daha fazla olduğu, Ergene Nehri'nden yapılan sulama miktarındaki artışın hem toprakta hem de mahsullerdeki verimin düşmesine sebebiyet verdiği belirlenmiştir. Ayrıca, toprakların ihtiva ettiği kirlilikten dolayı, civar bölgelerdeki tarım ve hayvancılık faaliyetlerinin gün geçtikte azaldığını, buna bağlı olarak da yerli halkın sosyo-ekonomik anlamda ciddi olarak olumsuz etkilenerek kayıplar verdiğini tespit etmişlerdir.

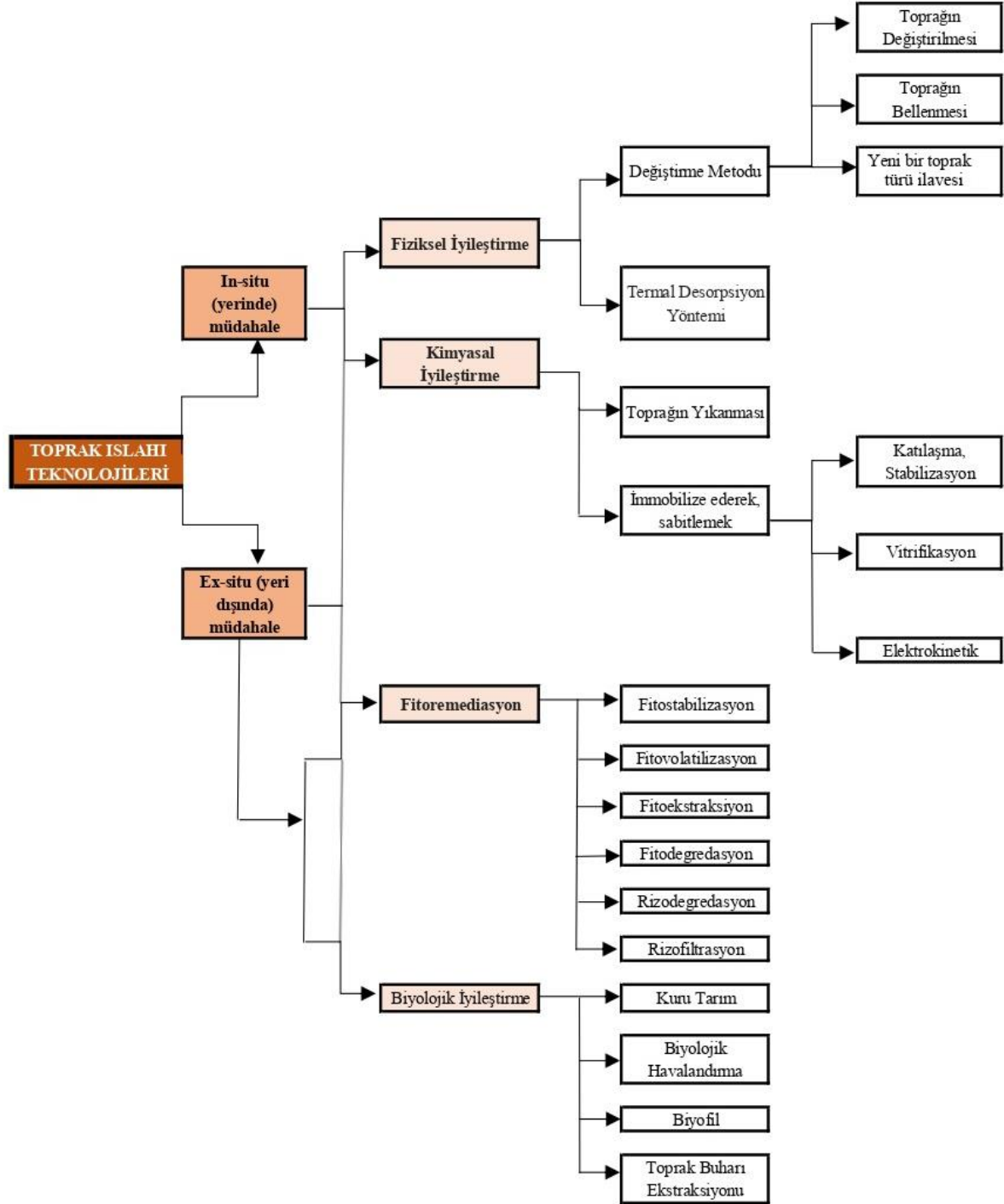
## **1.2. Toprak Islahı Çalışmalarında Kullanılan Metodlar**

Toprağın ihtiva ettiği ve kirletici düzeyde bulunan ağır metallerin ortamdan uzaklaştırılabilmesi için fiziksel, kimyasal, termal ve biyolojik olmak üzere farklı yöntemler vardır (Kocaer ve ark. 2003). Bu yöntemler genel itibarıyla, kirliliğe neden olan başlıca elementin bölge ile etkileşimi tamamen kesmek, immobilize ederek kirli bölgeyi gözlemlemek, kirli toprağı bulunduğu bölgeden taşıyarak rehabilitasyon alanında muhafaza etmek ya da kirli toprağı bulunduğu alan içerisinde (in-situ) veya bulunduğu alanın dışarısında (ex-situ) rehabilite edip iyileştirmek temellidir. Ancak, toprak rehabilitasyonu için en uygun yöntem ve metodların belirlenebilmesinde, bölgenin özellikleri, kirleticinin özellikleri, kirleticinin toplam konsantrasyonu ve kirlenmiş arazinin geçmişı ile gelecekteki kullanım şekli gibi pek çok unsur dikkate alınmalıdır (Kocaer ve ark. 2003).

Ağır metallerce kirlenmiş toprakların iyileştirilebilmesi için in-situ (yerin içerisinde) ve ex-situ (yerin dışında) uygulanan iki farklı yaklaşım uygulanmaktadır. Ağır metaller ile etkileşime girerek, içerisinde kirlilik barındıran toprakların bitkiler tarafından yerinde rehabilitasyonu olan in-situ uygulamalar, hem ekonomik hem de çevre dostudur (Emenike ve ark., 2018; Xia ve ark., 2019). Ağır metallerce kirli toprakların ıslahı için birçok yöntem mevcuttur (Şekil 1.8 ve Şekil 1.9). Fiziksel ve kimyasal (fizikokimyasal) toprak iyileştirme yöntemleri, enerji ihtiyacı, gözlem ve süreklilik gerekliliğinden dolayı, ağır metaller ile kirlenen toprakların küçük bölümlere ayrılması ile etkisini gösterebilir (Dada ve ark., 2015). Ağır metal kirliliğine maruz kalan toprakların rehabilitasyonu için mikroorganizmalar da kullanılabilir (Ayangbenro ve Babalola, 2017). Ancak, toprağın arıtılması hususunda bitkiler daha başarılı olup, kendi bünyelerine ağır metali alarak toprağın daha sağlıklı bir yapı kazabilmesine hizmet ederler (Emenike ve ark., 2018).



**Şekil 1.8.** Farklı toprak temizleme yöntemlerinin karşılaştırılması (Khalid ve ark., 2017' dan uyarlanarak)



**Şekil 1.9.** Toprağın kirleticilerden uzaklaştırılması yöntemleri (Nejad ve ark., 2017’ dan uyarlanarak)

Toprak ıslahı metotlarından birisi olan fiziksel iyileştirme tekniği, toprak değiştirme ve termal desorpsiyon yöntemlerini barındırır. Değiştirme metodu, kirli topraktaki kirliliği seyreltebilmek için kirlilik içermeyen başka bir toprak ile karıştırılması temeline dayanmaktadır (Fenyvesi ve ark., 2019).

Toprağın değiştirilmesi üç ana temele dayanmaktadır;

- i) Ağır metallerce kirli toprak alandan uzaklaştırılarak alana yeni toprak getirilir.
- ii) Ağır metallerce kirli toprak zeminin çok daha derinlerine serilir.
- iii) Ağır metallerce kirli toprak, temiz toprak ile karıştırılarak kirliliğin seyreltilmesi sağlanır (Khalid ve ark., 2017).

Termal desorpsiyon metodunda ise, kirli toprağın ihtiva ettiği kirleticiler, uçucu hale gelene kadar ısıtılarak bu maddeler gaz toplama ekipmanı aracılığı ile tutulur (Zhang ve ark., 2017). Ağır metallerce kirlenmiş toprağın kimyasal iyileştirme teknolojisi, toprağın yıkanmasını ve immobilizasyon metodunu içermektedir. İn-situ immobilizasyon işlemleri, kolay ve az enerji gerektiği için tercih edilmektedir. Fitoremediasyon, ağır metaller tarafından düşük ila orta derecede kirlenmiş alanların rehabilite edilmesinde kullanılan en iyi metottur ve kirleticilerin etkili bir şekilde giderilmesinde kullanılır (Khalid ve ark., 2017). Fitoremediasyon, kirli toprak veya suda bulunan kirletici maddeleri alandan uzaklaştırmak, suyu veya toprağı rehabilite etmek için, hızlı büyüyen ve bünyelerinde toksik maddeleri barındırabilen bitkilerin kullanıldığı çevre dostu bir yöntemdir. Ağır metallerce kirlenmiş toprakların rehabilitasyonunda diğer bir yöntem olan biyolojik iyileştirme, fitoremediasyon metodu ile beraber kullanılmaktadır (Mahar ve ark., 2016).

### **1.3. Topraktaki Ağır Metal Kirleticilerin Uzaklaştırılmasında Kullanılan**

#### **Fitoremediasyon Tekniği**

Fitoremediasyon kavramı ilk olarak 1983 yılında ortaya çıkmıştır (Helmisaari ve ark., 2007). Topraktaki ağır metallerin ortamdan uzaklaştırılması ve topraktaki rehabilitasyon faaliyetleri kapsamında yararlanılmakta olan birçok yöntem, ekonomik açıdan maliyetlerinin oldukça yüksek olması ve arıtım sonrasında ortaya çıkan diğer kirletici ve zararlı nitelikteki maddelerin ortamdan uzaklaştırılması konusunda yaşanan zorluklar sebebiyle günümüz şartlarına uygun değildir.

Buna karşın, ağır metal kirliliğinin biyokimyasal bir döngü niteliğindeki fitoremediasyon metoduyla uzaklaştırılması, teknik açıdan, maliyet açısından ve ekolojik tabanlı olmasından ötürü tercih edilmektedir (Blaylock ve Huang, 2000). Fitoremediasyon metodunun uygulama sonrasındaki başarı oranı, bitkinin yeterli düzeyde gelişip, biyokütlesinin yeterli miktara ulaşabilmesine ve bitkinin kendi bünyesine alabildiği ağır metal miktarıyla doğru orantılıdır. Bu amaç için seçilen ve hiperakümülatör olarak adlandırılan bu bitkiler, kendi bünyelerinde yüksek konsantrasyonlarda ağır metal depolarken, aynı zamanda da yeterli derecede biyokütleyi üretmelidirler (Chaney ve ark. 1997, Shen ve ark. 1997). Gerçekleştirilen farklı araştırmalar kapsamında, fitoremediasyon metoduyla topraktan kirletici nitelikli ağır metallerin bu ortamlardan uzaklaştırılması ve toprağın rehabilite edilebilebilmesi için değişik bitki türleri belirlenmiştir. Yapılan bu araştırmaların sonucunda, kendi bünyelerine dış ortamdan ağır metalleri alarak, biriktirip depolayabilen 45 farklı bitki familyası saptanmıştır. Bu bitkiler, Cu (Bakır), Mn (Manganez), Se (Selenyum), Co (Kobalt), Cd (Kadmiyum), Zn (Çinko) veya Ni (Nikel) elementlerini kendi bünyelerinde depolayabilmektedirler. Fitoremediasyon yöntemi ile diğer toprak rehabilitasyon yöntemleri karşılaştırıldığında, fitoremediasyon yöntemi birçok avantaja sahiptir. Bunlar, ekonomik anlamda düşük maliyetler ve sürekli işletim masraflarının oldukça az olması, bitkilerin bünyelerinde biriktirdikleri metallerin ekonomik anlamda geri kazanılabilmesi, herhangi bir atık alanına gerek görülmemesi, arıtım yapılabilecek kirleticilerin çok çeşitli ve sayıca fazla olması olarak sayılabilir. Bunların yanı sıra, uygulama süreçleri boyunca toprak üzerindeki işlemlerin herhangi bir sekteye uğramadan devam edebilmesi, estetik görünüme sahip olması, topraktaki yaşamın ve döngünün tekrar canlanabilmesi, kirli ortamda yetiştirilen bitkilerin su, toprak ve rüzgar erozyonuna engel olarak, zararlı kirleticilerin etrafa yayılmasını önlemesi önemli faydalarındandır. Tüm bu avantajların yanı sıra, bazı dezavantajlar da söz konusudur. Bunlar, rehabilitasyon süresinin uzun olması ve işleyleştiki sürecin yavaşlığı, sürecin mevsime bağlı olarak işleyişi, rehabilitasyon ve arıtımın tamamıyla sağlanamaması, fazla miktarda kirlilik durumunda bitkilerde toksik etkilerin meydana gelmesi, sadece sığ bölgede yer alan kirleticiler için uygun olup, derinde yer alan kirliliklerin uzaklaştırılmasında uygun olmamasıdır (Bingöl, 2008).

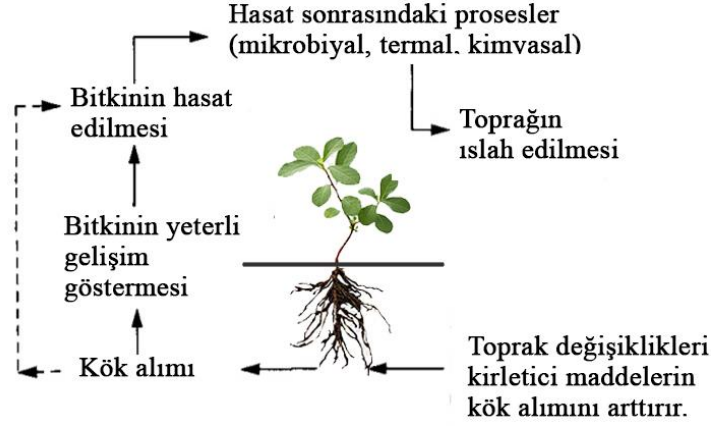
## **1.4. Topraktaki Ağır Metal Kirleticilerin Uzaklaştırılmasında Kullanılan Fitoremediasyon Yöntemleri**

### **1.4.1. Fitostabilizasyon**

Fitostabilizasyon için, fitoimmobilizasyon veya fitorestorasyon ifadeleri de kullanılmaktadır (Ramanjaneyulu ve ark., 2017). Ağır metallerce kirlenmiş toprağın ıslah edilmesi amacıyla uygulanmaktadır. Bu yöntem, bitkiler vasıtasıyla kirleticilerin bulunduğu ortam içerisindeki hareketini büyük ölçüde kısıtlayarak engeller. Yöntemin ana temeli, toprak içerisindeki kirliliğin miktarını azaltmaya yönelik değil, hareketini engellemek üzerine kuruludur. Fitostabilizasyon, bitki kökleri vasıtasıyla veya rizosferde çökelme yoluyla biriken ağır metallerin hareketini kısıtlamaktadır. Böylece, komşu parselde olan kirliliğe çok yakın alanların kirlenmesi kısıtlanmış olur (Bolan ve ark., 2011). Bu metodun uygulanmasındaki ana amaç, ağır metallerin hareketliliğinin azaltılarak kirliliğin süzülmesini ve yeraltı suyuna ve oradan da tarım mahsullerinden besin zincirine olan girişini sınırlandırmaktır (Khalid, 2017). Fitostabilizasyonda kullanılacak bitki, yüksek konsantrasyonlardaki ağır metal kirliliğinde dahi geniş ve yoğun bir kök sistemini koruyabilmeli ve biyokütle üretimi yüksek olmalıdır (Rizzi ve ark., 2004).

### **1.4.2. Fitoekstraksiyon**

Diğer bir ifadesi fitoakümüülasyon olan bu yöntemle, su ve topraklardaki ağır metal sınıfındaki kirleticiler, hızlı büyüyen bitkiler ile ortamdan uzaklaştırılır (Pajevic ve ark., 2016). Fitoekstraksiyon yönteminde bitki, toprağın içerdiği ağır metalleri kökleri aracılığıyla alarak, toprak üstü organlarına ve sürgünlerine taşımaktadır (Şekil 1.10). Fitoekstraksiyon yönteminde kullanılacak olan bir bitki, ağır metale karşı toleransının oldukça fazla, hektar başına yüksek biyokütleyle sahip, hızlı gelişim gösterebilen, yapraklarında ağır metali depolayan, güçlü ve geniş bir kök sistemine sahip olma niteliklerini bulundurmalıdır (Fulekar ve Jadia, 2008). Hasat edilen bitki, biyogaz üretimi amacıyla kullanılabildiği gibi, yakılarak ağır metalin geri eldesinde de kullanılabilmektedir. Bunların yanında, bitkilerin tarımsal faaliyetin sürdürülmediği, ıssız toprak alanlarında da imha edilmesi mümkündür (Singh ve Bhargava, 2008).



**Şekil 1.10.** Fitoekstraksiyon süreci (Ashraf ve ark., 2019’ dan uyarlayarak)

Fitoekstraksiyon metodunda bitkinin kök sistemi tarafından, ağır metallerin bir kısmı bitki kökü yüzeyinden absorbe edilerek bitki tarafından emilir. Ardından, bitkinin kendi bünyesi açısından biyolojik olarak gereksinim duyduğu ağır metaller ise, hücre zarından köklerin yapısına geçerler. Kökler aracılığı ile bünyeye alınmış olan ağır metallerin bir bölümü bitkilerin kofulunda (vakuol) tutulur. Bitkinin bünyesinde olan ancak tutulmayan ve hareketli olan ağır metaller ise bitkinin ksilemine ulaşırlar. Kofulda tutulmayıp ksileme ulaşan ağır metaller, bitkinin sürgün ve yapraklarına ulaşırlar (Adrees ve ark., 2015). Fitoekstraksiyonda kullanılabilecek hiperakümülatör yeteneğine sahip birçok bitki türü yer almaktadır (Tablo 1.3.)

**Tablo 1.3.** Topraktaki ağır metallerin uzaklaştırılmasında kullanılan fitoekstraksiyon metodunda etkili olan bazı hiperakümülatör bitkiler (Ojuederie ve Babalola, 2017)

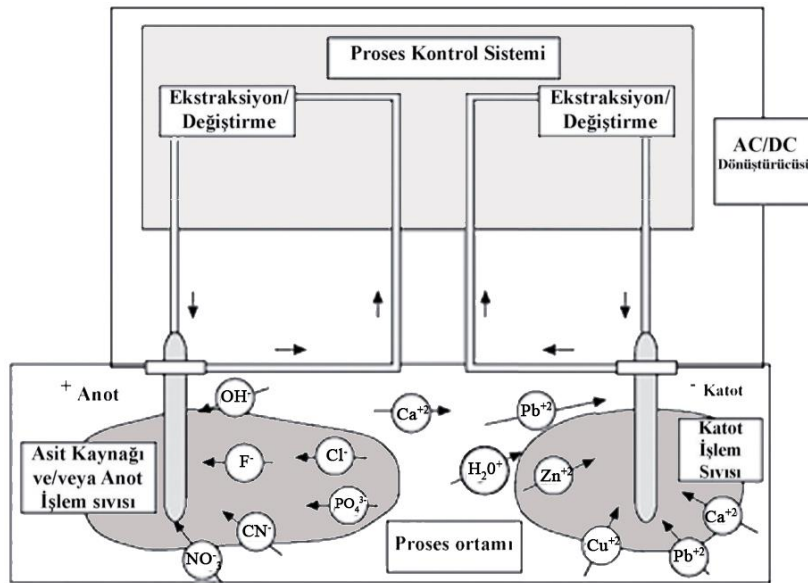
| Bitki Türü                    | Bitki Familyası | Bünyesine Alabildiği Ağır Metaller |
|-------------------------------|-----------------|------------------------------------|
| <i>Alyssum bertolonii</i>     | Brassicaceae    | Ni                                 |
| <i>Alyssum murale</i>         | Brassicaceae    | Ni                                 |
| <i>Arabidopsis halleri</i>    | Brassicaceae    | Zn, Cd                             |
| <i>Arabidopsis halleri</i>    | Brassicaceae    | Cd                                 |
| <i>Astragalus racemosus</i>   | Fabaceae        | Se                                 |
| <i>Berkheya coddii</i>        | Asteraceae      | Ni                                 |
| <i>Euphorbia cheiradenia</i>  | Euphorbiaceae   | Cu, Fe, Pb, Zn                     |
| <i>Helianthus annuus</i>      | Asteraceae      | Pb, Cd, Zn                         |
| <i>Medicago sativa</i>        | Fabaceae        | Pb                                 |
| <i>Minuartia verna</i>        | Caryophyllaceae | Zn, Cd, Pb                         |
| <i>Pteris vittata</i>         | Pteridaceae     | As                                 |
| <i>Pteris vittata</i>         | Pteridaceae     | Hg                                 |
| <i>Sedum alfredii</i>         | Crassulaceae    | Pb                                 |
| <i>Spartina argentinensis</i> | Poaceae         | Cr                                 |
| <i>Viola boashanensis</i>     | Violaceae       | Zn, Cd, Pb                         |

### 1.4.3 Rizofiltrasyon

Rizofiltrasyon bazı kaynaklarda fitofiltrasyon olarak da adlandırılır. Ağır metallerin özellikle toprak ve sulu ortamlardan uzaklaştırılabilmesi için kullanılmaktadır. Bitkinin kök yapısı bu teknikte önem arz etmektedir. Kirli ortamdaki kirletici maddeler bitkinin kök sistemi ile alınarak, kök yüzeyinde tutulur veya kökler kirletici maddeleri bitkinin toprak üstü organlarına aktarırlar (Mukhopadhyay ve Maiti, 2010). Hem toprak kirliliğinde hem de sudaki ağır metal kirliliğinde hızlı gelişim göstermekte olan bitkiler kullanılmaktadır. Zn (Çinko), Cd (kadmium), Cu (bakır), Ni (nikel) ve Kurşun (Pb) gibi ağır metallerin ortamdaki uzaklaştırılabilmesi için uygulanır (Dhanwal ve ark., 2017).

### 1.5. DC Elektrik Alanı ve Fitoremediasyona Olan Etkisi

Bu yaklaşım, DC (Doğru Akım) kaynağı kullanılarak, toprağa in-situ (yerinde) elektrik alanı uygulanması işlemi olup, bir elektrokinetik (EK) iyileştirme metodudur. Toprağa yerleştirilen elektrotlara düşük voltajlı DC uygulanarak, bazı ağır metal kirleticilerin harekete geçmeleri teşvik edilmekte ve topraktan uzaklaştırılma süreci hızlanmaktadır (Acar ve Alshawabkeh, 1993). Elektrotların, toprak üzerine dikey ya da yatay bir konumda yerleştirilebilmeleri mümkündür. Elektrotlara DC voltaj uygulandığında, katotlar ve anotlar arasında bir elektrik alanı oluşmaktadır. Oluşan DC elektrik alanıyla, ortam içerisinde bulunan toprak, su ve ağır metaller arasında farklı etkileşimler gerçekleşmektedir (Şekil 1.11).



**Şekil 1.11.** DC elektrik alanı ile oluşturulan toprak iyileştirme metodu (Zaghloul ve Saber, 2019'den uyarlanarak)

Bu etkileşimler, elektromigrasyon, elektroforez, elektroozmoz ve toprak pH'ında meydana gelen çeşitli değişimlerdir. Elektromigrasyon, elektriksel alan içerisinde gerçekleşmekte olup, katyonların ve anyonların bir döngü halindeki tüm taşınma durumlarını ve hareketini ifade eder. Elektroforez, bir elektrik alanının neden olduğu yüklü bir parçacığın bir sıvı içindeki hareketleridir. Elektroozmoz ise, iyon içeren bir sıvının sabit yüklü bir yüzeye göre olan hareketidir. Bu ortam içerisinde gelişen topraktaki pH değişiklikleri ise, elektrotlardaki elektroliz reaksiyonlarının bir sonucu olarak akımın etkisi ile oluşmaktadır. Suyun oksidasyonu anotta gelişir ve hidrojen ( $H^+$ ) iyonları açığa çıkar.  $H^+$  iyonlarının taşınması,  $OH^-$  iyonlarının taşınmasından daha hızlı gerçekleşmektedir (Zaghloul ve Saber, 2019). Elektrotlar arasında meydana gelen suyun elektrolizinde iyonik ürünler ( $H^+$  ve  $OH^-$ ) oluşur. Elektrik akımının etkisi ile pozitif yüklü iyonlar katoda doğru, negatif yüklü iyonlar ise anoda doğru bir taşınma gerçekleştirirler (Acar and Alshawabkeh, 1993).

Kirlenmiş topraklara yerleştirilen elektrotlarla düşük yoğunluklu bir elektrokimyasal alan yaratıldığında, su elektrolizinin de etkisiyle, anot elektrodu etrafında  $H^+$  üretimi gerçekleşmektedir. Böylece, daha fazla metal veya metalloidler, anot elektrodu etrafındaki asit ortamı altında demobilize edilmektedir (Thangavel ve Subbhuraam, 2004).

Genel olarak, DC elektrik alanının biyokütle üretimini arttırdığı ve kirleticileri harekete geçirdiği, dolayısıyla elektrik uygulamasının fitoremediasyon için oldukça yararlı olduğu saptanmıştır (Cameselle ve ark., 2013). Ancak, elektrik alanı çok yoğun bir biçimde uygulandığında, bitkiler için olumsuz etkiler gözlenmiştir. Toprak pH'ında yaşanan değişiklikler ve elektrik alanının oluşturduğu metal biyoyararlanımı, bitki ve toprak mikroflorasını etkilemektedir (Cang ve ark., 2011, 2012).

Elektrik alanı uygulaması, topraktaki suyun elektrolizi yoluyla, pH ve elektrik iletkenliğinde değişikliklere neden olarak, fitoremediasyon veriminin artırılmasında rol oynayabilmektedir. Cameselle ve ark. (2019) yaptıkları araştırmada, düşük bir potansiyel fark (0,67 V/cm) yaratılarak, toprağın fizikokimyasal özelliklerinde, bitki sağlığını etkilemeyecek küçük değişikliklerin oluştuğunu ve bunun da fitoremediasyonu artırabildiğini gözlemişlerdir. Söz konusu çalışmada, ağır metallerle (Cd, Co, Cr, Cu, Pb ve Zn) kirlenmiş toprak üzerinde yapılan elektro-fitoremediasyon testlerinde, seçilen

voltaj değişim hızı kullanılmış ve 6 metalin fitoremediasyonunun arttığı gözlenmiştir. Bu çalışmanın sonuçları temel alınarak, mevcut çalışmada benzer bir uygulamanın Ergene Havzası tarım arazisi toprağında ağır metal giderimindeki etkinliği araştırılmıştır.

Juris ve ark. (2015) yaptıkları çalışma kapsamında, laboratuvar ortamında kirletilmiş toprakta fitoremediasyon verimini, elektrokinetik iyileştirme yöntemi ile araştırmışlardır. Bu alışma için 5 kg'lık bir toprak numunesi, 350 mg.kg<sup>-1</sup> Bakır II Sülfat Pentahidrat eklenerek kirletilmiştir. Saksı içerisine grafit elektrotlar (100x70x30 mm ebatlarında) yerleştirilmiş ve 41 V'luk (2 V.cm<sup>-1</sup>) bir güç kaynağına bakır olmayan bir tel ile bağlantısı yapılmıştır. Toplam 40 günlük deney süresi boyunca yaşanan değişimler gözlenmiştir. Elektro-ozmozun toprağın sudan ayrıştırılmasında etkili olduğu ancak, ağır metallerin topraktan uzaklaştırılmasında başarısız olduğunu ortaya koymuşlardır. Düşük voltajlı DC uygulaması ile kirleticilerin topraktan elektrokinetik olarak uzaklaştırılmasının, kirlenmiş toprağın bazı bölgelerinde başarılı olduğu gözlenmiştir. Katoda yakın olan bölgelerde ise kirliliğin daha yoğun olarak bulunduğunu belirtmişlerdir. Deney sonuçları, DC elektrik alanı ile toprak ıslahının, ağır metallerce kirlenmiş toprakların rehabilitasyonu için bir yöntem olabileceğini, ancak deney sürecinin daha uzun süre uygulanması gerektiğini ortaya koymuştur (Juris ve ark., 2015).

Mao ve ark. (2016) yaptıkları araştırma kapsamında, elektrokinetik alan içerisindeki topraklarda Pb (kurşun), Cs (sezyum) ve As (arsenik) elementlerinin dağılımını ve çözünürlüğünü belirlemiş ve kirli toprakların elektrokinetik fitoremediasyon süreçlerini incelemişlerdir. Bu süreçte, elektrokinetik alan içerisinde eltik tarımı yapılan toprakta Pb, As ve Cs'un yüksek biyoyararlanımı ve biyoakümülasyonunu saptamışlardır. Çalışmada, her saksıya hint hardalı (*Brassica juncea*), ıspanak (*Spinacia oleracea*) ve lahana (*Brassica rapa*) tohumları ekmişlerdir. Yaptıkları araştırma sonucunda, elektrokinetik uygulamasının metal veya metalloidlerin çözünmesi için yararlı olduğunu, anotun etrafındaki toprakların pH'ını yaklaşık 1.5 değerine düşürebildiğini ve buna bağlı olarak, genel çözünürlüklerini de arttırdığını saptamışlardır. Anot bölgesindeki çözünürlüğün yüksekliği ve genel potansiyelin fazla olması biyoyararlanım anlamına gelirken, katot alanlarında ise daha düşük çözünürlük anlamına gelmekte olduğunu belirtmişlerdir. Elektrokinetik alan uygulamasının, bitki köklerinde ve filizlerinde biyoakümülasyonu önemli ölçüde arttırdığını vurgulamışlardır. Pb ve As elementlerinin, bitkinin köklerinde sürgünlerden çok daha fazla, Cs elementinin ise sürgünlerde daha fazla biriktiğini

belirtmiş, hint hardalı, ıspanak ve lahana bitkilerinin, Cs için iyi biriktirici olduklarından bahsetmişlerdir. Bu çalışma kapsamında, anot ve katot olarak 0,95 cm çapında ve 30,5 cm uzunluğunda grafit elektrot çubukları kullanılmıştır. Grafit çubuklar, saksıya dikey konumda yerleştirilmiştir. Güç kaynağını elektroda bağlamak için ise bakır tel kullanmışlardır. Deney süresince 24 saat kesintisiz olarak doğru akım uygulanmıştır. Suda çözünebilen ve bunun yanında değiştirilebilir metallerin bitkiler için biyoyararlanımını belirlemişlerdir. Çalışmalarında, toprağın analizinde ve bitkinin sürgünleri ile köklerindeki Pb, As ve Cs konsantrasyonlarının belirlenmesinde ICP-MS cihazı kullanmışlardır.

## **1.6. Aspir (*Carthamus tinctoria* L.) , Soya Fasulyesi (*Glycine max*), Kanola (*Brassica napus*) Bitkilerinin Özellikleri ve Hiperakümülatör Etkileri**

### **1.6.1. Aspir (*Carthamus tinctoria*) bitkisi genel özellikleri**

Aspir (*Carthamus tinctorius*) yağlı bir bitki olup, yemeklik yağ olarak kullanıldığı gibi, hayvan yemi ve bitki ilaçları endüstrisinde de kullanılmaktadır (Pearl ve ark., 2014; Dajue ve Mundel, 1996). İnsan sağlığı için gerekli olan linoeik asitin %75'ini bünyesinde barındırmakta olup, bu oran mısır, ayçiçeği, zeytin, fındık bitkilerine nazaran daha yüksektir (Weiss, 2000; Cosge ve ark., 2007). Genel yayılış alanları ise Türkiye, Meksika, Çin, Avustralya, ABD, Hindistan ve İran'dır (Singh, 2007). Aspir bitkisi, 4°C' den yüksek ortam topraklarında çimlenme gösterir. Çimlenme ve yaşam faaliyetlerini devam ettirebilmesi için 15 °C optimum değer olarak kabul edilmiştir (GRDC, 2010).



**Şekil 1.12.** Aspir (*Carthamus tinctoria*) bitkisi yetiştirme alanı (GRDC, 2010).

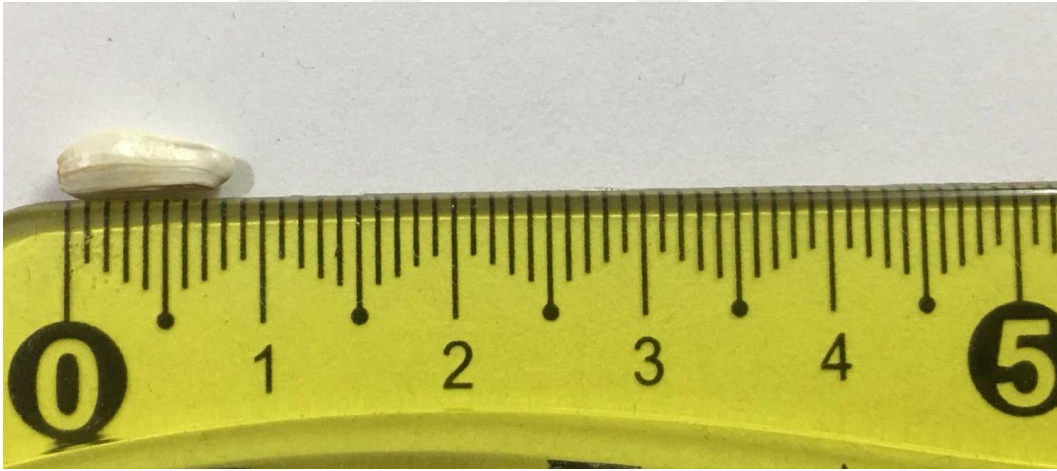
### **1.6.2. Aspir (*Carthamus tinctoria*) bitkisi tohumu**

Aspir (*Carthamus tinctoria*) bitkisi Asteraceae (Papatyagiller) familyasından bir bitki türüdür. Tohumu sarı-kahverengidir (Şekil 13). Küçük bir ayçekirdeğine benzer yapısı

vardır. Ortalama olarak 100 adet aspir tohumu 4 gram, ortalama 25.000 adet aspir tohumu ise 1000 gram (1 kg) ağırlığa sahiptir (Wachsmann, 2010). Ortalama tohum boyutu 0,8 cm'dir (Şekil 1.14).



Şekil 1.13. Aspir (*Carthamus tinctoria* ) bitkisi tohumu



Şekil 1.14 Aspir (*Carthamus tinctoria* ) bitkisi tohumu boyutu

### 1.6.3. Aspir (*Carthamus tinctoria*) bitkisi sürgün, yaprak ve dalları

Aspir bitkisinin dalları ortalama olarak 20 cm yüksekliğine ulaştığında yan dallar gelişmektedir (Şekil 1.15 ve Şekil 1.16). Aspir bitkisinin tırtıklı yapıdaki yaprakları ortalama olacak 2,5 cm genişliğe ve 10 cm uzunluğa ulaşabilmekte olup, gövdenin her iki

yanında düzensiz aralıklarla yer almaktadırlar (GRDC, 2010).

Aspir (*Carthamus tinctoria*) bitkisi, ortam sıcaklığının yüksek olduğu bölgelerde 30 ila 150 cm yüksekliğine kadar boylanabilmekte olup, devedikeni bitkisine benzeyen dikenlere sahip, tek yıllık bir bitkidir (Kumar ve Kumari, 2011). Çiçeklenme periyodunda hızlı bir gelişim göstererek maksimum boyuna ulaşmış olur (GRDC, 2010).



Şekil 1.15. Aspir bitkisi yaprakları üstten görünümü



Şekil 1.16. Aspir bitkisi yaprakları görünümü

#### 1.6.4. Aspir (*Carthamus tinctoria*) bitkisi kök sistemi

İnce ve toprağın derin katmanlarına uzanabilen kazık köke sahip oluşu, bitkinin çok derin topraklarda suya ve besine ulaşabilmesini sağlamaktadır (Şekil 1.17). Gelişmiş kök sistemi ile sert killi toprakları parçalayabilmektedir (GRDC, 2010).



**Şekil 1.17.** Aspir bitkisi yaprak, gövde ve kö yapısı genel görünümü

#### **1.6.5. Aspir (*Carthamus tinctoria*) bitkisinin fitoremediasyon yeteneği**

Shi ve ark. (2010) yaptıkları çalışma kapsamında, *Carthamus tinctoria* bitkisini ele alarak Cd (kadmiyum) ile kirlenmiş toprakların ıslahında kullanmışlardır. Cd ağır metale oldukça dayanıklı olduğu ve Cd ile kirlenmiş toprak alanlarının rehabilitasyonu çalışmalarında kullanılmasının mümkün olduğunu belirlemişlerdir.

Baran (2018) yaptığı çalışma ile aspir bitkisinin yaşamını sürdürebilmesinde gerekli olan Ni (Nikel) ağır metali üzerinde durmuştur. Fazla miktardaki  $Ni^{+2}$  iyonunun toksik etki yarattığını belirtmiş ve Nikele karşı aspir bitkisinin toleransını araştırmıştır. Ayrıca,  $Ni^{+2}$  toksisitesi olan bir ortam içerisinde bitkilerin büyüme, gelişim ve fotokimyasal süreçlerini incelemiştir. Nikel birikiminin etkisinden dolayı başlangıçta kök ve daha sonra sürgündeki gelişim değişikliğini göstererek, bu gelişimin oldukça azaldığını belirtmiştir. Topraktan taşınan Nikelin yapraklara ulaştığını tespit etmiştir. Aspir bitkisinin, Nikeli topraktan uzaklaştırmada veya sabitlemede kullanılmasının mümkün olduğunu ortaya koymuştur.

#### **1.7. Soya Fasulyesi (*Glycine max*) bitkisi genel özellikleri**

Soya fasulyesi (*Glycine max*) Fabaceae familyasından tek yıllık bir bitki olup, yoğun olarak Asya ülkelerinde besin üretimi ve biyodizel yakıt sanayisi amacıyla üretilmektedir. İnsanların ve hayvanların tüketiminde, içerisinde ihtiva ettiği protein, karbonhidrat, yağ ve mineral sebebiyle önem arz eder (Arioğlu, 2007; Gürsoy ve Gökçe, 2000). Anavatanı Çin

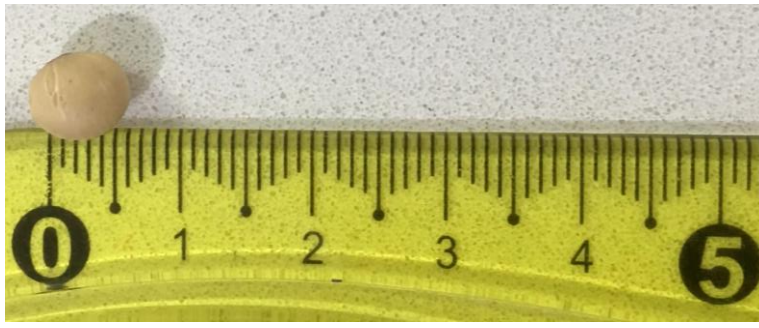
ve Mançurya'dır (Markley, 1950). Yağlı bir bitki olduğundan biyodizel yakıt sanayisinde veya ağır metallerce kirlenmiş toprağın ıslah çalışmalarında kullanılmaktadır (Smith ve ark., 2013). Bitkinin gelişimi açısından optimum sıcaklık değeri 25 – 35 °C' dir (GRDC, 2016).

#### **1.7.1. Soya Fasulyesi (*Glycine max*) bitkisi tohumu**

Soya fasulyesi (*Glycine max*) bitkisi tohumları sarı-açık kahverenginde ve yuvarlak biçimdedir (Şekil 1.18). Soya fasulyesi tohumlarını başarılı bir çimlendirme işlemine tabi tutmak için, kendi tohum ağırlığının yarısı miktarınca su verilmelidir (Bayar ve Yılmaz, 2004). Tohumların boyutları birbirinden farklıdır. Ortalama çapı 0,5 cm'dir (Şekil 1.19). Ortalama olarak 5000 ile 7000 adet tohum 1000 g (1 kg) kütleye denktir. Kırılgan bir tohum yapısına sahip olduğundan, ekim esnasında tohuma zarar vermemeye ve ekim için 5 cm'den fazla derine gömmeye dikkat edilmelidir (GRDC, 2016).



**Şekil 1.18.** Soya fasulyesi (*Glycine max*) tohumu



**Şekil 1.19.** Soya fasulyesi (*Glycine max*) tohum çapı ölçüsü

### **1.7.2. Soya Fasulyesi (*Glycine max*) bitkisi sürgün, yaprak ve dal özellikleri**

Soya fasulyesi tüylü yapraklara sahiptir. 35-45 cm'ye kadar boylanabilmektedir. Ana gövde üzerinde ortalama olarak bir çiçek bulunur. Bu çiçek genellikle üçüncü veya altıncı boğumda görülür (GRDC, 2016).



**Şekil 1.20.** Soya Fasulyesi (*Glycine max*) yaprak ve meyvesi genel görünümü

### **1.7.3. Soya Fasulyesi (*Glycine max*) bitkisi kök yapısı**

Soya Fasulyesi (*Glycine max*), kazık kök yapısına sahiptir (Şekil 1.21). Kök yapısında, havadaki azotu bağlayabilen azoto bakteriler ihtiva etmektedir (Var, 1999). Tarla ortamında soya fasulyesinin yan kökleri 1-2 metre derinliğe kadar ulaşabilirken, ana kazık kök ortalama olarak 30 cm kadar ulaşır (GRDC, 2016).



**Şekil 1.21.** Soya Fasulyesi (*Glycine max*) yaprak, gövde ve kök yapısı genel görünümü

#### **1.7.4. Soya Fasulyesi (*Glycine max*) fitoremediasyon yeteneği**

Sobkowiak ve ark., (2004) yaptıkları çalışma kapsamında, soya fasulyesini (*Glycine max*) ele almışlardır. Soya fasulyesinin hücrelerine Cd (kadmiyum) uygulayarak aktivitesini araştırmışlar ve Cd uygulamasının katalaz aktivitesini azalttığını saptamışlardır.

Smith ve ark. (2013) yaptıkları araştırmada, soya fasulyesi bitkisinin ağır metaller ile POPs ( kalıcı organik kirletici) maddeler için fitoremediasyon özelliği olduğunu ve bitkinin bu amaç doğrultusunda kullanılmasının ardından, biyodizel yakıt sanayisinde değerlendirilebileceğini belirtmişlerdir.

#### **1.8. Kanola (*Brassica napus*) Bitkisi Genel Özellikleri**

*Brassica napus* bitkisi Brassicaceae (turpgiller) familyasına aittir. Soyadan sonra üretilen ve tüketilen ikinci yağlı tohum bitkilerinden birisidir. En iyi gelişimini yüksek organik maddeye sahip kırmızı-kahverengi topraklarda göstermektedir (Maenz, 2007).

##### **1.8.1. Kanola (*Brassica napus*) bitkisi tohumu**

Kanola tohumları mavi-siyah renkte ve yuvarlak yapıdadır (Şekil 1.22). Her biri boyut ve ağırlık açısından birbirinden farklıdır. Ancak, ortalama olarak bir adet tohum yaklaşık 3 mg ağırlığa sahiptir. Ortalama olarak 1000 adet tohum 3-6 g'dır (GRDC, 2017).



**Şekil 1.22.** Kanola (*Brassica napus*) bitkisi tohumu

Tohumların boyutu verimlilik açısından önem arz etmektedir. Ortalama tohum boyutu 1,5 mm'dir. (Şekil 1.23) Büyük boyuttaki tohumlar, daha kaliteli ve dirençli olup, iyi bir verimin oluşumunu sağlarlar. Büyük boyutlu tohumların, 3 cm veya daha az derinliğe ekilmesi gerekmektedir (GRDC, 2017).



**Şekil 1.23.** Kanola (*Brassica napus*) bitkisi tohumu boyutu

### **1.8.2. Kanola (*Brassica napus*) bitkisi sürgün, yaprak ve dal özellikleri**

Kanola (*Brassica napus*) bitkisinde çimlenme tohumun nemi emmesi ve tohum kabuğunun kök tarafından bölünmesinin ardından başlamaktadır. Kotiledonlar yapraklarını yukarı doğru çeker ve tohumun kabuğunu atarak uzaklaştırır. İyi gelişim gösteren bir kanola bitkisi ortalama olarak 10-15 adet yaprağa sahiptir (GRDC, 2017). Yoğun yeşil yassı yuvarlak formda yapraklara sahiptirler (Şekil 1.24 ve Şekil 1.25).



**Şekil 1.24.** *Brassica napus* bitkisinin tohum ekiminden 7 (yedi) gün sonraki gelişimi



**Şekil 1.25.** *Brassica napus* bitkisinin gelişim aşamaları

### 1.8.3. Kanola (*Brassica napus*) bitkisi kök yapısı

Kanola (*Brassica napus*) zayıf bir yapıda olmasına rağmen, kazık kök sistemine sahiptir (Şekil 1.26). Ana kök, 80-100 cm'ye kadar ulaşabilir (GRDC, 2017).



**Şekil 1.26.** *Brassica napus* bitkisinin kök, yaprak ve gövdesinin genel görünümü

### 1.8.4. Kanola (*Brassica napus*) bitkisi fitoremediasyon yeteneği

Angelova ve ark. (2017) yaptıkları çalışmada, Kanola (*Brassica napus*) bitkisinin ağır metaller ile kirlenmiş toprakların fitoremediasyonundaki potansiyelini araştırmışlardır. Bu araştırma ile Bulgaristan'da yer alan ağır metallerce kirlenmiş olan bir tarım arazisi ele alınmıştır. Tarım arazisine ekimi yapılan bitkilerin bir kısmına kompost, bir kısmına vermikompost, diğer bir ifade ile solucan gübresi ilavesi gerçekleştirilirken, diğer bir

kısmına ise müdahalede bulunulmamıştır. Bu alana ekimi yapılan kanola bitkileri, gelişimlerini tamamladıktan sonra hasat edilmiştir. Bitki tohumları öğütülmüş ve ardından soxhlet ekstraksiyon yöntemi ile laboratuvar şartlarında yağ eldesi gerçekleştirilmiştir. Yapılan analizlere göre, hasat edilen bitkinin kökünde, saplarında, yapraklarında, tohumda, tohumdan elde edilen yağda ve bu yağ kullanılarak yapılan yemekte ağır metal içeriği tespit edilmiştir. Ancak, Kanola (*Brassica napus*) ekimi yapılan sahaya kompost ve vermikompost eklenmesi, kök, sürgün ve saplarda Cd, Zn ve Pb içeriğinin azalmasında etkili olurken, tohumda Cd ve Pb içeriğini arttırmıştır. Kanola (*Brassica napus*) bitkisi, ağır metallere karşı oldukça toleransı yüksek, ağır metaller ile kirlenmiş topraklarda yetişebilen ve ağır metallerce kirlenmiş toprakların ıslahında kullanılabilen bir bitki türüdür (Angelova ve ark., 2017).

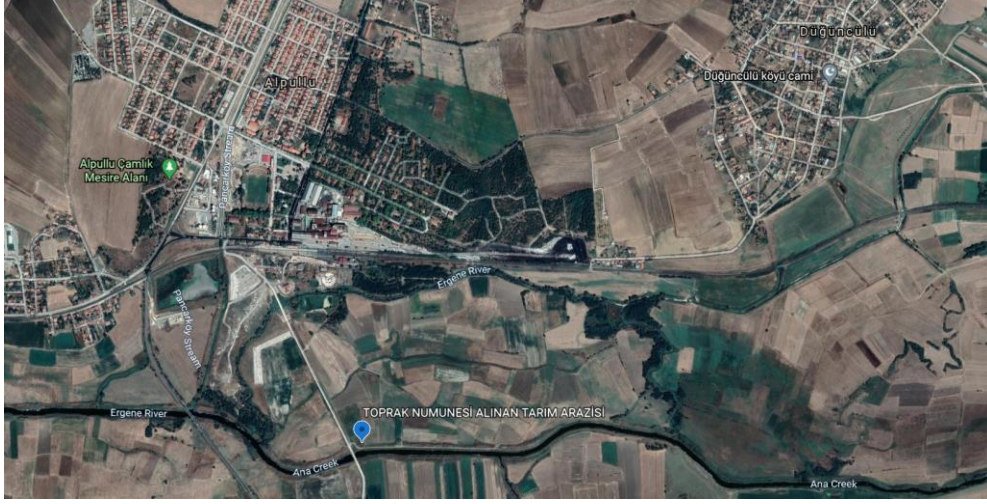
Belouchrani ve ark. (2016) Çinko ile kirlenmiş toprağın fitoremediasyonunda Kanola (*Brassica napus*) bitkisini incelemiştir. Bu çalışma kapsamında yapılan deney süreci üç aylık bir süreye yayılmıştır. Bu süre içerisinde, Kanola (*Brassica napus*) bitkisinin, yapay olarak Zn (çinko) ile kirletilmiş topraktan fitoekstraksiyon yöntemiyle çinkoyu bünyesine alabilme kapasitesi ve artan çinko miktarının bitki verimi, yaprak sayısı, kök yüksekliği, kök uzunluğuna etkilerini incelemişlerdir. Elde edilen sonuçlara göre, Kanola bitkisinin Zn için hiperakümülatör olduğu ve Zn kirliliğine karşı toleransının yüksek olduğunu saptamış ve artan Zn kirliliğinin bitki gelişimi açısından bir sorun teşkil etmediğini, kirliliğe rağmen yüksek miktarda biyokütle üretimini gerçekleştirebildiğini belirtmişlerdir.

## 2. MATERİYAL ve YÖNTEM

### 2.1. Materyal

#### 2.1.1. Toprak ve su numuneleri materyali

Bu çalışmada, Kırklareli İli, Babaeski İlçesi, Alpullu Kasabası, Sinanlı Köyü'nde yer alan, Alpullu-Sinanlı yolu üzerindeki tarım bölgesinde konumlu bir tarla araştırma alanı olarak seçilmiştir (Şekil 2.1). Yüzey toprağı temini için seçilen tarla, Ergene Nehri'nin hemen kıyısında yer almakta olup, Sinanlı Un Fabrikasına 750 m uzaklıkta, Alpullu Şeker Fabrikasına ise 1,10 km uzaklıkta ve Sinanlı II köprüsüne komşu olarak yer almaktadır (Şekil 2.2 ve Şekil 2.3). Çalışma kapsamında toprak numunesi alınan tarım arazisinin enlem derecesi 41.3607896°, boylam derecesi ise 27.1440783° olup, rakım 31,4 m'dir.



**Şekil 2.1.** Toprak numunesi alınan tarım arazisinin Google Earth konumu  
(Erişim Tarihi: 23.01.2021)



**Şekil 2.2.** Toprak ve su numunesi alınan alanın çevresel görünümü



**Şekil 2.3** Toprak numunesi alınan tarım arazisinin genel görünümü

Toprak ve su örnekleri 18 Kasım 2019 tarihinde Babaeski ilçesinde bulunan tarım arazisinden ve kıyısından geçen Ergene Nehri'nden temin edilmiştir. Bu kapsamda, tarlanın 0-50 cm toprak derinliğinden 200 kg toprak numunesi alınmıştır (Şekil 2.4).

Araziden toprak numunesi alınımında kazma ve kürek el aletlerinden yararlanılarak, numuneler 10 adet polietilen çuvala doldurulmuştur.



**Şekil 2.4.** Tarım arazisinden toprak numunesi alımı

Arazinin hemen yanından geçerek tarım alanının sınır hattını oluşturan Ergene Nehri'nden ise, su numuneleri asitte yıkanmış 250 ml'lik polietilen şişelere alınmıştır (Şekil 2.5). Su numunelerini laboratuvar ortamına kadar soğuk olarak getirebilmek için, EPS'den üretilmiş strafor kutulara soğutucu bloklar yerleştirilmiştir. Alınan toprak ve su numuneleri aynı gün içerisinde Marmara Üniversitesi Mühendislik Fakültesi bünyesindeki laboratuvara getirilmiştir. Su numuneleri, analizlerine kadar laboratuvarında bulunan bir buzdolabında +4 °C'de saklanmıştır.



**Şekil 2.5.** Ergene Nehri'nden su numunesi alımı

Toprak numunelerinin alındığı tarım arazisinde 2019 senesinde mısır hasadı yapılmış olup, daha önceki senelerde de, arazi sahibinin belirttiği üzere, yine mısır tarımı yapılmıştır.

Hasat sonrası tarlada mısır koçanlarına rastlanılmıştır (Şekil 2.6).



Şekil 2.6. Hasat sonrası arazide kalarak rastlanılan mısır (*Zea mays* L.)

#### 2.1.2. Bitki tohumu materyali

Aspir (*Carthamus tinctoria*) bitkisinin tohumu Muş Yıldız Alparslan Tarım İşletmesi'nden, Soya fasulyesi bitkisi tohumu (*Glycine max*) Çukurova Tarım İşletmesi Müdürlüğü'nden, Kanola (*Brassica napus*) tohumu ise Tekirdağ Sarıçiçek Tarım Ürünleri San. ve Tic. A.Ş.' den temin edilmiştir (Şekil 2.7). Bitki tohumlarının ıslık almayan, serin ve rutubetsiz kuru bir ortamda muhafaza edilmesine özen gösterilmiştir.

Tohum temininde tohumun sertifikalı olmasına dikkat edilmiştir.

Bu araştırmada bitki türlerinin seçimindeki en önemli faktör, fitoremediasyon sonucu bünyelerine ağır metal alan bitkilerin tüketiminin insan ve hayvan sağlığına uygun olmaması durumunda, biyoyakıt sanayisinde kullanılabilir olmalarıdır. Bu nedenle, özellikle yağlık tohum bitkileri seçilmiş ve üretilen bitkilerin ekonomik değerinin olmasına özen gösterilmiştir. Dolayısıyla, en kötü durumda dahi, fitoremediasyon

uygulamasından sonra bitkilerin biyoyakıt olarak değerlendirilebilmesi mümkün olacaktır.



**Şekil 2.7.** Aspir (*Carthamus tinctoria*) tohumu (sol), soya fasulyesi (*Glycine max*) tohumu (orta), kanola (*Brassica napus*) tohumu (sağ)

## 2.2. YÖNTEM

### 2.2.1. Tarım arazisinden alınan toprak numunelerinde tohumdan bitki yetiştirilmesi yöntemi

#### 2.2.1.1. Toprak hazırlama yöntemi

Tarladan getirilen toprak numuneleri içerisinde nem ihtiva ettiklerinden dolayı kuruması ve havalanması için kuru, rutubetsiz ve dış ortam koşullarının etkisinden uzak olan laboratuvar ortamında oda sıcaklığında kurumaya bırakılmıştır (Şekil 2.8). Kurutma amacıyla 10 gün boyunca toprak serili olarak bırakılmıştır.



**Şekil 2.8.** Kuruması için serilen toprak numunesi

Toprağın killi olması sebebiyle, serme ve kuruma aşamalarından sonra toprak toprakları çok sert bir hal almıştır. El ile kuvvet uygulayarak parçalanmaları güç olduğundan, sağlıklı bir homojenizasyon için, öncelikle iri sert topraklar (kesek) çekiç ile kırılmıştır (Şekil 2.9).



**Şekil 2.9.** Sert toprak parçalarının daha küçük boyutlara getirilmesi işlemi

Bir çekiç yardımı ile daha küçük boyutlara indirilen topraklar, 2 mm gözenek aralıklı elekten geçirilmiştir (Şekil 2.10). Elekten geçemeyecek boyuttaki ve çekiç yardımıyla kırılması mümkün olmayan topraklar ayrılarak, çene kırıcı adı verilen bir makine yardımıyla elekten geçebilecek boyutlara indirilmiştir.



**Şekil 2.10.** Toprak numunesinin elekten geçirilmesi işlemi

Bu aşamalardan sonra, toprağın homojenizasyonunun sağlanabilmesi için, karıştırma işlemi yapılmıştır. Bu maksatla toprak numunesi, 250 litre kapasiteli bir beton karıştırıcı (betoniyer) makinasına aktarılmıştır (Şekil 2.11). Toprak, betoniyer makinası tarafından, yaklaşık 5 dakika boyunca homojenizasyon için karıştırılmıştır (Şekil 2.12).



**Şekil 2.11.** Toprağın karıştırılmasında kullanılan betoniyer makinası



**Şekil 2.12.** Toprağın betoniye ile karıştırılması işlemi

Toprağın homojen bir yapıda olabilmesi için yapılan karıştırma sonrasında toprak, tohum ekimi için hazır hale gelmiştir.

#### **2.2.1.2. Saksıların hazırlaması yöntemi**

Bitkilerin yetiştirilmesi işlemi, 30 cm uzunluğa, 19 cm ene ve 15 cm derinliğe sahip plastik saksılarda gerçekleştirilmiştir. Öncesinde, saksıların altındaki sulama suyu tahliye delikleri silikon ile kapatılmıştır. Bu şekilde, sulama suyu sebebiyle toprakta yer alan herhangi bir ağır metalin çözünüp, süzüntü suyuyla birlikte saksıyı terk etmesi engellenmiştir. Çalışma kapsamında ilk olarak 7 (yedi) adet plastik saksı kullanılmıştır. Her bir saksının dış yüzeyine, ekimi yapılacak bitki türü, saksı numarası ve voltaj uygulamasına dair bilgi içeren bir etiket yapıştırılmıştır. Voltaj uygulamasına tabi tutulmayan aspir bitkisi saksısı 1 no'lu, soya fasulyesi saksısı ise 2 no'lu olarak tanımlanmıştır (Şekil 2.13).



**Şekil 2.13.** Voltaj uygulamasına tabi tutulmayan aspir (sol) ve soya fasulyesi (sağ) saksıları

Sabit kutuplu voltaj uygulamasına (aynı elektroda daima aynı polaritede voltaj uygulaması) tabi tutulacak aspir bitkisinin saksısı 3 no'lu, soya fasulyesi saksısı ise 4 no'lu olarak tanımlanmıştır (Şekil 2.14).



**Şekil 2.14.** Sabit kutuplu voltaj uygulamasına tabi tutulan aspir (sol) ve soya fasulyesi (sağ) saksıları

Değişken kutuplu voltaj uygulamasına (aynı elektroda sırayla farklı polaritede voltaj uygulaması) tabi tutulacak aspir bitkisinin saksısı 5 no'lu, soya fasulyesi saksısı ise 6 no'lu olarak tanımlanmıştır (Şekil 2.15).



**Şekil 2.15.** Değişken kutuplu voltaj uygulamasına tabi tutulan aspir (sol) ve soya fasulyesi (sağ) saksıları

Tohum ekimi gerçekleştirilen bitkiler ile aynı ortam şartlarında tutulan, yalnızca içerisinde toprak barındıran ve aynı sulama şartlarına tabi tutulan şahit numune saksısı 7 no'lu olarak tanımlanmıştır (Şekil 2.16).



**Şekil 2.16.** Şahit numune saksısı

Son deneme çalışmasına kanola bitkisi dahil edilerek, saksı sayısı yediden sekize çıkartılmış ve voltaj uygulamasına tabi tutulmayan kanola bitkisi saksısı eklenmiştir. İlk yapılan deneme çalışmalarında kanola bitkisi kullanılmamıştır. Son yapılan denemenin yürütölmesinde çalışmaya dahil edilmiştir.

### 2.2.1.3. Elektrotların saksılara yerleştirilmesi

Voltaj uygulamasında elektrot olarak, özel imal edilmiş saf grafit plakalar kullanılmıştır. Her saksının içerisine sağ ve sol başlarda DC voltajın uygulanacağı iki adet geniş grafit plaka, orta bölgede saksının uzunluğu boyunca birbirlerine eşit mesafelerde yerleştirilmiş ve zaman zaman voltaj değerlerinin ölçölceği iki adet dar grafit çubuk yerleştirilmiştir.

Saksının sağında ve solunda yer alan grafit plakaları 1 cm kalınlığında, 15 cm uzunluğu ve 12 cm genişliğindedir (Şekil 2.17).



Şekil 2.17. Saksı içinde sağ ve sol başlarda yer alan grafit elektrot

Her saksının orta bölgesinde, saksının uzunluğu boyunca birbirlerine eşit mesafelerde yerleştirilmiş ve zaman zaman voltaj değerlerinin ölçölceği iki adet dar grafit çubuk 1 cm kalınlığında, 15 cm uzunluğu ve 2 cm genişliğindedir. (Şekil 2.18)



Şekil 2.18. Saksıların ortasında yer alan grafit elektrotlar

Boş saksılara toprak doldurulması aşamasında elektrodlar saksılara yerleştirilmiş ve daha sonrasında tohum ekimi gerçekleştirilmiştir.

### 2.2.2. Birinci deney çalışmasının kurgulanması ve uygulanması

Herhangi bir voltaj uygulamasına tabi tutulmayan 1 no'lu aspir bitkisi tohumu ve 2 no'lu soya fasulyesi bitkisi tohumu ekilecek saksıların her birine, 6,50 kg toprak konulmuştur (Şekil 2.19).



Şekil 2.19. Aspir ve soya fasulyesi bitkisine ait toprak dolu saksılar

Çimlenme sonrası sabit kutuplu voltaj uygulamasına tabi tutulacak 3 no'lu aspir bitkisi tohumu (Şekil 2.20) ve 4 no'lu soya fasulyesi bitkisi tohumu ekilecek saksıların her birine, grafit plaka ve çubukların yerleştirilmesinin ardından 6,50 kg toprak konulmuştur.



Şekil 2.20. Sabit kutuplu voltaj uygulaması yapılacak olan aspir bitkisi saksısı

Çimlenme sonrası değişken kutuplu voltaj uygulamasına tabi tutulacak 5 no'lu aspir bitkisi tohumu (Şekil 2.21) ve 6 no'lu soya fasulyesi bitkisi tohumu ekilecek saksıların her birine, grafit plaka ve çubukların yerleştirilmesinin ardından, 6,50 kg toprak konulmuştur.



**Şekil 2.21.** Değişken kutuplu voltaj uygulaması yapılacak olan aspir bitkisi saksısı

Tohum ekimi gerçekleştirilen bitkiler ile aynı ortam şartlarında ve aynı sulama şartlarına tabi tutulan şahit numune saksısına da 7,0 kg toprak numunesi konmuştur (Şekil 2.22).



**Şekil 2.22.** Yalnızca toprak dolu şahit numune saksısı

Saksılara 6,50 kg eşit miktarda toprak konulduktan sonra, ayrı ayrı tohum ekimleri yapılmıştır (Şekil 2.23).



**Şekil 2.23.** Aspir ve soya fasulyesi tohumu ekimi

Tohumların saksılara serpilmesinden sonra üstü toprak ile örtülmüş ve eşit bir sürecin yönetilebilmesi adına saksıların her birinin ağırlığı yaklaşık 7,0 kg olmasına özen gösterilmiştir. Tohumların üstü toprak ile kapatıldıktan sonra deiyonize su ile sulaması yapılmıştır (Şekil 2.24 ve Şekil 2.25). Toprağın nem içeriğinin oldukça düşük olması ve kuru bir halde olmasından dolayı, sulama miktarı toprağın homojen olarak ıslanmasını sağlayacak şekilde ayarlanmıştır.



**Şekil 2.24.** Tohum ekiminden sonraki ilk sulama



**Şekil 2.25.** Sulama suyu olarak kullanılan deiyonize su ve cihazı

Tohum ekiminden 6 (altı) gün sonra çimlenme faaliyetleri gözlemlenmiştir. Yapılan ilk deney çalışması kapsamında aspir bitkisi, soya fasulyesinden daha hızlı bir gelişim göstermiştir (Şekil 2.26).



**Şekil 2.26.** Aspir (ön) ve soya fasulyesi (arka) çimlenme sonrası gelişimleri

Ancak, kısa bir süre sonra deney başarılı olamamış, tohumlardan istenilen bitki gelişimi sağlanamamıştır. Bunun temel sebeplerinin, toprağın killi yapısı dolayısıyla üst katmanın çabuk kuruması, buna karşın alt katmanın oldukça ıslak olarak kalması (saksıdan süzüntü suyu tahliyesi bilinçli olarak engellenmiştir), bunun da köklerde çürümeye yol açması ve de laboratuvar kapalı ortamının bitki gelişimi bakımından uygun olmaması olduğu düşünülmektedir (Şekil 2. 27).



**Şekil 2.27.** Aspir (ön) ve Soya fasulyesi (arka) yeterli gelişimin sağlanamaması

### **2.2.3. İkinci deney çalışmasının kurgulanması ve uygulanması**

Birinci deneyin başarısızlığındaki faktörlerden birisi olduğuna inanılan, laboratuvar kapalı ortamının bitki gelişimi bakımından uygun olmaması durumu göz önüne alınarak, ikinci deney aşaması farklı bir ortamda yürütülmüştür. Kapalı bir oda niteliğinde olmayan, yarı açık ve rüzgar alabilen, ancak yağışlara karşı korunaklı bir mekan çimlenme faaliyetinin gerçekleştirilebilmesi için seçilmiştir. Tohum ekiminden önce, tüm toprak numuneleri saksılarından boşaltılıp karıştırılarak tekrar homojenleştirilmiş ve tekrar saksılara doldurulmuştur. Akabinde, tohum ekimleri tekrar gerçekleştirilmiştir. Bu deney sürecinde, gerekli görüldükçe üst toprak katmanı kırılarak havalandırılmış ve tohumlar daha sağlıklı bir gelişim göstererek, beklenen verimi sağlamışlardır (Şekil 2.28 ve Şekil 2.29).



**Şekil 2.28.** Sabit kutuplu voltaj uygulanacak olan aspir bitkisi (sol) değişken kutuplu voltaj uygulanacak olan aspir bitkisi (sağ) gelişim durumları



**Şekil 2.29.** Voltaj uygulanmayacak olan aspir bitkisi (sol), sabit kutuplu voltaj uygulanacak olan soya fasulyesi bitkisi (sağ) gelişim durumları

Sağlıklı bir gelişim gösteren bitkiler 1 (bir) ay boyunca bulundukları alandan alınıp, voltaj uygulamasına başlanabilmesi amacıyla laboratuvara taşınmışlardır. Laboratuvarda bitkilerin ışık alabilmesi ve gelişimlerinin devamı için 3 adet ampulden oluşan zaman ayarlı bir aydınlatma düzeneği kurulmuştur (Şekil 2.30).



**Şekil 2.30.** Laboratuvar ortamına taşınıp ve aydınlatma düzeneği etkisi ile gelişimlerine devam eden bitkiler

### 2.2.3.1. İkinci deneyin yürütülmesi kapsamında voltaj uygulanması yöntemi

Bitkiler bir aylık gelişim aşamasını tamamladıktan sonra çimlenme ve gelişim evrelerini sürdürdükleri ortamdan alınıp laboratuvar ortamına taşınmıştır. Laboratuvar ortamında sabit kutuplu ve değişken kutuplu voltaj uygulamasına tabi tutulacak olan saksılar için, zaman ayarlı otomatik bir düzenek kurulmuştur. Voltaj uygulamalarının sağlanabilmesi için bir adet DC güç kaynağı kullanılmıştır. Bu uygulamada, TT T-ECHNI-C firmasının RXN-3010D model numaralı güç kaynağından yararlanılmıştır (Şekil 2.31). Bakır tel yardımı ile elektrotlar güç kaynağı tarafından beslenen otomatik uygulama düzeneğine bağlanmışlardır.

Güç kaynağının giriş voltajı: AC 220V  $\pm$  10 % 50 Hz

Çıkış voltajı: DC 0-30V 0-10 A

Sigorta: 5 x 20 mm 5A

Watt: 300 W



Şekil 2.31. Voltaj uygulamasında yararlanılan DC güç kaynağı

1 mm kalınlığında, 17,50 cm uzunluğunda ve 2,50 cm genişliğindeki bakır levhalar, saksının sağ ve sol başlarında yer alan grafit elektrotlara ELTOS marka metal mandallar ile kenarından sıfırlanarak tutturulmuştur (Şekil 2.32).



Şekil 2.32. Metal mandallar ile bakır levhaların elektrotlara tutturulması

Bakır levhaların otomatik düzeneğe bağlanabilmesi için, bakır levhalara bakır teller lehimlenmiştir. Sabit kutuplu voltaj uygulamasında kullanılacak olan bakır levhaların her birine birer adet kırmızı (pozitif) ve siyah (negatif) bakır kablo bağlanmıştır (Şekil 2.33). Değişken kutuplu voltaj uygulamasında kullanılacak olan bakır levhaların her birine ise iki adet olmak üzere bakır kablolar bağlanmıştır (Şekil 2.34). Pozitif kırmızı ve negatif siyah kablo sol grafit elektroda tutturulacak olan bakır plakaya, Pozitif kırmızı ve negatif siyah kablo sağ tarafta bulunan elektrota tutturulacak olan bakır plakaya lehim yapılarak bağlanmıştır.



**Şekil 2.33.** Sabit kutuplu voltaj uygulaması yapılan soya fasulyesi bitkisi



**Şekil 2.34.** Değişken kutuplu voltaj uygulaması yapılan soya fasulyesi bitkisi

Bakır levhalara lehimlenen bakır kablolar, DC güç kaynağı tarafından beslenen, zaman saatleri ve kontaktörlerden oluşan otomatik voltaj uygulama düzeneğine bağlıdırlar. Bu deneyde 3 adet Siemens marka 3TF4322-0A model kontaktör kullanılmıştır (Şekil 2. 35).



**Şekil 2.35.** Bakır levhaya lehim yapılan kabloların kontaktöre bağlanması ve kontaktörün timer ile olan bağlantı sistemi

Çalışmada, 3 no'lu sabit kutuplu voltaj uygulamasına tabi tutulan aspir bitkisi saksısı ile 4 no'lu sabit kutuplu voltaj uygulamasına tabi tutulan soya fasulyesi saksısı 1 no'lu kontaktöre bağlıdırlar.

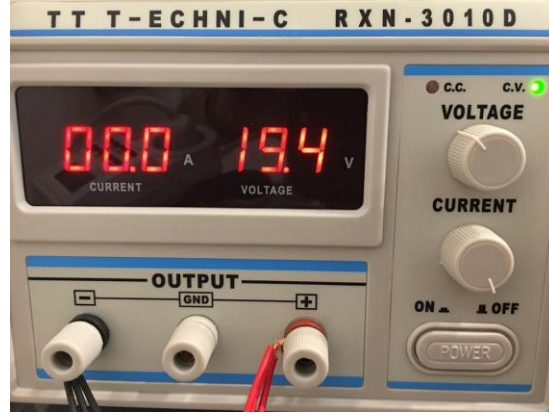
Değişken kutuplu voltaj uygulamasına tabi tutulan saksıların baş kısımlarındaki grafit plakaların pozitif kutupları 2 no'lu kontaktöre bağlı olup, negatif kutupları ise 3 no'lu kontaktöre bağlıdırlar. Tüm kontaktör dijital zaman saatleri (timer) ile kontrol edilmektedirler Zaman saatleri, sisteme voltaj uygulama saatlerini ayarlama işlemini gerçekleştirirler. Her bir zaman saatinin bir zamanlama sistematiği vardır ve ona uygun olarak voltaj uygulamasını yürütür. Programlanmasına bağlı olarak, zamanı geldiğinde belirlenen DC voltajı uygular veya keser. 1 no'lu (sol) timer 4 saatlik, 2 no'lu (orta) timer 2 saatlik, 3 no'lu (sağ) timer 2 saatlik periyotlara ayarlanmışlardır (Tablo 2.1). İstenen saat düzeninin haftanın her günü aynı şekilde uygulanması için programlanmışlardır.

**Tablo 2.1.** Timer çalışma saati düzeni

| Timer Saatlik Çalışma Düzeni |           |               |
|------------------------------|-----------|---------------|
|                              | ON (AÇMA) | OFF (KAPATMA) |
| <b>1 no'lu timer</b>         | 08:00     | 12:00         |
|                              | 16:00     | 20:00         |
|                              | 24:00     | 04:00         |
| <b>2 no'lu timer</b>         | 08:00     | 10:00         |
|                              | 16:00     | 18:00         |
|                              | 24:00     | 02:00         |
| <b>3 no'lu timer</b>         | 13:00     | 15:00         |
|                              | 21:00     | 23:00         |
|                              | 05:00     | 07:00         |

Bu programa göre, 1 nolu kontaktör 3 nolu aspir ve 4 nolu soya fasülyesi saksılarına 4 saat boyunca 19.5 V (0,67 V/cm) DC voltaj uygular ve 4 saat ara verir. Bu işlem 24 saat boyunca pozitif ve negatif elektrotlar değiştirilmeden (sabit kutuplu olarak) tekrarlanır. Değişken kutuplu DC voltaj uygulamasında ise, 2 nolu kontaktör 2 saat boyunca 5 nolu aspir ve 6 nolu soya fasülyesi saksılarına bir yönde DC voltaj uygular, ardından 6 saat ara verir. Ancak, 3 nolu kontaktör voltajın kesilmesinden 3 saat sonra devreye girerek, aynı saksılara ters yönde (pozitif elektrota negatif) DC voltaj uygulamasını iki saat boyunca gerçekleştirir. Dolayısıyla, 8 saatlik bir peryotta 2 saat bir yönde ve 2 saat ters yönde olmak üzere toplam 4 saat DC voltaj uygulanmış, 4 saat ise herhangi bir voltaj uygulanmamış olur. Bu işlem 24 saat boyunca, pozitif ve negatif elektrotlar sırayla değişerek (değişken kutuplu olarak) tekrarlanır.

Otomatik DC voltaj uygulama düzeneğini besleyen güç kaynağını fişe takıp, power tuşu ile cihaz aktif hale getirilir ve voltaj düğmesinden voltaj ayarlama işlemi yapılır (Şekil 2.36).



**Şekil 2.36.** Güç kaynağına kablo bağlantısının yapılması

Sistemde biri DC güç kaynağının ve diğeri zaman saatlerinin olmak üzere iki adet elektrik fişi vardır ve bunlar 220 V standart priz bağlantısı ile sistemi çalıştırmaktadırlar (Şekil 2.37).



**Şekil 2.37.** DC elektrik alanı ile desteklenmiş fitoremediasyon yöntemi uygulaması

Voltmetre (multimetre) cihazı ile elektrotlar üzerinde voltaj ölçümü yapılarak, sistemin çalışması takip edilmektedir (Şekil 2.38). Voltmetrenin siyah probu anot üzerinde ve kırmızı probu katot üzerindeyken, voltmetre pozitif bir okuma vermektedir.



**Şekil 2.38.** Voltmetre cihazı

İkinci deneyde DC elektrik alanı ile desteklenmiş fitoremediasyon yöntemi uygulamasına başlanılmasından bir hafta sonra, bitkilerin genelinde (voltaj uygulamasına tabi olmayanlar dahil) kök gelişiminin olmaması ve çürümeler meydana gelmiştir (Şekil 2.39 ve Şekil 2.40). Soya fasulyesi bitkisi, aspir bitkisine nazaran biraz daha iyi gelişim göstermiştir.



**Şekil 2.39.** Voltaj uygulanmayan (sol) ve sabit kutuplu voltaj uygulanan aspir bitkisi



**Şekil 2.40.** Değişken kutuplu (sol) ve sabit kutuplu voltaj uygulanan soya fasulyesi bitkisi

Bu olumsuz durumun, toprağın killi yapısından dolayı meydana gelen sertleşme ve buna bağlı olarak zayıf bitki kök sistemini boğması veya zayıflatması, toprakta yeterli besin miktarının bulunmaması, sulamada deiyonize su kullanılması sebebiyle ihtiyacı olan besinleri alamaması gibi faktörlerin sonucu olduğu düşünülmüştür. Sıkışan toprağın ara ara havalandırılması ve mümkün olduğunca az ve bitkiyi strese sokmadan karıştırılması gerektiği, ihtiyacı olan besini alabilmesi için ise eşit miktarlarda gübre desteği verilmesi, saksıdaki toprak miktarının azaltılması gerektiği sonucuna varılmıştır.

#### 2.2.4. Üçüncü deney çalışmasının kurgulanması ve uygulanması

İkinci deney çalışmasında, DC elektrik alanı ile desteklenmiş fitoremediasyon yöntemi uygulamasına başlanılmasından kısa bir süre sonra bitkilerde görülen bozulmalar nedeniyle deney sonlandırılarak, üçüncü deneme çalışmalarına başlanılmıştır.

Tüm saksılardaki topraklar bir kaba alınıp karıştırılmış, önceki denemelerden 2 kg daha az miktarda olmak üzere, her bir saksıya yaklaşık 5 kg toprak konulmuştur. Toprak miktarının azaltılması, toprağın killi yapısının bir sonucu olarak sertleşip bitkinin kök ve sürgünlerine zarar vermesini engellemek amacıyla yapılmıştır.

Tohum ekimi ve çimlenme süreci yine ikinci denemedeki gibi laboratuvar ortamından uzakta, yarı açık ve rüzgar alabilen, ancak yağışlara karşı korunaklı bir mekanda gerçekleştirilmiştir. Çimlenme faaliyeti başladıktan ve bitkinin toprak üstü kısımları çıktıktan sonra bitkilere kompoze gübre desteği verilmiştir (Tablo 2.2).

**Tablo 2.2.** Kullanılan gübrenin içeriği

| GÜBRE İÇERİĞİ                                                  |     |
|----------------------------------------------------------------|-----|
| Toplam Azot (N)                                                | %12 |
| Amonyum Azotu                                                  | %10 |
| Üre Azotu                                                      | %2  |
| Suda Çözünür Fosforpentaoksit (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ) | %10 |
| Suda Çözünür Potasyumoksit (K <sub>2</sub> O)                  | %14 |

Kullanılan gübre Genta genel kullanım katı bitki besini olarak adlandırılmakta olup, irili ufaklı küçük sarı-kahverengi tanecikler halinde bir yapısı vardır (Şekil 2.41). Uygulama talimatında 1 avuç dozun 50 gram olduğu ve bu miktarın 1 m<sup>2</sup>'lik toprak alanı için uygun olduğu belirtilmiştir. Bu oran saksımıza uyarlanmış ve her bir saksı için eşit miktarlarda olacak şekilde hassas terazide tartılarak 2,5 gram gübre hazırlanmıştır. Bitkiler çimlenme evresini geçip toprak üstü yapıları geliştikten sonra, her bir saksı için ayrı ayrı deiyonize sulama suyuna karıştırılıp çözüldükten sonra, eşit miktarlarda verilmiştir.

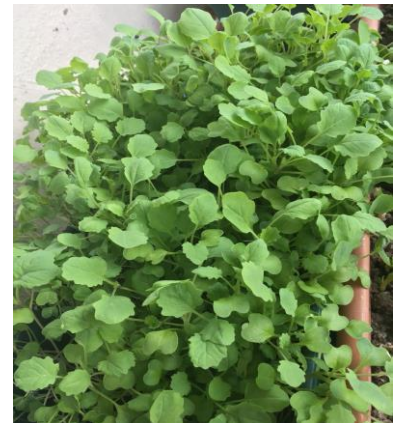


**Şekil 2.41.** Genel kullanım katı bitki besini (gübre), (sağ fotoğraf; gübrenin fiziksel formu)

#### 2.2.4.1. Üçüncü deney çalışması kapsamında kanola (*Brassica napus*) bitkisi

İkinci deney çalışması kapsamında, aspir bitkisi gelişiminin soya fasulyesi bitkisine kıyasla daha yavaş ve zayıf yapıda olmasından dolayı, aspir bitkisinin üçüncü denemede de tekrar başarısızlık yaşayabileceği ihtimali göz önüne alınarak, bu deneme çalışmasına kanola bitkisi de dahil edilmiştir. Kanola bitkisine voltaj uygulaması yapılmamış ve yalnızca doğal fitoremediasyon yeteneği değerlendirilmeye alınmıştır.

Kanola bitkisi tohum ekiminden sonra oldukça hızlı bir gelişim göstermiştir. Bir haftada toprak üstü yapıları gelişmiş ve 10 gün sonra yaklaşık 10 cm boya ulaşmıştır (Şekil 2. 42 ve Şekil 2.43). Yetiştirme ortamının sıcaklığına ve toprak durumuna bağlı olarak değişkenlik gösterse de, üç günde bir 500 ml sulama ihtiyacı vardır. Üç günlük düzenli peryotlar halinde deiyonize su ile sulaması gerçekleştirilmiştir.



**Şekil 2.42.** Kanola bitkisinin gelişim süreci (sol; tohum ekiminden bir hafta sonra, orta; tohum ekiminden on beş gün sonra, sağ; tohum ekiminden yirmi gün sonraki gelişim durumu)



**Şekil 2.43.** Kanola bitkisinin tohum ekiminden bir ay sonraki gelişimi

Kanola hızlı bir gelişim göstererek yeşil yapraklı durumunu iki buçuk ay boyunca muhafaza etmiştir. Tohumun ekim zamanından üç ay sonra yapraklarda sararmalar başlamış, büyüme ve gelişme evresi artık tamamen durmuştur (Şekil 2.44).



**Şekil 2.44.** Kanola bitkisinin üç ay sonraki gelişim durumu ve yapraklarındaki sararmalar

Gelişimini tamamlayan kanola bitkisi bulunduğu topraktan hasat edilerek, oda sıcaklığında kurumaya bırakılmıştır (Şekil 2.45).



**Şekil 2.45.** Kanola bitkisinin oda sıcaklığında kurumaya alınması

#### 2.2.4.2. Üçüncü deney çalışması kapsamında aspir (*Carthamus tinctorius*) bitkisi

İkinci denemenin yürütülmesi esnasında yeterli gelişimi gösteremeyen aspir bitkisi üçüncü denemede yeterli büyüme ve gelişimi sağlamıştır. Önceki denemeden farklı olarak, toprak haftada bir sulanmış ve azot ile fosfor içerikli gübre desteği sağlanmıştır. Toprak üstü yapısının oluşmasından sonra, 2,5 gram kompoze gübre deiyonize su içerisinde çözüldükten sonra, sulama suyu olarak verilerek besin takviyesinde bulunulmuştur. Sulamanın haftalık peryotlar halinde yapılması aspirin gelişimini olumlu yönde etkilemiştir (Şekil 2.46 ve Şekil 2.47). Toprak nemine bağlı olarak haftalık düzenli peryotlarla her saksıya ortalama 500 ml deiyonize su verilmiştir.



Şekil 2.46. Aspir bitkisinin gelişim durumu (tohum ekiminden iki hafta sonra)



Şekil 2.47. Aspir bitkisinin gelişim durumu (tohum ekiminden bir ay sonra)

Tohum ekiminden iki hafta sonra, yaklaşık olarak 8-10 cm boy yapmış olan aspir bitkileri DC voltaj uygulamasına tabi tutulmuştur. Sabit kutuplu voltaj uygulaması ve değişken kutuplu voltaj uygulaması, yine ikinci deney çalışmasında yürütüldüğü gibi sürdürülmüştür (Şekil 2.48). Fitoremediasyonu DC elektrik alanı ile destekleme uygulaması sürecinde voltmetre ile düzenli voltaj ölçümleri gerçekleştirilmiştir.



**Şekil 2.48.** Değişken kutuplu voltaj (sol) ve sabit kutuplu voltaj (sağ) uygulaması yapılan aspir bitkileri

İki buçuk ay sonra aspir bitkilerinin yapraklarında sararmalar ve solmalar başlamış, genel anlamda büyüme ve gelişme evresi sona ermiştir. Artık ömrünü tamamlayan bitkiler topraktan hasat edilerek oda sıcaklığında kurumaya bırakılmıştır (Şekil 2.49 ve Şekil 2.50).



**Şekil 2.49.** Gelişimlerini tamamlayan aspir bitkileri



**Şekil 2.50.** Gelişimlerini tamamlayarak oda sıcaklığında kurumaya alınan aspir bitkileri

#### **2.2.4.3. Üçüncü deney çalışması kapsamında soya fasulyesi (*Glycine max*) bitkisi**

Soya fasulyesi, tohum ekiminden yirmi gün sonra 8-15 cm boya ulaşmaktadır. Önceki denemeden farklı olarak, toprak üstü yapısının oluşmasından sonra 2,5 gram azot ve fosfor içerikli gübre, deiyonize su içerisinde çözüldükten sonra sulama suyu olarak verilerek besin takviyesinde bulunulmuştur. Sulama üç günlük periyotlar halinde gerçekleştirilmiştir. Yetiştirme ortamının sıcaklığına ve toprak durumuna bağlı olarak değişkenlik gösterse de üç günde bir ortalama 500 ml deiyonize su ile sulanmıştır.

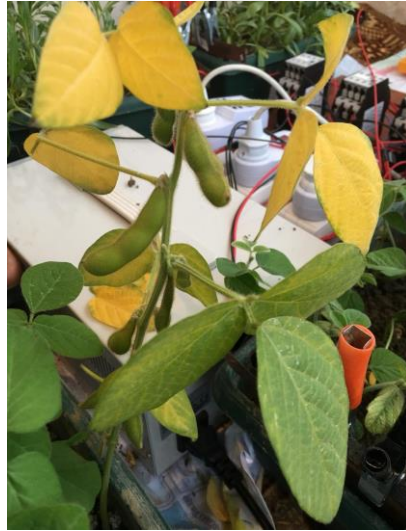


**Şekil 2.51.** Voltaj uygulanması yapılmayan soya fasulyesi bitkisinin gelişimi

Soya fasulyesi bitkilerinde sabit kutuplu voltaj uygulaması ve değişken kutuplu voltaj uygulaması, yine ikinci deney çalışmasında yürütüldüğü gibi sürdürülmüştür (şekil 2.52).



**şekil 2.52.** Sabit kutuplu voltaj uygulaması yürütülen soya fasulyesi bitkisinin gelişimi  
Bazı soya fasulyesi bitkileri diğerlerine nazaran daha erken olgunlaşma göstererek meyve vermiş ve yaprakları sararmıştır (şekil 2.53). Bu durum, tohumun kaliteli ve ortam şartlarının bitkinin isteklerine cevap veriyor nitelikte olması olarak düşünülmüştür.



**şekil 2.53.** Erken gelişim göstererek yaprakları sararan soya fasulyesi bitkisi

Gelişme periyodunu erkenden tamamlamış olan bitkilerin fasulyeleri toplanmış, ancak diğer fasulye ve bitkiler toplanmamış ve deney süreci devam ettirilmiştir (şekil 2.54).



**Şekil 2.54.** Gelişimini tamamlayan fasulyelerin toplanması

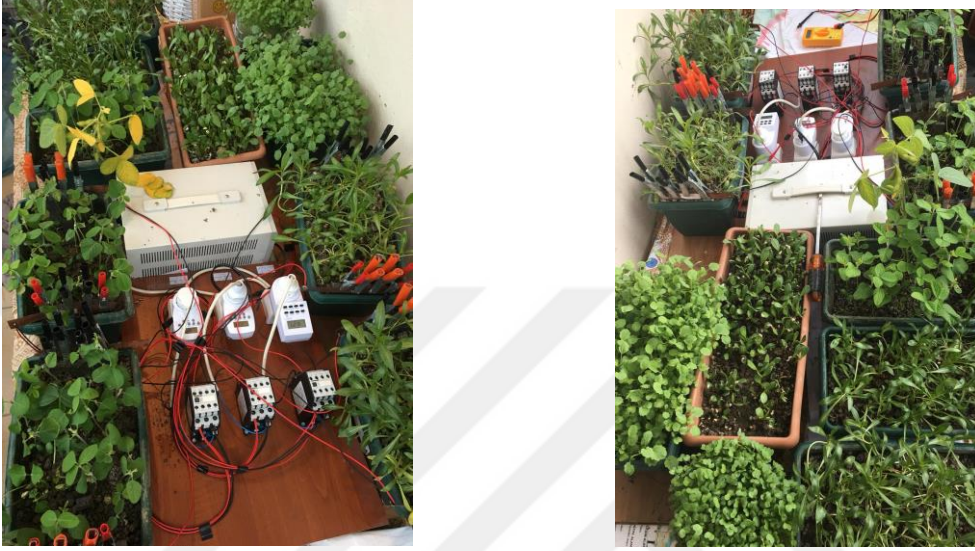
Bazıları erken gelişim gösterse de, genel olarak tohum ekiminden 3 (üç) ay sonra bitkilerin yapraklarında sararma, kahverengi oluşumlar ve solmalar başlamıştır. Üç ayın sonunda genel anlamda büyüme ve gelişme evresi sona ermiştir. Soya fasulyesinin DC elektik alanı ile fitoremediasyonu verimini destekleme uygulaması üç ay boyunca sürdürülmüştür. Artık ömrünü tamamlayan bitkiler topraktan hasat edilerek, oda sıcaklığında kurumaya bırakılmıştır (Şekil 2.55).



**Şekil 2.55.** Gelişimlerini tamamlayarak oda sıcaklığında kurumaya alınan soya fasulyesi bitkileri

Üçüncü deney çalışmasında bitkilerin gelişimi ve büyümesi başarıyla gerçekleşmiştir. Üçüncü deney aşamasının yürütülmesi kapsamında, voltaj uygulamasına tabi tutulmayan aspir ve soya fasulyesi, sabit kutuplu voltaj uygulaması yapılan aspir ve soya fasulyesi, değişken kutuplu voltaj uygulaması yapılan aspir ve soya fasulyesi, voltaj uygulamasına tabi tutulmayan iki adet kanola bitkisi olmak üzere 8 (sekiz) saksı kullanılmıştır. Bunlara ek olarak, iki adet yedek aspir bitkisi saksısı ve şahit numune saksısı olmak üzere,

deneyde toplam 11 (on bir) adet saksı yer almıştır (Şekil 2.56). Seçilen bitkilerde DC elektrik alanı ile fitoremediasyon verimini artırma uygulaması, çimlenme faaliyeti sonrası toprak üstü bitki yapısının gelişmesi sonrası başlatılmıştır. Voltaj uygulaması tüm bitkilerin yaşam ömrünü tamamlayıncaya kadar sürdürülmüştür. Bu deneyin yürütülmesi 3 (üç) aylık bir zaman dilimini kapsamıştır.

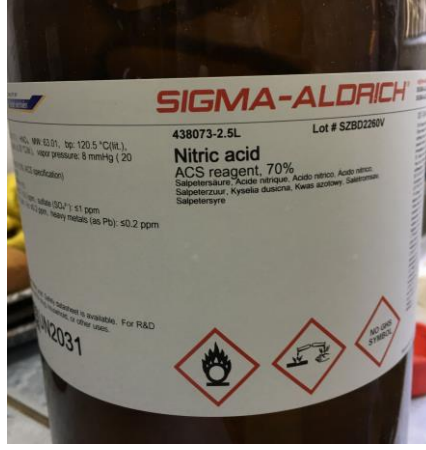


**Şekil 2.56.** DC elektrik alanı ile fitoremediasyonu destekleme deneyinin uygulanması süreci

Tüm bitkiler, gelişimlerini tamamladıktan sonra topraktan hasat edilerek oda sıcaklığında bir hafta ön kuruma işlemine tabi tutulmuşlardır. Bu işlem sonrası, bitkilerin yaprak, gövde ve kök kısımları ayrılmıştır. Ayırma işleminde herhangi bir kontamisyona izin verilmemesi amacıyla metal veya türevi bir malzeme kullanılmamıştır.

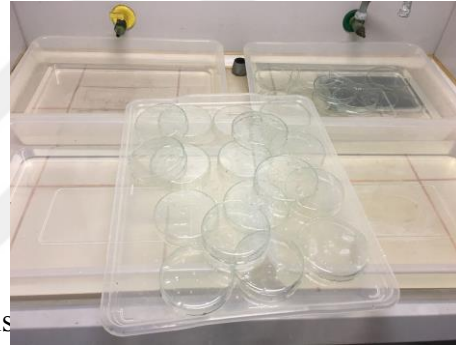
#### **2.2.4.4. Numune hazırlama kapsamında yapılan ön işlemler ve asitte temizleme**

Numune hazırlama ön işlemleri ve analiz sürecinde kullanılacak olan malzemelerin herhangi bir kirletici içermemesi için asit ile temizleme uygulaması yapılmıştır. Bu kapsamda, SIGMA-ALDRICH® %70'lik nitrik asit ( $\text{HNO}_3$ ) kullanılmıştır (Şekil 2.57). Nitrik asit deiyonize su ile seyreltilerek (%20  $\text{HNO}_3$  ve %80 deiyonize su) temizlik çözeltisi hazırlanmıştır.



**Şekil 2.57.** SIGMA – ALDRICH, %70’lik HNO<sub>3</sub>

Bu asit çözeltisi içinde mikrodalga destekli çözme işleminde kullanılacak olan teflon esaslı tüpler, tüp kapakları ve tıpaları ile numune hazırlamada kullanılacak olan polietilen şişeler 72 saat boyunca, cam petri kapları ise 48 saat boyunca bekletilmiştir. Asit çözelti içerisinde malzemeleri bekletme işlemi çeker ocak içerisinde gerçekleştirilmiştir (Şekil 2.58).



Bekletme süresi tamamlanan malzemeler deiyonize su ile durulanmış ve ardından etüvde kurumaya bırakılmıştır. Etüvde kuruyan malzemeler temiz naylon torbalara yerleştirilerek muhafaza edilmiştir.



**Şekil 2.59.** Etüv içerisinde kurumaya bırakılan malzemeler

#### 2.2.4.5. Mikrodalga destekli çözme yöntemi (microwave digestion) için numune hazırlama işlemleri

Oda sıcaklığında ön kurutma işlemi sonrası yaprak, gövde ve kökleri ayrılmış olan bitkilerin hassas terazide tartımları yapılmıştır. Tartım için Mettler Toledo® AG245 dijital terazi kullanılmıştır (Şekil 2.60).



Şekil 2.60. Mettler Toledo AG245 hassas terazi

Tablo 2.3. Oda sıcaklığında kurutulan bitkilerin net ağırlıkları

| No | Voltaj Uygulaması | Bitki Türü     | Bitki Organı | Net Ağırlık | Birim |
|----|-------------------|----------------|--------------|-------------|-------|
| 1  | Yok               | Aspir          | Yaprak       | 11,36       | gram  |
|    |                   |                | Gövde        | 3,71        | gram  |
|    |                   |                | Kök          | 1,75        | gram  |
| 2  | Yok               | Soya Fasulyesi | Yaprak       | 4,11        | gram  |
|    |                   |                | Gövde        | 4,07        | gram  |
|    |                   |                | Kök          | 2,00        | gram  |
|    |                   |                | Meyve        | 3,48        | gram  |
| 3  | Sabit Kutup       | Aspir          | Yaprak       | 2,23        | gram  |
|    |                   |                | Gövde        | 1,27        | gram  |
|    |                   |                | Kök          | 0,22        | gram  |
| 4  | Sabit Kutup       | Soya Fasulyesi | Yaprak       | 2,50        | gram  |
|    |                   |                | Gövde        | 2,12        | gram  |
|    |                   |                | Kök          | 1,31        | gram  |
| 5  | Değişken Kutup    | Aspir          | Yaprak       | 2,43        | gram  |
|    |                   |                | Gövde        | 1,62        | gram  |
|    |                   |                | Kök          | 0,42        | gram  |
| 6  | Değişken Kutup    | Soya Fasulyesi | Yaprak       | 1,71        | gram  |
|    |                   |                | Gövde        | 1,67        | gram  |
|    |                   |                | Kök          | 0,82        | gram  |
| 7  | Yok               | Kanola         | Yaprak       | 9,92        | gram  |
|    |                   |                | Gövde        | 4,82        | gram  |
|    |                   |                | Kök          | 7,12        | gram  |

Bitkilerin tartımı yapılan yaprak, kök ve gövdeleri temiz petri kaplarına alınmış ve etiketlenmesi yapılmıştır. Ardından, yüzeylerine yapışmış olabilecek toprak ve tozların temizlenmesi için deiyonize su ile nazıkçe yıkanmışlardır. Yıkama esnasında temiz plastik bir elek kullanılmıştır (Şekil 2.61).



**Şekil 2.61.** Bitkilerin deiyonize su ile yıkanması işlemi

Yıkama sonrasında bitkiler etiketli cam petri kaplarına alınmışlardır (Şekil 2.62).



**Şekil 2.62.** Yıkama sonrası bitkilerin etiketli cam petri kaplarına alınması

Ardından, bitkiler petri kapları ile Thermo Electron Corporation® marka, Heraeus model etüvde kurumaya bırakılmıştır. İlk olarak 40 °C’de kurumaya alınmıştır. Ancak, bu sıcaklığın yetersiz olduğu ve bitkilerde tam kuruma gerçekleşmediği görülerek, sıcaklık 80 °C’ye çıkarılmış ve 48 saat boyunca kurutulmuştur (Şekil 2.63).



**Şekil 2.63.** Deiyonize su ile yıkanmış bitkilerin etüvde kurutulması

Yıkama sonrası bitki yüzeylerinden uzaklaştırılan toprak ve tozlar ile kurutma sonrası giderilen nem sebebiyle, bitkilerin yaprak, gövde ve kök biyokütle kuru ağırlıkları dijital hassas terazide tartılmıştır (Şekil 2.64, Tablo 2.4).



**Şekil 2.64.** Yıkanmış ve etüvde kurutulmuş bitkilerin biyokütle kuru ağırlıklarının tartımı

**Tablo 2.4.** 80 °C’de 48 saat kurutulmuş bitki numunelerinin biyokütle kuru ağırlıkları

| No | Voltaj Uygulaması | Bitki Türü     | Kod | Bitki Organı | Net Ağırlık | Birim |
|----|-------------------|----------------|-----|--------------|-------------|-------|
| 1  | Yok               | Aspir          | 1 A | Yaprak       | 3,47        | gram  |
|    |                   |                | 1 B | Gövde        | 2,60        | gram  |
|    |                   |                | 1 C | Kök          | 1,03        | gram  |
| 2  | Yok               | Soya Fasulyesi | 2 A | Yaprak       | 2,99        | gram  |
|    |                   |                | 2 B | Gövde        | 4,39        | gram  |
|    |                   |                | 2 C | Kök          | 1,21        | gram  |
|    |                   |                | 2 D | Tohum+Kabuk  | 3,70        | gram  |
| 3  | Sabit Kutup       | Aspir          | 3 A | Yaprak       | 1,50        | gram  |
|    |                   |                | 3 B | Gövde        | 1,37        | gram  |
|    |                   |                | 3 C | Kök          | 0,37        | gram  |
| 4  | Sabit Kutup       | Soya Fasulyesi | 4 A | Yaprak       | 2,44        | gram  |
|    |                   |                | 4 B | Gövde        | 2,08        | gram  |
|    |                   |                | 4 C | Kök          | 1,14        | gram  |
| 5  | Değişken Kutup    | Aspir          | 5 A | Yaprak       | 1,49        | gram  |
|    |                   |                | 5 B | Gövde        | 0,78        | gram  |
|    |                   |                | 5 C | Kök          | 0,61        | gram  |
| 6  | Değişken Kutup    | Soya Fasulyesi | 6 A | Yaprak       | 2,10        | gram  |
|    |                   |                | 6 B | Gövde        | 1,64        | gram  |
|    |                   |                | 6 C | Kök          | 0,71        | gram  |
| 7  | Yok               | Kanola         | 7 A | Yaprak       | 6,17        | gram  |
|    |                   |                | 7 B | Gövde        | 3,42        | gram  |
|    |                   |                | 7 C | Kök          | 2,16        | gram  |

Etüvde kurutulup tartımı yapılan bitki numuneleri, akik havan ve tokmak kullanılarak mekanik olarak öğütülmüştür. Öğütme sonrasında numunelerin ortamdan nem çekmesi kütlelerinde bir miktar artışa yol açmış olmakla birlikte, bu değişim belirsizlik limitleri içerisinde değerlendirilmiştir. Numuneler, öğütme işleminden sonra asit çözeltisinde temizlenmiş olan plastik petri kaplara aktarılmıştır. Her bir petri kabı üzerinde bitki kodu, adı ve kısmı etiket ile belirtilmiştir (Şekil 2.65).



**Şekil 2.65.** Bitki numunelerinin akik havanda öğütülmesi

Öğütüldükten sonra plastik petri kaplara alınan bitki numuneleri, öğütme aşamasındaki fireler göz önüne alarak, tekrar bir tartım işlemine tabi tutulmuşlardır. Bu aşamada, mikrodalga destekli çözme işleminde kullanılacak 500 mg miktarındaki numuneler 1 µg hassasiyete sahip Mettler Toledo® marka, MX5 model hassas dijital terazide tartılmışlardır (Şekil 2.66). Tartılan numuneler mikrodalga çözme tüplerine aktarılmışlardır.



**Şekil 2.66.** Bitki numunelerinden 500 mg tartım işlemi

Her bir bitkinin öğütülmüş yaprak, gövde ve kök numuneleri, herhangi bir işleme tabi tutulmamış orijinal tarla toprağı, bünyesinde bitki yetiştirilmiş 7 adet saksı toprağı ve şahit saksı toprağı numunelerinin her birinden, yaklaşık olarak 500 mg tartılmış ve mikrodalga çözme işleminin yapılacağı tüplere aktarılmıştır. Numune miktarlarının hassas tartım sonuçları kaydedilmiştir (Tablo 2.5 ve Tablo 2.6). Bitki kısımlarından 3C, 5C ve 6C koduna sahip numunelerin miktarlarındaki yetersizlik nedeniyle 500 mg elde edilememiş olup, mevcut tüm numuneler tartılarak çözme tüplerine aktarılmışlardır.

**Tablo 2.5.** Öğütülmüş bitki numunelerinin mikrodalga çözme işlemi için tartımı

| No | Voltaj Uygulaması | Bitki Türü     | Kod | Bitki Organı | Kuru Ağırlık | Birim |
|----|-------------------|----------------|-----|--------------|--------------|-------|
| 1  | Yok               | Aspir          | 1 A | Yaprak       | 500.580      | mg    |
|    |                   |                | 1 B | Gövde        | 500.570      | mg    |
|    |                   |                | 1 C | Kök          | 500.870      | mg    |
| 2  | Yok               | Soya Fasulyesi | 2 A | Yaprak       | 500.270      | mg    |
|    |                   |                | 2 B | Gövde        | 500.740      | mg    |
|    |                   |                | 2 C | Kök          | 500.780      | mg    |
|    |                   |                | 2 D | Tohum        | 500.860      | mg    |
|    |                   |                | 2 E | Tohum Kabuğu | 500.815      | mg    |
| 3  | Sabit Kutup       | Aspir          | 3 A | Yaprak       | 500.310      | mg    |
|    |                   |                | 3 B | Gövde        | 500.750      | mg    |
|    |                   |                | 3 C | Kök          | 131.100      | mg    |
| 4  | Sabit Kutup       | Soya Fasulyesi | 4 A | Yaprak       | 500.600      | mg    |
|    |                   |                | 4 B | Gövde        | 500.300      | mg    |
|    |                   |                | 4 C | Kök          | 500.380      | mg    |
| 5  | Değişken Kutup    | Aspir          | 5 A | Yaprak       | 500.520      | mg    |
|    |                   |                | 5 B | Gövde        | 500.510      | mg    |
|    |                   |                | 5 C | Kök          | 84.845       | mg    |
| 6  | Değişken Kutup    | Soya Fasulyesi | 6 A | Yaprak       | 500.720      | mg    |
|    |                   |                | 6 B | Gövde        | 500.650      | mg    |
|    |                   |                | 6 C | Kök          | 274.880      | mg    |
| 7  | Yok               | Kanola         | 7 A | Yaprak       | 500.250      | mg    |
|    |                   |                | 7 B | Gövde        | 500.580      | mg    |
|    |                   |                | 7 C | Kök          | 500.650      | mg    |

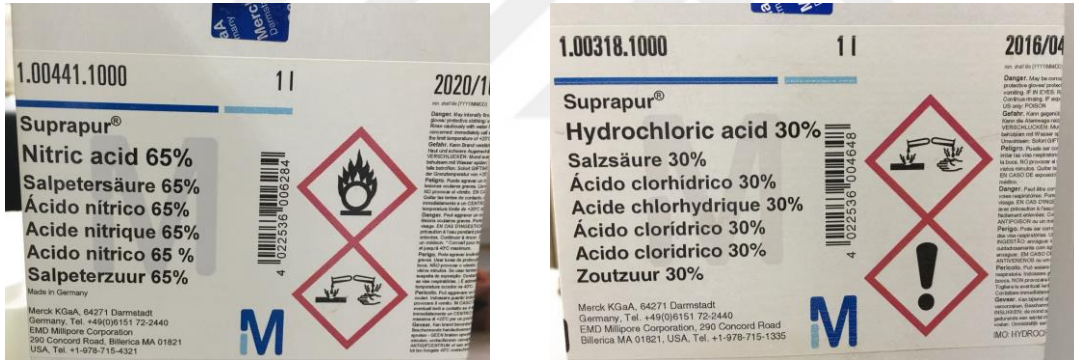
**Tablo 2.6.** Toprak numunelerinin mikrodalga çözme işlemi için tartımı

| No | Kod | Voltaj Uygulaması | Toprakta Yetiştirilen Bitki Türü | Kuru Ağırlık | Birim |
|----|-----|-------------------|----------------------------------|--------------|-------|
| 1  | T 0 | Yok               | Orijinal Tarla Toprağı           | 500.323      | mg    |
| 2  | T 1 | Yok               | Aspir                            | 500.860      | mg    |
| 3  | T 2 | Yok               | Soya Fasulyesi                   | 500.338      | mg    |
| 4  | T 3 | Sabit Kutup       | Aspir                            | 500.300      | mg    |
| 5  | T 4 | Sabit Kutup       | Soya Fasulyesi                   | 500.550      | mg    |
| 6  | T 5 | Değişken Kutup    | Aspir                            | 500.310      | mg    |
| 7  | T 6 | Değişken Kutup    | Soya Fasulyesi                   | 500.680      | mg    |
| 8  | T 7 | Şahit Numune      | Şahit Saksı Toprağı              | 500.850      | mg    |
| 9  | T 8 | Sabit Kutup       | Kanola                           | 500.150      | mg    |

Tartımı yapılan tüm numuneler, mikrodalga destekli çözme işleminin yapılacağı, asitte temizlenmiş ve kodlanmış teflon basınç tüplerine aktarılmıştır (Şekil 2.67). İlk olarak her bir tüpün içerisine, otomatik pipet yardımıyla 9 ml Merck® Suprapur® % 65 nitrik asit ( $\text{HNO}_3$ ) ilave edilmiştir. Ardından, her bir tüpün içerisine 3 ml Merck® Suprapur® % 30 hidroklorik asit ( $\text{HCl}$ ) ilave edilmiştir.



Şekil 2.67. Numunelere asit ilavesi



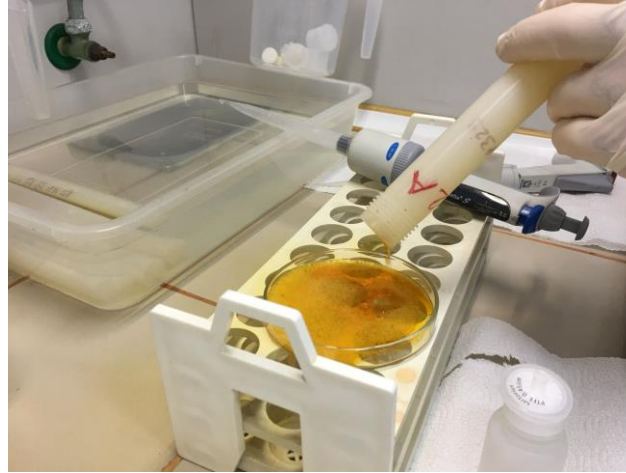
Şekil 2.68. Çözme işleminde kullanılan hidroklorik asit ve nitrik asit

Numunelere asit ilave edildikten sonra, tüpler mikrodalga cihazı içine yerleştirilmiştir (Şekil 2.69). Tüplerin yerleşiminin simetrik ve dengede olmasına dikkat edilmiştir. Asit ile çözme işleminden gelebilecek katkıyı belirlemek üzere kimyasal körü kullanılmıştır.



**Şekil 2.69.** Mikrodalga cihazının haznesi ve yerleştirilmeye başlanan tüpler

Mikrodalgada destekli çözme işleminde, CEM Mars<sup>®</sup>, Marsxpress model cihaz kullanılmıştır. . Cihaz, numuneler 4,5 dakikada 175 °C sıcaklığa ulaşacak ve 1 dakika boyunca bu sıcaklıkta kaldıktan sonra soğuma işlemine geçecek şekilde, toplam çalışma süresi 5,5 dakika olarak programlanmıştır. Yaklaşık 1 saat sonra tamamen soğuyan tüpler çıkarılarak, kapak ve tıparları çeker ocak içinde açılmışlardır. Bu esnada asit-bitki karışımının turuncu/sarı renkte gaz çıkışı gözlenmiştir. Her bir tüpteki sıvı numune, önce asitte temizlenmiş bir cam petri kabına boşaltılmıştır (Şekil 2.70).



**Şekil 2.70.** Mikrodalga cihazında asit yardımı ile çözünen numune

Petri kabına aktarılan numune, 10 ml'lik bir steril şırınga ile petri kabından çekilmiştir. Şırınganın ucuna takılan Sartorius<sup>®</sup> PTFE 0,45 µm filtre ile numunenin

polietilen şişeye süzme işlemi gerçekleştirilmiştir. Böylece çözünemeyen partiküller ayrıştırılmıştır.



**Şekil 2.71.** Çözünmüş numunenin filtreden geçirilmesi

Ardından, tüp içerisine otomatik pipet yardımıyla 8 ml deiyonize su ilave edilip çalkalanmış ve tekrar aynı petri kabına boşaltılmıştır (Şekil 2.72). Tekrar aynı şırınga ile çekilip aynı filtreden geçirilerek aynı şişeye aktarılmıştır. Son olarak şişeye otomatik pipet kullanılarak 5 ml deiyonize su ilave edilip, toplamda 25 ml sıvı numune elde edilmiştir.

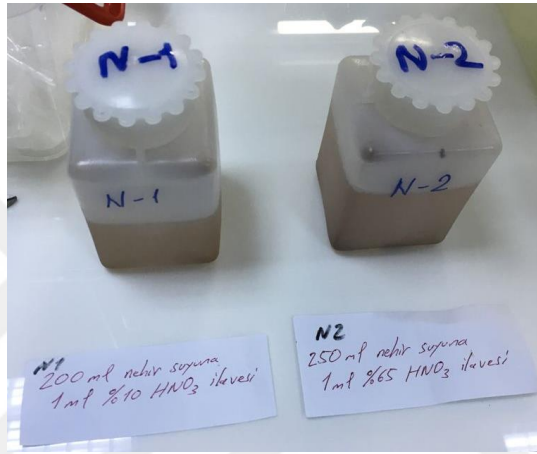


**Şekil 2.72.** Tüp cidarlarındaki kalıntıların deiyonize su ile çalkalanarak geri kazanımı

Ergene Nehri'nden temiz polietilen şişelere alınan nehir suyu numuneleri, laboratuvardaki bir buzdolabında +4 °C sıcaklıkta bir sene boyunca bekletilmiştir. Numune alımından hemen sonra asit ilavesi yapılmadığından, suda çözünebilir bazı elementlerin şişe cidarlarına adsorpsiyon yoluyla kaybı mümkün olabilmektedir.

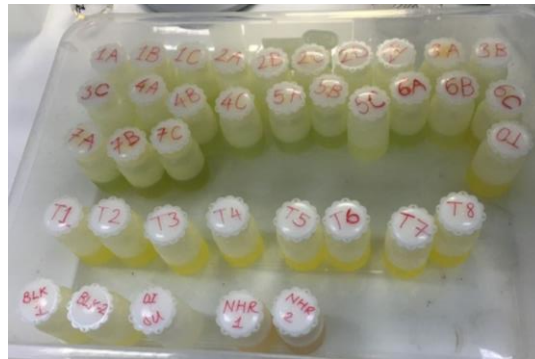
İki adet şişede yer alan nehir suyu numuneleri N-1 ve N-2 olarak kodlanmıştır (Şekil 2.73).

N-1 numunesine 200 ml nehir suyu için %10'luk 1 ml  $\text{HNO}_3$  ilave edilmiş, N-2 numunesine ise 250 ml nehir suyuna ise %65'lik 1 ml  $\text{HNO}_3$  ilave edilmiştir. ICP-MS analizi öncesi, nehir suyu numuneleri mikrodalga destekli çözme işlemine tabi tutulmamış, yalnızca 0,45  $\mu\text{m}$  PTFE filtreden süzölmüşlerdir. Bunların dışında, NHR-1 ve NHR-2 olarak kodlanan iki nehir suyu numunesi, mikrodalga destekli çözme işleminden sonra analiz edilmişlerdir.



**Şekil 2.73.** Nehir suyu numuneleri

Bu çalışmada yer alan tüm numuneler, 25 ml sıvı formda ICP-MS analizine hazır hale getirilmişlerdir. Bu kapsamda, bitkilerin yaprak, gövde ve kök numuneleri, bunların yetiştirildikleri toprak numuneleri, şahit toprak numunesi, orijinal toprak numunesi, nehir suyu numuneleri, 2 adet kimyasal kör numune ve deiyonize su numunesi olmak üzere, toplamda 37 adet numune hazırlanmıştır.



**Şekil 2.74.** ICP-MS analizi uygulanmasına hazır hale getirilen numuneler

ICP-MS analizinde kullanılan cihaz Perkin Elmer<sup>®</sup> ICP Mass Spectrometer 300 X olup, yapılan analizde 24 adet element taranarak ölçülmüştür.



Şekil 2.75. Perkin Elmer<sup>®</sup> ICP Mass Spectrometer 300 X

### 3. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

#### 3.1. Alınan Ergene Havzası Tarım Toprağı Numunesinin Kimyasal Yapısı ve Fiziksel Karakteristiği

Ergene Havzası içinde seçilmiş olan tarım toprağı numunenin kimyasal yapısı ve fiziksel karakteristiği belirlenmiştir. Yapılan analizler doğrultusunda, toprağın killi bünyeli, hafif alkali, tuzsuz ve az kireçli (%1,43) olduğu saptanmıştır. Kimyasal yapısında ise yarıyıllı Fosforun (21,01 kg/da) ve yarıyıllı Potasyumun (64,59 kg/da) çok yüksek seviyede olduğu belirlenmiştir (Tablo 3.1).

**Tablo 3.1:** Alınan Ergene Havzası tarım toprağı numunesinin kimyasal yapısı ve fiziksel karakteristiğı

| PARAMETRELER              | ÖLÇÜ BİRİMİ     | ANALİZ SONUCU | DEĞERLENDİRME       | KULLANILAN ANALİZ          |
|---------------------------|-----------------|---------------|---------------------|----------------------------|
| <b>Su İle Doygunluk</b>   | %               | 73            | Killi Bünyeli       | TS 8333 :1990              |
| <b>Kum Oranı</b>          | %               | 32            |                     | Bouyocus Hidrometre Metodu |
| <b>Toz Oranı</b>          | %               | 26            |                     |                            |
| <b>Kil Oranı</b>          | %               | 42            |                     |                            |
| <b>Toprak Türü</b>        |                 | C             |                     |                            |
| <b>pH</b>                 | °C/Ph           | 7,64          | Hafif Alkali        | Saturasyon Çamuru          |
| <b>EC / % Tuz</b>         | °C µmhos/cm / % | 1375/0,064    | Tuzsuz              | TS 8334                    |
| <b>Kireç İçeriğı</b>      | %               | 3,03          | Az Kireçli          | TS 8335 ISO 10693:1996     |
| <b>Organik Madde</b>      | %               | 1,43          | Az Seviyede         | TS 8336:1990               |
| <b>Yarayışlı Fosfor</b>   | kg/da           | 21,01         | Çok Yüksek Seviyede | TS 8340 :1990              |
| <b>Yarayışlı Potasyum</b> | kg/da           | 64,59         | Çok Yüksek Seviyede | TS 8341:1990               |
| <b>Toplam Azot</b>        | %               | 0,10          | İyi Seviyede        | Kjeldahl Metodu            |

Sungur (2013) yaptığı çalışma kapsamında Ergene Havzası'ndan aldığı toprak numunelerinin fiziksel karakteristiğini ve kimyasal yapısını incelemiştir. Buna göre pH analizinde Egene Havzası toprağından aldığı numunelerin %35'inin (14 adet) hafif asit (5,5-6,5), %32,5'inin hafif alkali (7,5-8,5) ve %25'nin ise nötr (6,5-7,5) olduğunu saptamıştır. Ayrıca, numunelerin büyük bir oranının (%80) kireç içeriklerinin az seviyede olduğunu (ortalama %3,1) belirtmiştir. Kum oranını %54,2, organik madde miktarını ise %2,2 olarak olarak saptamıştır. Mevcut çalışmada kullanılan toprağın analiz değerlerinin, yukarıda ifade edilen çalışmada elde edilmiş olan aralıklarda yer aldığı görülmektedir.

Kirlilik içermeyen tarım topraklarında Cr elementinin limit değeri 30 ppm olup, bu miktar killi topraklarda kumlu topraklara oranla daha yüksek olabilmektedir (Pais ve Jones, 2000). Bu çalışma kapsamında kullanılan tarım toprağında Cr elementi konsantrasyonu 143 ppm ( $\pm 18.792$ ) olarak ölçülmüş olup, normal limit değerin çok üzerindedir.

Kirlilik içermeyen yüksek killi tarım topraklarında Co elementinin limit değeri 20 ppm (Pais ve Jones, 2000) olup, bu çalışma kapsamında kullanılan tarım toprağında Co elementi konsantrasyonu 15,6 ppm ( $\pm 1,59$ ) olarak ölçülmüş olup, normal sınırlardadır.

Kirlilik içermeyen tarım topraklarında Cu elementinin limit değeri 15-25 ppm aralığında (Pais ve Jones, 2000) olup, bu çalışma kapsamında kullanılan tarım toprağında Cu elementi konsantrasyonu 26,9 ppm ( $\pm 1,59$ ) olarak ölçülmüş olup, sınır değerdedir.

Kirlilik içermeyen tarım topraklarında Mn elementinin limit değeri 500-800 ppm aralığında (Pais ve Jones, 2000) olup, bu çalışma kapsamında kullanılan tarım toprağında Mn elementi konsantrasyonu 876 ppm ( $\pm 92$ ) olarak ölçülmüş olup, sınır değerdedir.

Kirlilik içermeyen killi tarım topraklarında Ni elementi için limit değer 40 ppm'dir (Pais ve Jones, 2000) olup, bu çalışma kapsamında kullanılan tarım toprağında Ni elementi konsantrasyonu 64,5 ppm ( $\pm 9,5$ ) olarak ölçülmüş olup, sınır değerin üzerindedir.

Genellikle tarım yapılan topraklarda Zn elementi 10-300 ppm konsantrasyon aralığında olup, büyük çoğunlukla 50 ppm civarındadır (Alloway, 1993) olup, bu çalışma kapsamında kullanılan tarım toprağında Zn elementi konsantrasyonu 72,5 ppm ( $\pm 5,7$ ) olarak ölçülmüştür.

**Tablo 3.2:** ICP-MS ile Ergene Havzası tarım toprağı numunesinin element içerikleri

|    | <b>Elementler<br/>(ppm)</b> | <b>T0<br/>(Orişinal Toprak)</b> | <b>± T0<br/>(Belirsizlik)</b> |
|----|-----------------------------|---------------------------------|-------------------------------|
| 1  | <b>Ag</b>                   | 0,134                           | 0,029                         |
| 2  | <b>Al</b>                   | 45430,864                       | 3407,315                      |
| 3  | <b>As</b>                   | 7,506                           | 1,013                         |
| 4  | <b>B</b>                    | 21,125                          | 1,521                         |
| 5  | <b>Ba</b>                   | 213,775                         | 17,743                        |
| 6  | <b>Be</b>                   | 1,735                           |                               |
| 7  | <b>Cd</b>                   | 0,150                           | 0,014                         |
| 8  | <b>Co</b>                   | 15,603                          | 1,591                         |
| 9  | <b>Cr</b>                   | 143,452                         | 18,792                        |
| 10 | <b>Cu</b>                   | 26,862                          | 1,585                         |
| 11 | <b>Fe</b>                   | 30785,010                       | 2278,091                      |
| 12 | <b>Li</b>                   | 31,651                          | 4,684                         |
| 13 | <b>Mn</b>                   | 875,970                         | 91,977                        |
| 14 | <b>Mo</b>                   | 0,521                           | 0,040                         |
| 15 | <b>Na</b>                   | 1277,748                        | 158,441                       |
| 16 | <b>Ni</b>                   | 64,555                          | 9,490                         |
| 17 | <b>Pb</b>                   | 22,580                          | 2,980                         |
| 18 | <b>Sb</b>                   | 10,192                          | 0,397                         |
| 19 | <b>Se</b>                   | 0,718                           | 0,098                         |
| 20 | <b>Si</b>                   | 69,987                          | 3,219                         |
| 21 | <b>Sn</b>                   | 2,666                           | 0,120                         |
| 22 | <b>Ti</b>                   | 630,918                         | 34,070                        |
| 23 | <b>V</b>                    | 67,984                          | 6,866                         |
| 24 | <b>Zn</b>                   | 72,490                          | 5,727                         |

### 3.2. Ergene Nehri’nden Alınan Su Numunesinin Element Konsantrasyonu

ICP-MS analizi ile Ergene Nehri’nden alınan su numunesinin içerdiği element konsantrasyonları belirlenmiştir (Tablo 3.3).

**Tablo 3.3:** Ergene Nehri’nden alınan su numunesinin element içerikleri

| ELEMENLER<br>(ppb) | NHR – 1* | NHR – 2* | N – 1** | N – 2*** |
|--------------------|----------|----------|---------|----------|
| Ag                 | 0,071    | 0,019    | 0,056   | 0,061    |
| Al                 | 2933     | 637      | 3106    | 5159     |
| As                 | 13,35    | 12,06    | 12,37   | 12,85    |
| B                  | 750      | 769      | 773     | 776      |
| Ba                 | 134      | 98       | 137     | 169      |
| Be                 | 0,234    | 0,076    | 0,250   | 0,297    |
| Cd                 | 0,104    | 0,097    | 0,130   | 0,165    |
| Co                 | 1,782    | 1,470    | 2,135   | 2,698    |
| Cr                 | 33,97    | 24,09    | 34,85   | 61,11    |
| Cu                 | 42,72    | 54,20    | 42,81   | 54,16    |
| Fe                 | 239      | 245      | 226     | 1709     |
| Li                 | 26,47    | 26,61    | 26,83   | 28,93    |
| Mn                 | 383      | 131      | 404     | 364      |
| Mo                 | 2,759    | 2,748    | 2,311   | 2,248    |
| Na                 | 947236   | 943822   | 1123940 | 1045666  |
| Ni                 | 26,71    | 18,62    | 30,17   | 34,47    |
| Pb                 | 2,332    | 1,328    | 2,860   | 5,654    |
| Sb                 | 31,12    | 30,36    | 29,53   | 26,96    |
| Se                 | 2,296    | 1,604    | 0,505   | 1,814    |
| Si                 | 14612    | 11030    | 15877   | 16937    |
| Sn                 | 3,391    | 2,842    | 1,850   | 7,710    |
| Ti                 | 6,309    | 5,181    | 5,405   | 25,61    |
| V                  | 15,12    | 14,09    | 13,73   | 20,55    |
| Zn                 | 136,6    | 65,4     | 139,3   | 135,9    |

\*Mikrodalga destekli çözme işlemine tabi tutulan nehir suyu numuneleri

\*\*200 ml nehir suyuna 1 ml % 10’luk HNO<sub>3</sub> ilave edilip, filtrelenen nehir suyu

\*\*\*250 ml nehir suyuna 1 ml % 65’lik HNO<sub>3</sub> ilave edilip, filtrelenen nehir suyu

Günhan (2019) yaptığı bir çalışmada, Ergene Nehri suyunun pH değerini ortalama 7,82 olarak belirlemiştir. Saptanan bu pH değeri, “Kıtaçi Yerüstü Su Kaynaklarının Genel Kimyasal ve Fizikokimyasal Parametreler Açısından Sınıflarına Göre Kalite Kriterleri” sınıflamasına göre, 3. Sınıf Kirlenmiş Su olduğunu ortaya koymaktadır. Aynı sınıflamaya göre, Al elementinin konsantrasyonunun 1 mg/L (1000 ppb)’den fazla olması durumunda 4. Sınıf Çok Kirlenmiş Su olarak değerlendirilmektedir. Bu çalışma kapsamında analiz edilen nehir sularının Al konsantrasyonu 1 mg/L’den yüksek olduğu için, analiz edilen Ergene Nehri su numuneleri 4. Sınıf Çok Kirlenmiş Su niteliğindedir. Yukarıda ifade edilen çalışmada, Ergene Nehri suyunun Na konsantrasyonu ortalama 710 mg/L olarak belirlenmiştir. Bu çalışma kapsamında analiz edilen nehir suyunun Na konsantrasyonu (yaklaşık 950 mg/L) olarak bulunmuştur.

Tokatlı ve Varol (2021) yaptıkları çalışmada, COVID-19 karantinasının Meriç-Ergene Nehri Havzası yüzey suyunun kalitesine etkisini araştırmışlardır. Bu araştırma kapsamında, pandemi sürecinde karantina öncesinde Ergene Nehri suyunun pH değeri ortalama olarak 8.96 iken, karantina sürecinde 8.32 seviyesinde olduğunu belirlemişlerdir. As, Cd, Cr, Cu, Ni ve Zn elementlerinin karantina öncesi 3.51 µg/L, 0.046 µg/L, 13.76 µg/L, 4.3 µg/L, 9.06 µg/L ve 8.18 µg/L olan ortalama konsantrasyonlarının, karantina sonrasında sırasıyla 1.40 µg/L, 0.021 µg/L, 0.83 µg/L, 0.71 µg/L, 0.97 µg/L ve 1.29 µg/L değerlerine düştüklerini belirlemişlerdir. Mn elementinin ise bu elementlerden farklı olarak, karantina öncesi ortalama 26,3 µg/L değerinden, 28,01 µg/L değerine yükseldiğini saptamışlardır. Karantina öncesinde verilen değerler ile bu araştırma kapsamında ölçülen değerler karşılaştırıldığında, bu çalışmada ölçülen değerlerin çok daha yüksek olduğu görülmektedir.

### **3.3. Ölçüm Sonuçlarının Değerlendirilmesi**

Bitkilerin yaprak, gövde ve kök kısımları için yapılan element ölçüm sonuçları, literatürde bu kapsamdaki çalışmalarda kullanılmakta olan üç farklı performans faktörü üzerinden değerlendirilmiştir. Bu performans faktörleri Translokasyon Faktörü (TF), Biyoyoğunlaşma Faktörü (BCF) ve Zenginleşme Katsayısı ( $EC_f$ ) olarak adlandırılmaktadırlar. Bunun yanında bitkinin bünyesindeki toplam element miktarının topraktaki toplam element miktarına oranı da, sonuçların değerlendirilmesinde ele alınan bir parametre olmuştur.

### 3.3.1 Translokasyon faktörü

Bir bitki için Translokasyon Faktörü (TF), gövde ve yapraklardaki ortalama kirletici konsantrasyonunun köklerdeki oranı olup, bitkinin kirleticileri köklerinden toprak üstü kısımlarına aktarma yeteneğinin bir göstergesidir (Madanan ve ark., 2020). Eğer  $TF > 1$  ise bitki bir biriktirici,  $TF < 1$  ise bitki bir dışlayıcıdır.

$$TF = \frac{\text{(Bitkinin toprak üstü kısımlarındaki ortalama kirletici konsantrasyonu)}}{\text{Bitkinin toprak altı kısımlarındaki ortalama kirletici konsantrasyonu}}$$

Her bitkinin yaprak, gövde ve köklerine ait olan element konsantrasyon değerlerinin belirsizlikleri, kullanılan analitik teknik ve cihaz için verilen % değerlerden hesaplanmıştır. Ölçüm sonuçlarının hesaplamalarda kullanımında, her bir element konsantrasyonuna ait % belirsizlik değerleri de uygun formüllerle hesaplamalara dahil edilmiştir. Translokasyon Faktörü hesabında, gövde ve yapraklardaki ortalama kirletici konsantrasyonunun köklerdeki oranı belirlenmiştir. Bu oranın sayısal değerinin belirsizliğini hesaplamak için aşağıda verilen matematiksel formüller kullanılmıştır.

$$\Delta A = \frac{1}{2} * (ykbo + gkbo)$$

$$\Delta f = \frac{1}{kkk} * \Delta A + \frac{\frac{ykk + gkbo}{2}}{(kkk)^2 * kkbo}$$

*ykbo*: yapraktaki elementin belirsizliği

*gkbo*: gövdedeki elementin belirsizliği

*kkk*: kökteki elementin konsantrasyonu

*ykk*: yapraktaki elementin konsantrasyonu

*kkbo*: kökteki elementin belirsizliği

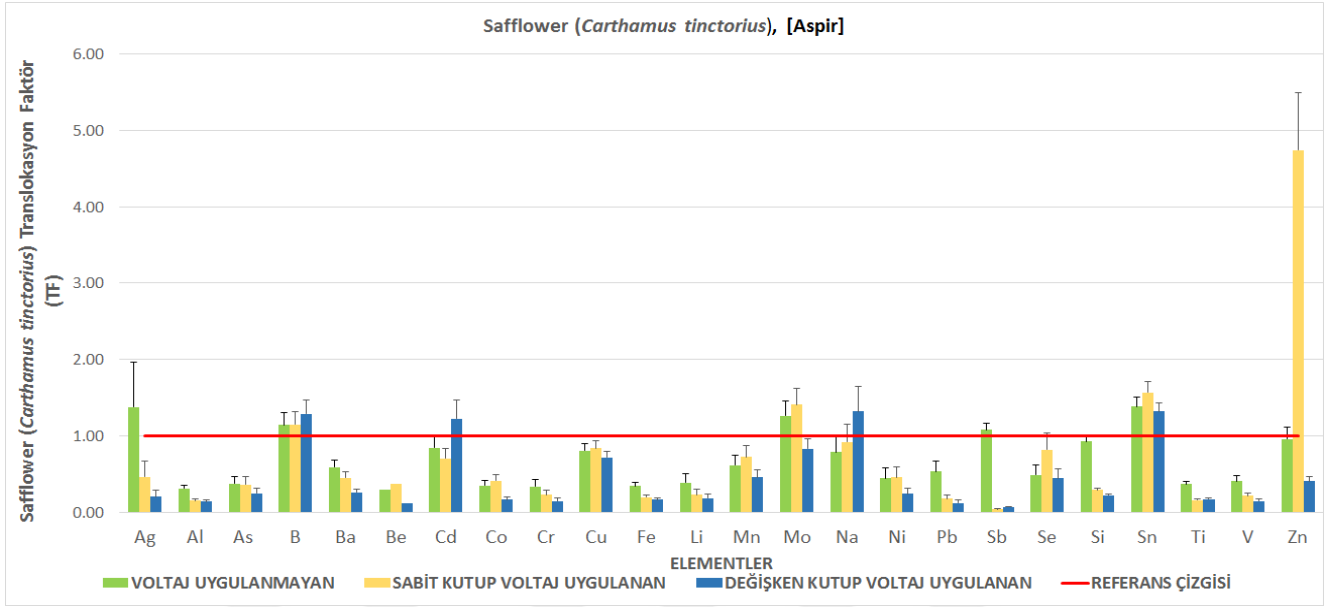
#### 3.3.1.1 Aspir (*Carthamus tinctorius*) bitkisi Translokasyon Faktörü

TF değerinin 1'den büyük olması bitkinin o element için biriktirici olduğunu ifade etmektedir. Tablo 3.4 ve Şekil 3.1'den görülebileceği üzere, aspir bitkisi Ag, B, Cd, Mo, Na, Sb, Sn ve Zn elementleri için biriktirici olabilmektedir. Bu bitkinin TF değerinde,

değişken kutuplu DC voltaj uygulaması, voltaj uygulanmayan duruma göre Cd ve Na elementleri için anlamlı bir artış, Ag, Mo ve Sb elementleri için anlamlı bir azalış yaratmıştır. Buna karşın, sabit kutuplu DC voltaj uygulaması Zn elementi TF değeri için 5 kat artış yaratmıştır. Bu artış faktörü dikkate değer olup, aspir bitkisini uygun koşullarda hiperakümülatör sınıfına sokma olanağı yaratabilir.

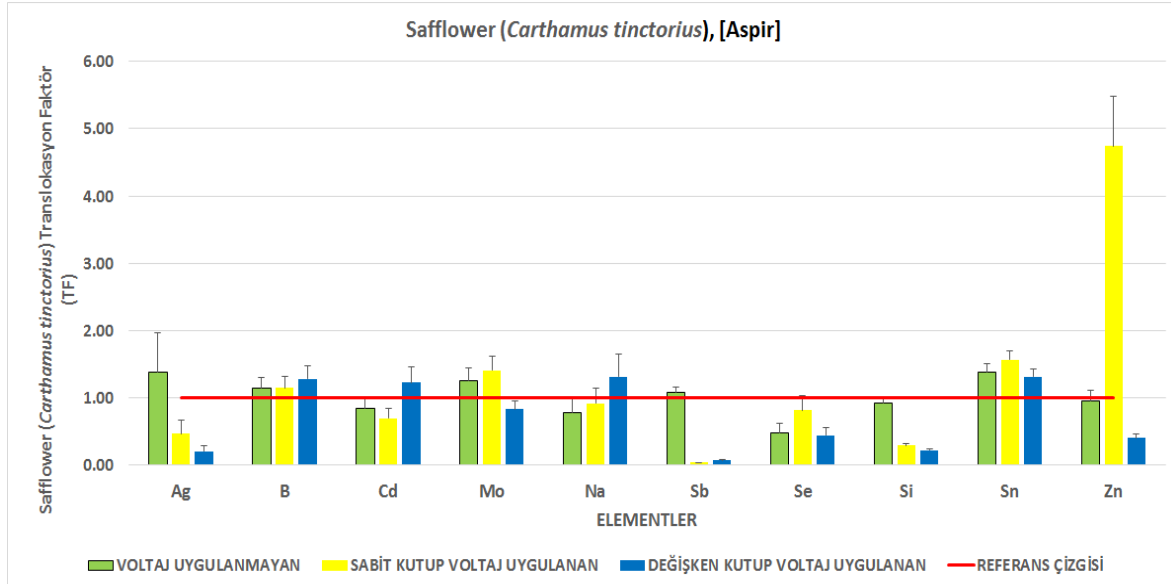
**Tablo 3.4:** Aspir (*Carthamus tinctorius*) bitkisi Translokasyon Faktörü değerleri

| <b>Aspir (<i>Carthamus tinctorius</i>) bitkisi Translokasyon Faktörü (TF)</b> |                            |                                     |                                        |                                          |                                                   |                                                      |
|-------------------------------------------------------------------------------|----------------------------|-------------------------------------|----------------------------------------|------------------------------------------|---------------------------------------------------|------------------------------------------------------|
| <b>Elementler</b>                                                             | <b>Voltaj uygulanmayan</b> | <b>Sabit kutup voltaj uygulanan</b> | <b>Değişken kutup voltaj uygulanan</b> | <b>± Voltaj uygulanmayan belirsizlik</b> | <b>± Sabit kutup voltaj uygulanan belirsizlik</b> | <b>± Değişken kutup voltaj uygulanan belirsizlik</b> |
| <b>Ag</b>                                                                     | <b>1,378</b>               | 0,467                               | 0,207                                  | 0,590                                    | 0,200                                             | 0,089                                                |
| <b>Al</b>                                                                     | 0,311                      | 0,155                               | 0,143                                  | 0,047                                    | 0,023                                             | 0,021                                                |
| <b>As</b>                                                                     | 0,373                      | 0,364                               | 0,246                                  | 0,101                                    | 0,098                                             | 0,067                                                |
| <b>B</b>                                                                      | <b>1,141</b>               | <b>1,153</b>                        | <b>1,288</b>                           | 0,164                                    | 0,166                                             | 0,186                                                |
| <b>Ba</b>                                                                     | 0,589                      | 0,453                               | 0,263                                  | 0,098                                    | 0,075                                             | 0,044                                                |
| <b>Be</b>                                                                     | 0,298                      | 0,367                               | 0,123                                  |                                          |                                                   |                                                      |
| <b>Cd</b>                                                                     | 0,846                      | 0,703                               | <b>1,228</b>                           | 0,162                                    | 0,135                                             | 0,236                                                |
| <b>Co</b>                                                                     | 0,351                      | 0,411                               | 0,168                                  | 0,072                                    | 0,084                                             | 0,034                                                |
| <b>Cr</b>                                                                     | 0,337                      | 0,228                               | 0,150                                  | 0,088                                    | 0,060                                             | 0,039                                                |
| <b>Cu</b>                                                                     | 0,809                      | 0,837                               | 0,717                                  | 0,095                                    | 0,099                                             | 0,085                                                |
| <b>Fe</b>                                                                     | 0,347                      | 0,197                               | 0,164                                  | 0,051                                    | 0,029                                             | 0,024                                                |
| <b>Li</b>                                                                     | 0,389                      | 0,229                               | 0,184                                  | 0,115                                    | 0,068                                             | 0,055                                                |
| <b>Mn</b>                                                                     | 0,616                      | 0,722                               | 0,460                                  | 0,129                                    | 0,152                                             | 0,097                                                |
| <b>Mo</b>                                                                     | <b>1,261</b>               | <b>1,409</b>                        | 0,833                                  | 0,192                                    | 0,214                                             | 0,127                                                |
| <b>Na</b>                                                                     | 0,788                      | 0,923                               | <b>1,320</b>                           | 0,195                                    | 0,229                                             | 0,327                                                |
| <b>Ni</b>                                                                     | 0,447                      | 0,457                               | 0,245                                  | 0,131                                    | 0,134                                             | 0,072                                                |
| <b>Pb</b>                                                                     | 0,533                      | 0,180                               | 0,124                                  | 0,141                                    | 0,047                                             | 0,033                                                |
| <b>Sb</b>                                                                     | <b>1,081</b>               | 0,040                               | 0,073                                  | 0,084                                    | 0,003                                             | 0,006                                                |
| <b>Se</b>                                                                     | 0,489                      | 0,818                               | 0,444                                  | 0,134                                    | 0,224                                             | 0,122                                                |
| <b>Si</b>                                                                     | 0,931                      | 0,294                               | 0,222                                  | 0,086                                    | 0,027                                             | 0,020                                                |
| <b>Sn</b>                                                                     | <b>1,383</b>               | <b>1,566</b>                        | <b>1,318</b>                           | 0,124                                    | 0,141                                             | 0,119                                                |
| <b>Ti</b>                                                                     | 0,370                      | 0,159                               | 0,175                                  | 0,040                                    | 0,017                                             | 0,019                                                |
| <b>V</b>                                                                      | 0,404                      | 0,214                               | 0,147                                  | 0,082                                    | 0,043                                             | 0,030                                                |
| <b>Zn</b>                                                                     | 0,959                      | <b>4,740</b>                        | 0,408                                  | 0,151                                    | 0,749                                             | 0,064                                                |



**Şekil 3.1:** Aspir (*Carthamus tinctorius*) bitkisinin 24 element için Translokasyon Faktörü

Şekil 3.2 ve Tablo 3.5’de yalnızca, aspir bitkisinin biriktirici olabileceği elementler gösterilmiştir. Üç farklı voltaj durumundan herhangi birisi için  $TF > 1$  olması, bitkinin o element için biriktirici olabileceği anlamına gelmektedir. Bu durumda, aspir bitkisi Ag, B, Cd, Mo, Na, Sb, Sn ve Zn olmak üzere 8 element için bu potansiyele sahiptir.



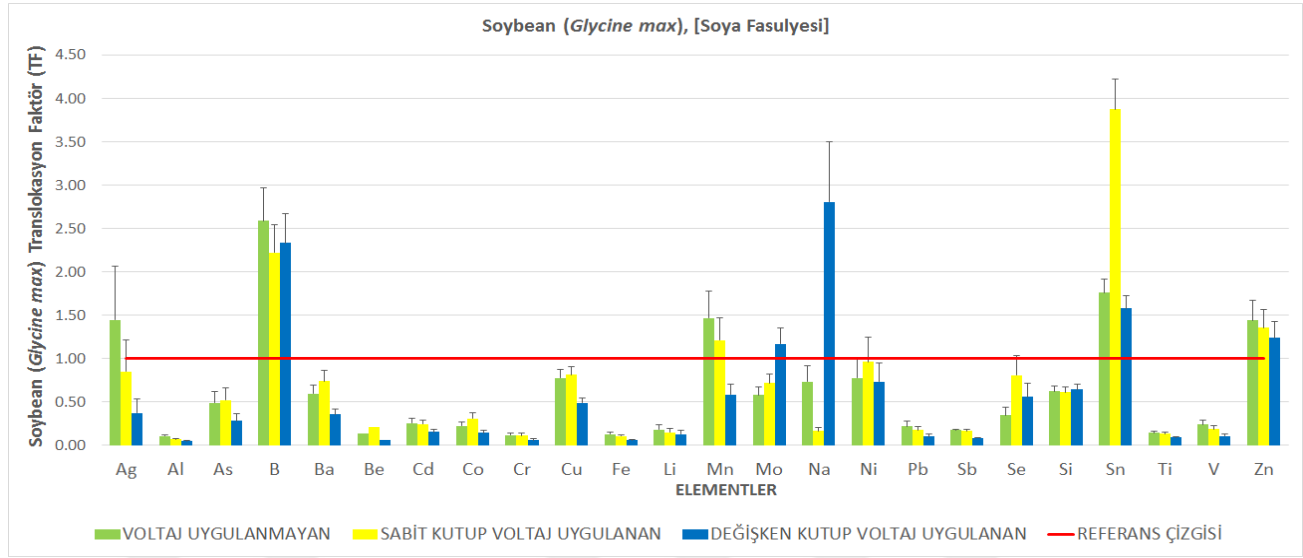
**Şekil 3.2:** Aspir (*Carthamus tinctorius*) bitkisinin biriktirici olduğu elementler

**Tablo 3.5:** Aspir (*Carthamus tinctorius*) bitkisinin biriktirici olduğu elementler

| <b>Aspir (<i>Carthamus tinctorius</i>) Translokasyon Faktörü (TF)</b> |                            |                                     |                                        |                                          |                                                   |                                                      |
|-----------------------------------------------------------------------|----------------------------|-------------------------------------|----------------------------------------|------------------------------------------|---------------------------------------------------|------------------------------------------------------|
| <b>Elementler</b>                                                     | <b>Voltaj uygulanmayan</b> | <b>Sabit kutup voltaj uygulanan</b> | <b>Değişken kutup voltaj uygulanan</b> | <b>± Voltaj uygulanmayan belirsizlik</b> | <b>± Sabit kutup voltaj uygulanan belirsizlik</b> | <b>± Değişken kutup voltaj uygulanan belirsizlik</b> |
| <b>Ag</b>                                                             | <b>1,378</b>               | 0,467                               | 0,207                                  | 0,590                                    | 0,200                                             | 0,089                                                |
| <b>B</b>                                                              | <b>1,141</b>               | <b>1,153</b>                        | <b>1,288</b>                           | 0,164                                    | 0,166                                             | 0,186                                                |
| <b>Cd</b>                                                             | 0,846                      | 0,703                               | <b>1,228</b>                           | 0,162                                    | 0,135                                             | 0,236                                                |
| <b>Mo</b>                                                             | <b>1,261</b>               | <b>1,409</b>                        | 0,833                                  | 0,192                                    | 0,214                                             | 0,127                                                |
| <b>Na</b>                                                             | 0,788                      | 0,923                               | <b>1,320</b>                           | 0,195                                    | 0,229                                             | 0,327                                                |
| <b>Sb</b>                                                             | <b>1,081</b>               | 0,040                               | 0,073                                  | 0,084                                    | 0,003                                             | 0,006                                                |
| <b>Sn</b>                                                             | <b>1,383</b>               | <b>1,566</b>                        | <b>1,318</b>                           | 0,124                                    | 0,141                                             | 0,119                                                |
| <b>Zn</b>                                                             | 0,959                      | <b>4,740</b>                        | 0,408                                  | 0,151                                    | 0,749                                             | 0,064                                                |

### 3.3.1.2 Soya fasulyesi (*Glycine max*) bitkisi Translokasyon Faktörü

Soya fasulyesi bitkisinin Translokasyon Faktörü değerleri belirsizlik değerleri ile birlikte hesaplanmıştır. Soya fasulyesi için  $TF > 1$  olması, bitkinin o element için biriktirici rolünü ifade etmektedir. Tablo 3.6 ve Şekil 3.3'den görülebileceği gibi, soya fasulyesi bitkisi Ag, B, Mn, Mo, Na, Sn ve Zn elementleri için biriktirici olabilmektedir. Bu bitkinin TF değerinde, değişken kutuplu DC voltaj uygulaması, voltaj uygulanmayan duruma göre Mo ve Na elementleri için anlamlı bir artış, Ag ve Mn elementleri için anlamlı bir azalış yaratmıştır. Buna karşın, sabit kutuplu DC voltaj uygulaması Sn elementi TF değeri için 2 kattan fazla bir artış yaratmıştır.



Şekil 3.3: Soya fasulyesi (*Glycine max*) bitkisinin 24 elemente ait Traslokasyon Faktörleri

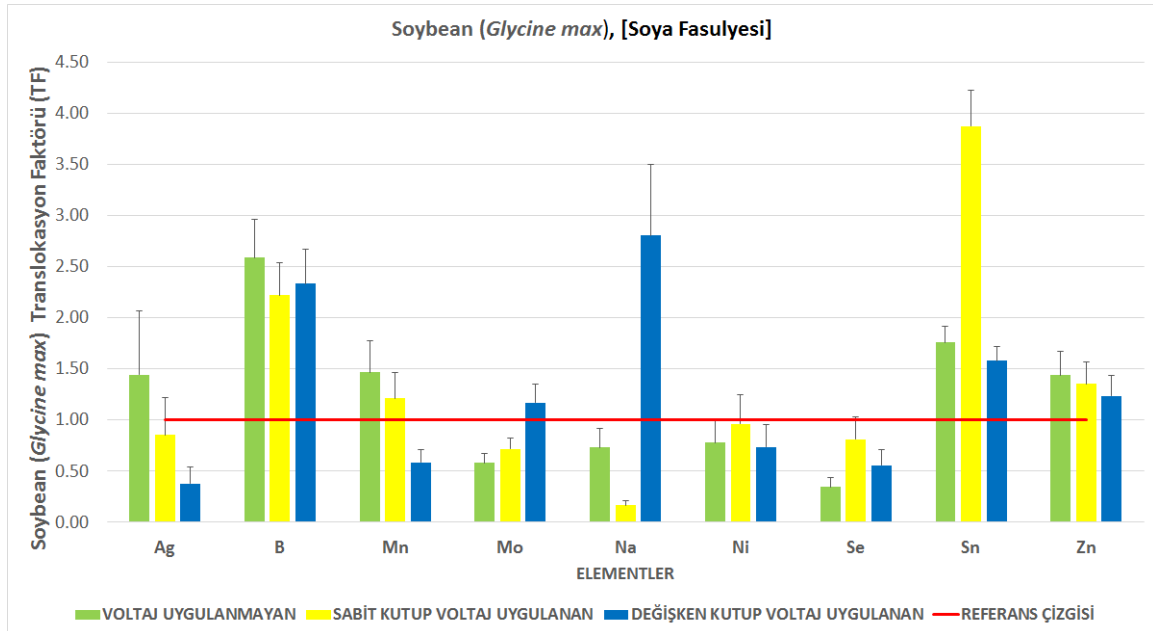
Tablo 3.6: Soya fasulyesi (*Glycine max*) bitkisinin Traslokasyon Faktörü değerleri

| Soya fasulyesi ( <i>Glycine max</i> ) Traslokasyon Faktörü (TF) |                     |                              |                                 |                                   |                                            |                                               |
|-----------------------------------------------------------------|---------------------|------------------------------|---------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------------------|-----------------------------------------------|
| Elementler                                                      | Voltaj uygulanmayan | Sabit kutup voltaj uygulanan | Değişken kutup voltaj uygulanan | ± Voltaj uygulanmayan belirsizlik | ± Sabit kutup voltaj uygulanan belirsizlik | ± Değişken kutup voltaj uygulanan belirsizlik |
| Ag                                                              | 1,444               | 0,853                        | 0,376                           | 0,618                             | 0,365                                      | 0,161                                         |
| Al                                                              | 0,109               | 0,072                        | 0,049                           | 0,016                             | 0,011                                      | 0,007                                         |
| As                                                              | 0,489               | 0,521                        | 0,285                           | 0,132                             | 0,141                                      | 0,077                                         |
| B                                                               | 2,588               | 2,221                        | 2,331                           | 0,373                             | 0,320                                      | 0,336                                         |
| Ba                                                              | 0,596               | 0,738                        | 0,358                           | 0,099                             | 0,123                                      | 0,059                                         |
| Be                                                              | 0,135               | 0,213                        | 0,068                           |                                   |                                            |                                               |
| Cd                                                              | 0,260               | 0,248                        | 0,155                           | 0,050                             | 0,048                                      | 0,030                                         |
| Co                                                              | 0,227               | 0,309                        | 0,147                           | 0,046                             | 0,063                                      | 0,030                                         |
| Cr                                                              | 0,117               | 0,116                        | 0,061                           | 0,031                             | 0,030                                      | 0,016                                         |
| Cu                                                              | 0,779               | 0,815                        | 0,490                           | 0,092                             | 0,096                                      | 0,058                                         |
| Fe                                                              | 0,131               | 0,110                        | 0,059                           | 0,019                             | 0,016                                      | 0,009                                         |
| Li                                                              | 0,184               | 0,149                        | 0,131                           | 0,054                             | 0,044                                      | 0,039                                         |
| Mn                                                              | 1,467               | 1,211                        | 0,587                           | 0,308                             | 0,254                                      | 0,123                                         |
| Mo                                                              | 0,581               | 0,718                        | 1,171                           | 0,088                             | 0,109                                      | 0,178                                         |
| Na                                                              | 0,733               | 0,166                        | 2,803                           | 0,182                             | 0,041                                      | 0,695                                         |
| Ni                                                              | 0,778               | 0,961                        | 0,736                           | 0,229                             | 0,283                                      | 0,216                                         |
| Pb                                                              | 0,220               | 0,176                        | 0,102                           | 0,058                             | 0,046                                      | 0,027                                         |
| Sb                                                              | 0,176               | 0,169                        | 0,088                           | 0,014                             | 0,013                                      | 0,007                                         |
| Se                                                              | 0,346               | 0,811                        | 0,559                           | 0,095                             | 0,222                                      | 0,153                                         |
| Si                                                              | 0,625               | 0,613                        | 0,646                           | 0,058                             | 0,056                                      | 0,059                                         |
| Sn                                                              | 1,757               | 3,873                        | 1,580                           | 0,158                             | 0,349                                      | 0,142                                         |
| Ti                                                              | 0,147               | 0,136                        | 0,093                           | 0,016                             | 0,015                                      | 0,010                                         |
| V                                                               | 0,244               | 0,190                        | 0,108                           | 0,049                             | 0,038                                      | 0,022                                         |
| Zn                                                              | 1,440               | 1,355                        | 1,237                           | 0,227                             | 0,214                                      | 0,195                                         |

Şekil 3.4 ve Tablo 3.7’de yalnızca, soya fasulyesi bitkisinin biriktirici olabileceği elementler gösterilmiştir. Üç farklı voltaj durumundan herhangi birisi için  $TF > 1$  olması, bitkinin o element için biriktirici olabileceği anlamına gelmektedir. Bu durumda, soya fasulyesi bitkisi Ag, B, Mn, Mo, Na, Sn ve Zn olmak üzere 7 element için bu potansiyele sahiptir.

**Tablo 3.7:** Soya fasulyesi (*Glycine max*) bitkisinin biriktirici olduğu elementler

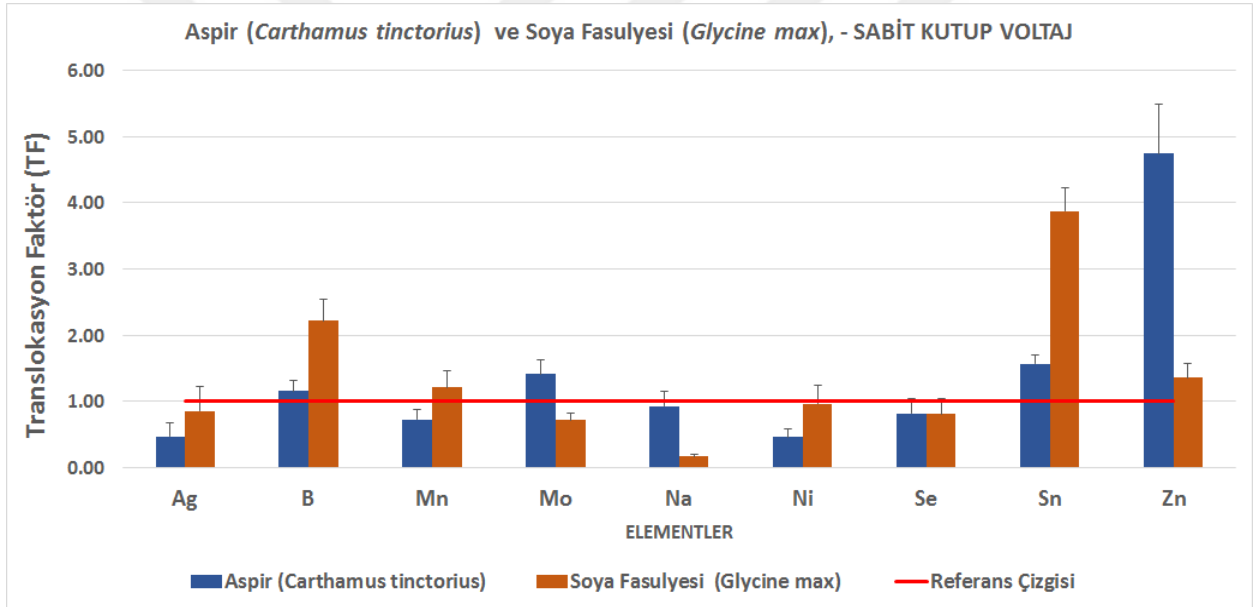
| Soya fasulyesi ( <i>Glycine max</i> ) Translokasyon Faktörü (TF) |                     |                              |                                 |                                   |                                            |                                               |
|------------------------------------------------------------------|---------------------|------------------------------|---------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------------------|-----------------------------------------------|
| Elementler                                                       | Voltaj uygulanmayan | Sabit kutup voltaj uygulanan | Değişken kutup voltaj uygulanan | ± Voltaj uygulanmayan belirsizlik | ± Sabit kutup voltaj uygulanan belirsizlik | ± Değişken kutup voltaj uygulanan belirsizlik |
| <b>Ag</b>                                                        | <b>1,444</b>        | 0,853                        | 0,376                           | 0,618                             | 0,365                                      | 0,161                                         |
| <b>B</b>                                                         | <b>2,588</b>        | <b>2,221</b>                 | <b>2,331</b>                    | 0,373                             | 0,320                                      | 0,336                                         |
| <b>Mn</b>                                                        | <b>1,467</b>        | <b>1,211</b>                 | 0,587                           | 0,308                             | 0,254                                      | 0,123                                         |
| <b>Mo</b>                                                        | 0,581               | 0,718                        | <b>1,171</b>                    | 0,088                             | 0,109                                      | 0,178                                         |
| <b>Na</b>                                                        | 0,733               | 0,166                        | <b>2,803</b>                    | 0,182                             | 0,041                                      | 0,695                                         |
| <b>Sn</b>                                                        | <b>1,757</b>        | <b>3,873</b>                 | <b>1,580</b>                    | 0,158                             | 0,349                                      | 0,142                                         |
| <b>Zn</b>                                                        | <b>1,440</b>        | <b>1,355</b>                 | <b>1,237</b>                    | 0,227                             | 0,214                                      | 0,195                                         |



**Şekil 3.4:** Soya fasulyesi (*Glycine max*) bitkisinin biriktirici olduğu elementler

### 3.3.1.3 Aspir (*Carthamus tinctorius*) ve Soya fasulyesi (*Glycine max*) bitkilerinin Translokasyon Faktörlerinin karşılaştırılması

İlk olarak, sabit kutup voltaj uygulaması yapılan aspir ve soya fasulyesi bitkilerinin Translokasyon Faktörleri ve buna bağlı olarak da kirleticiler karşısında biriktirici rolleri karşılaştırılarak ele alınmıştır. Şekil 3.5 ve Tablo 3.8’den de görülebileceği gibi, sabit kutup voltaj uygulaması altında soya fasulyesi bitkisi Ag, B, Mn, Ni ve Sn elementlerinin topraktan uzaklaştırılmasında daha iyi performans gösterirken, aspir bitkisi Mo, Na, ve Zn için daha iyi performans göstermiştir.



Şekil 3.5: Sabit kutuplu voltaj uygulanan aspir (*Carthamus tinctorius*) ve Soya fasulyesi (*Glycine max*) bitkilerinin Translokasyon Faktörleri karşılaştırması

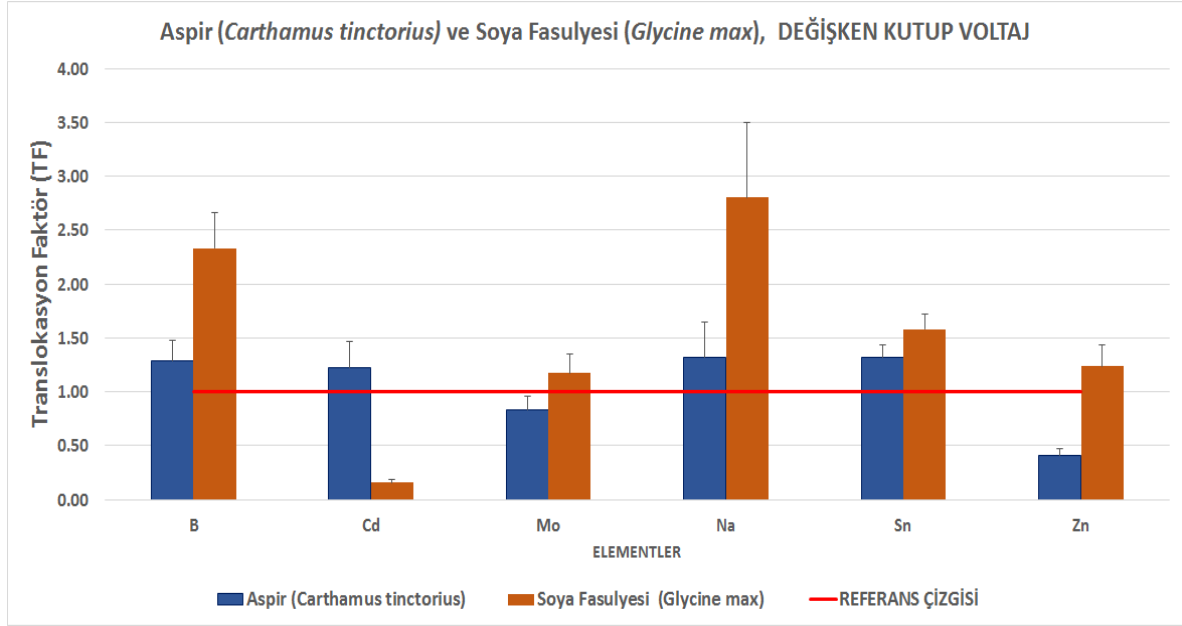
**Tablo 3.8:** Sabit kutuplu Aspir (*Carthamus tinctorius*) ve Soya fasulyesi (*Glycine max*) bitkilerinin Translokasyon Faktörleri karşılaştırması

| Aspir ( <i>Carthamus tinctorius</i> ) ve Soya Fasulyesi ( <i>Glycine max</i> ) - SABİT KUTUP |                                       |                                       |                     |                              |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------|------------------------------|
| Elementler                                                                                   | Aspir ( <i>Carthamus tinctorius</i> ) | Soya fasulyesi ( <i>Glycine max</i> ) | ± Aspir belirsizlik | ± Soya fasulyesi belirsizlik |
| <b>Ag</b>                                                                                    | 0,467                                 | 0,853                                 | 0,200               | 0,365                        |
| <b>B</b>                                                                                     | 1,153                                 | <b>2,221</b>                          | 0,166               | 0,320                        |
| <b>Mn</b>                                                                                    | 0,722                                 | <b>1,211</b>                          | 0,152               | 0,254                        |
| <b>Mo</b>                                                                                    | <b>1,409</b>                          | 0,718                                 | 0,214               | 0,109                        |
| <b>Na</b>                                                                                    | 0,923                                 | 0,166                                 | 0,229               | 0,041                        |
| <b>Ni</b>                                                                                    | 0,457                                 | 0,961                                 | 0,134               | 0,283                        |
| <b>Se</b>                                                                                    | 0,818                                 | 0,811                                 | 0,224               | 0,222                        |
| <b>Sn</b>                                                                                    | <b>1,566</b>                          | <b>3,873</b>                          | 0,141               | 0,349                        |
| <b>Zn</b>                                                                                    | <b>4,740</b>                          | <b>1,355</b>                          | 0,749               | 0,214                        |

İkinci olarak, değişken kutup voltaj uygulaması yapılan aspir ve soya fasulyesi bitkilerinin Translokasyon Faktörleri ve buna bağlı olarak da kirleticiler karşısında biriktirici rolleri karşılaştırılarak ele alınmıştır. Şekil 3.6 ve Tablo 3.9'dan da görülebileceği gibi, değişken kutup voltaj uygulaması altında soya fasulyesi bitkisi B, Mo, Na, Sn ve Zn elementlerinin topraktan uzaklaştırılmasında daha iyi performans gösterirken, aspir bitkisi Cd için daha iyi performans göstermiştir.

**Tablo 3.9:** Değişken kutuplu aspir (*Carthamus tinctorius*) ve soya fasulyesi (*Glycine max*) bitkilerinin translokasyon faktörleri karşılaştırması

| Aspir ( <i>Carthamus tinctorius</i> ) ve Soya Fasulyesi ( <i>Glycine max</i> ) - DEĞİŞKEN KUTUP |                                       |                                       |                     |                              |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------|------------------------------|
| Elementler                                                                                      | Aspir ( <i>Carthamus tinctorius</i> ) | Soya fasulyesi ( <i>Glycine max</i> ) | ± Aspir belirsizlik | ± Soya fasulyesi belirsizlik |
| <b>B</b>                                                                                        | <b>1,288</b>                          | <b>2,331</b>                          | 0,186               | 0,336                        |
| <b>Cd</b>                                                                                       | <b>1,228</b>                          | 0,155                                 | 0,236               | 0,030                        |
| <b>Mo</b>                                                                                       | 0,833                                 | <b>1,171</b>                          | 0,127               | 0,178                        |
| <b>Na</b>                                                                                       | <b>1,320</b>                          | <b>2,803</b>                          | 0,327               | 0,695                        |
| <b>Sn</b>                                                                                       | <b>1,318</b>                          | <b>1,580</b>                          | 0,119               | 0,142                        |
| <b>Zn</b>                                                                                       | 0,408                                 | <b>1,237</b>                          | 0,064               | 0,195                        |



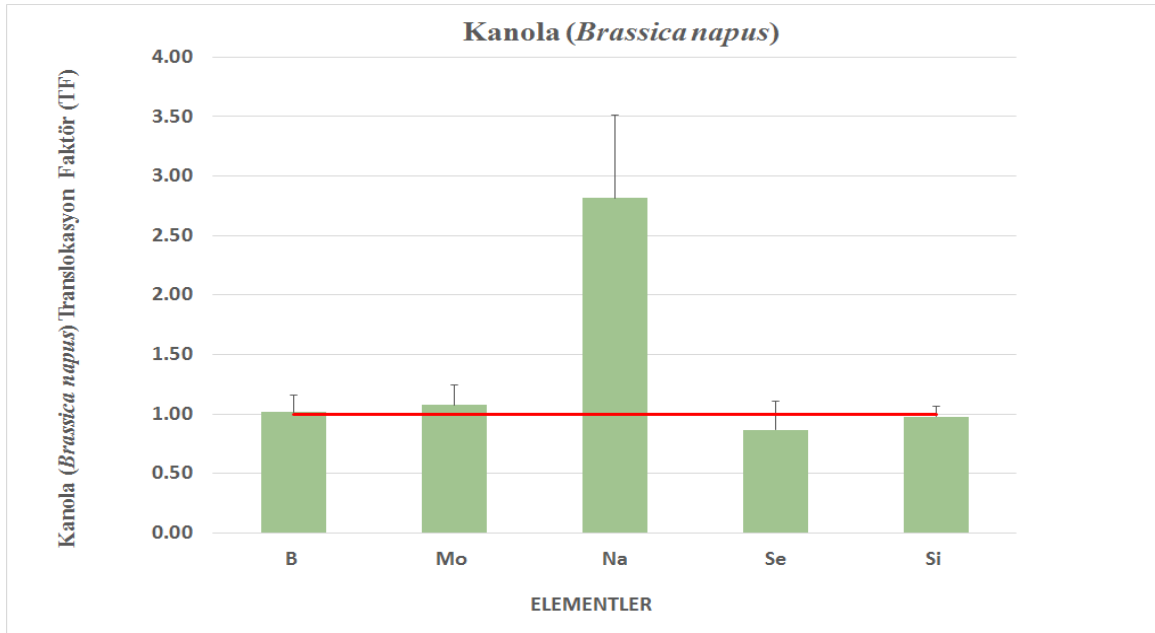
**Şekil 3.6:** Değişken kutuplu aspir (*Carthamus tinctorius*) ve Soya fasulyesi (*Glycine max*) bitkilerinin translokasyon faktörleri karşılaştırması

#### 3.3.1.4 Kanola (*Brassica napus*) bitkisi Translokasyon Faktörü

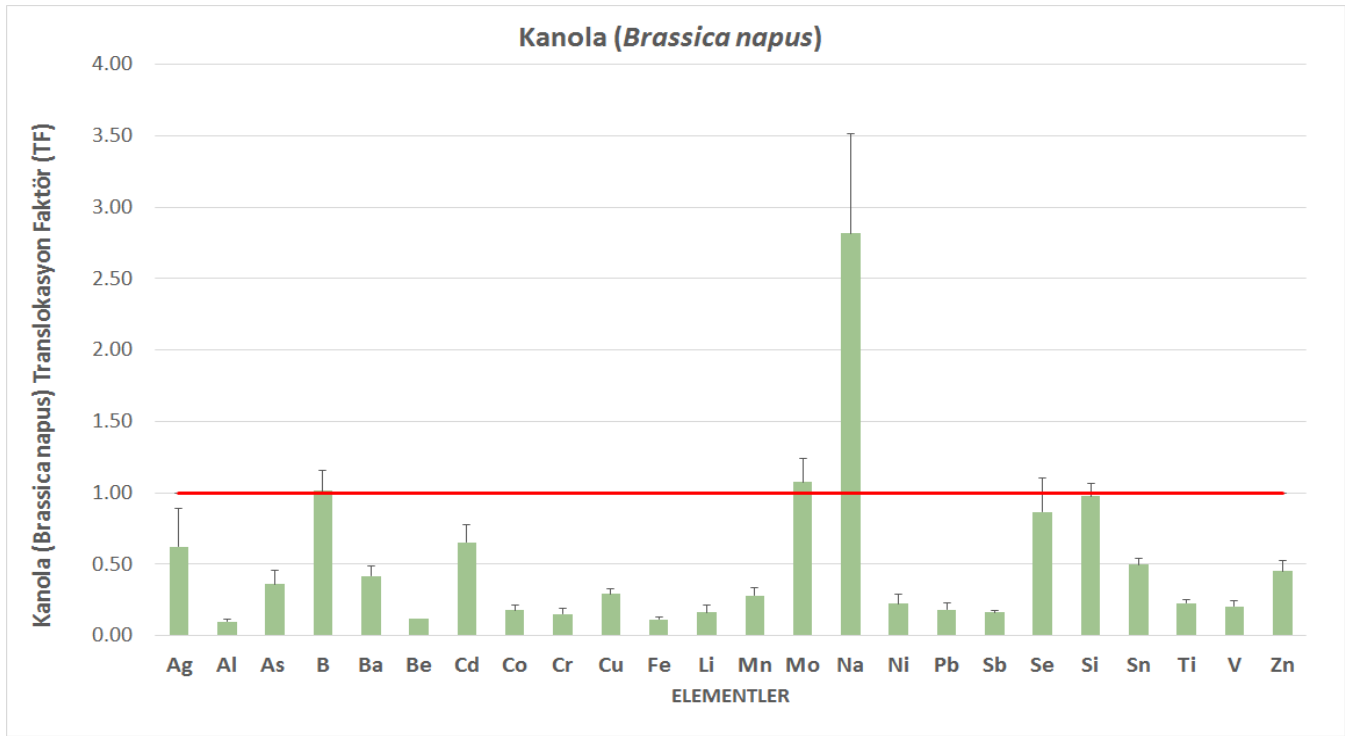
Bu çalışmada kanola bitkisi, voltaj uygulamasına dahil edilmeden incelenmiştir. Kanola bitkisinin  $TF > 1$  değerine sahip olduğu elementler için biriktirici olduğu ifade edilir. Buna göre kanola bitkisi B, Mo ve Na elementleri için biriktiricidir (Tablo 3.10 ve Şekil 3.7).

**Tablo 3.10:** Kanola (*Brassica napus*) Traslokasyon Faktörleri

| Elementler | Kanola ( <i>Brassica napus</i> ) | ± Kanola ( <i>Brassica napus</i> ) belirsizlik |
|------------|----------------------------------|------------------------------------------------|
| Ag         | 0,623                            | 0,267                                          |
| Al         | 0,101                            | 0,015                                          |
| As         | 0,361                            | 0,097                                          |
| B          | <b>1,014</b>                     | 0,146                                          |
| Ba         | 0,419                            | 0,07                                           |
| Be         | 0,117                            |                                                |
| Cd         | 0,652                            | 0,125                                          |
| Co         | 0,178                            | 0,036                                          |
| Cr         | 0,150                            | 0,039                                          |
| Cu         | 0,294                            | 0,035                                          |
| Fe         | 0,114                            | 0,017                                          |
| Li         | 0,165                            | 0,049                                          |
| Mn         | 0,280                            | 0,059                                          |
| Mo         | <b>1,076</b>                     | 0,164                                          |
| Na         | <b>2,815</b>                     | 0,698                                          |
| Ni         | 0,225                            | 0,066                                          |
| Pb         | 0,184                            | 0,049                                          |
| Sb         | 0,162                            | 0,013                                          |
| Se         | 0,867                            | 0,238                                          |
| Si         | 0,978                            | 0,09                                           |
| Sn         | 0,500                            | 0,045                                          |
| Ti         | 0,229                            | 0,025                                          |
| V          | 0,207                            | 0,042                                          |
| Zn         | 0,452                            | 0,071                                          |



**Şekil 3.7:** Kanola (*Brassica napus*) bitkisinin 24 elemente ait Traslokasyon Faktörleri



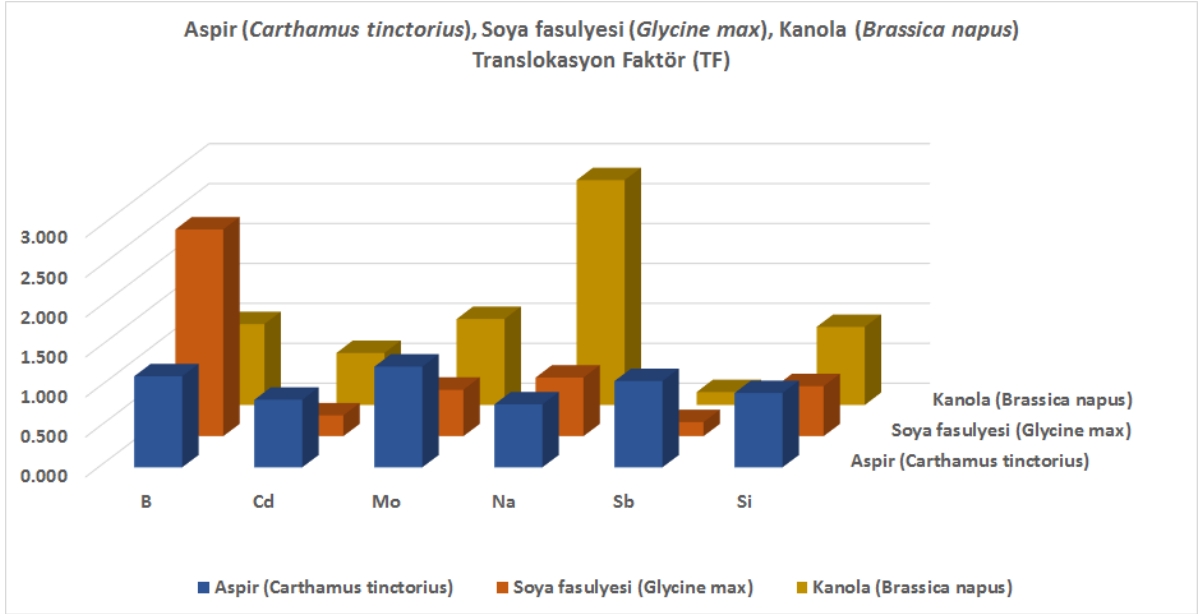
Şekil 3.8: Kanola (*Brassica napus*) bitkisinin biriktirici olabileceği elementler

### 3.3.1.5. Aspir (*Carthamus tinctorius*), Soya fasulyesi (*Glycine max*) ve Kanola (*Brassica napus*) bitkilerinin Translokasyon Faktörlerinin karşılaştırılması

Voltaj uygulaması yapılmayan aspir, soya fasulyesi ve kanola bitkilerinin Translokasyon Faktörleri ve buna bağlı olarak da kirleticiler karşısında biriktirici rolleri karşılaştırılarak ele alınmıştır (Tablo 3.11 ve Şekil 3.9).

**Tablo 3.11:** Aspir (*Carthamus tinctorius*), Soya fasulyesi (*Glycine max*) ve Kanola (*Brassica napus*) bitkilerinin Translokasyon Faktörleri karşılaştırması

| Elementler | Aspir ( <i>Carthamus tinctorius</i> ) | ± Aspir Belirsizlik | Soya fasulyesi ( <i>Glycine max</i> ) | ± Soya fasulyesi Belirsizlik | Kanola ( <i>Brassica napus</i> ) | ± Kanola Belirsizlik |
|------------|---------------------------------------|---------------------|---------------------------------------|------------------------------|----------------------------------|----------------------|
| <b>B</b>   | <b>1,141</b>                          | 0,164               | <b>2,588</b>                          | 0,373                        | <b>1,014</b>                     | 0,146                |
| <b>Cd</b>  | 0,846                                 | 0,162               | 0,260                                 | 0,050                        | 0,652                            | 0,125                |
| <b>Mo</b>  | <b>1,261</b>                          | 0,192               | 0,581                                 | 0,088                        | <b>1,076</b>                     | 0,164                |
| <b>Na</b>  | 0,788                                 | 0,195               | 0,733                                 | 0,182                        | <b>2,815</b>                     | 0,698                |
| <b>Sb</b>  | <b>1,081</b>                          | 0,084               | 0,176                                 | 0,014                        | 0,162                            | 0,013                |
| <b>Si</b>  | 0,931                                 | 0,086               | 0,625                                 | 0,058                        | 0,978                            | 0,09                 |



**Şekil 3.9:** Aspir (*Carthamus tinctorius*), Soya fasulyesi (*Glycine max*) ve Kanola (*Brassica napus*) bitkilerinin Translokasyon Faktörleri karşılaştırması

### 3.3.2 Biyoyoğunlaşma Faktörü (BCF)

Bir bitki için Biyoyoğunlaşma Faktörü (BCF), gövde, yapraklar ve köklerdeki ortalama kirlenici konsantrasyonunun topraktakine oranıdır. Bu faktör, bir bitkinin kirleneticileri topraktan alarak biriktirme yeteneğinin bir göstergesidir (Madanan ve ark., 2020).

$$BCF = \frac{\text{Bitkinin ortalama kirlenici konsantrasyonu}}{\text{Toprağın ortalama kirlenici konsantrasyonu}}$$

Eğer  $BCF > 1$  ise, bitki fitoekstraksiyon için uygundur.  $BCF > 2$  durumları, bitkiler için yüksek değerler olarak kabul edilirler. BCF değeri ne kadar yüksekse, bitkinin fitoekstraksiyon için uygunluğu o kadar yüksektir (Madanan ve ark., 2020).

Hem Biyoyoğunlaşma, hem de Translokasyon Faktörleri birden büyük olan ( $TF > 1$  ve  $BCF > 1$ ) bitkiler, fitoremediasyon için kullanım potansiyeline sahiptirler.  $BCF > 1$  ve  $TF < 1$  olan bitkiler fitostabilizasyon için kullanım potansiyeline sahiptirler (Madanan ve ark., 2020).

Her bitkinin yaprak, gövde ve köklerine ait olan element konsantrasyon değerlerinin belirsizlikleri, kullanılan analitik teknik ve cihaz için verilen % değerlerden hesaplanmıştır. Ölçüm sonuçlarının hesaplamalarda kullanımında, her bir element konsantrasyonuna ait % belirsizlik değerleri de uygun formüllerle hesaplamalara dahil

edilmiştir. Biyoyoğunlaşma Faktörü hesabında, yaprak, gövde ve kökteki ortalama kirletici konsantrasyonunun topraktakine oranı belirlenmiştir. Bu oranın sayısal değerinin belirsizliğini hesaplamak için aşağıda verilen matematiksel formüller kullanılmıştır.

$$\Delta A = \frac{1}{3} * (ykbo + gkbo + kkbo)$$

$$\Delta f = \frac{1}{T7} * \Delta A + \frac{\frac{(ykk + gkk + kkk)/3}{2}}{(T7)^2 * T7B}$$

*ykbo*: yapraktaki elementin belirsizliği

*gkbo*: gövdedeki elementin belirsizliği

*kkbo*: kökteki elementin belirsizliği

*ykk*: yapraktaki elementin konsantrasyonu

*gkk*: gövdedeki elementin konsantrasyonu

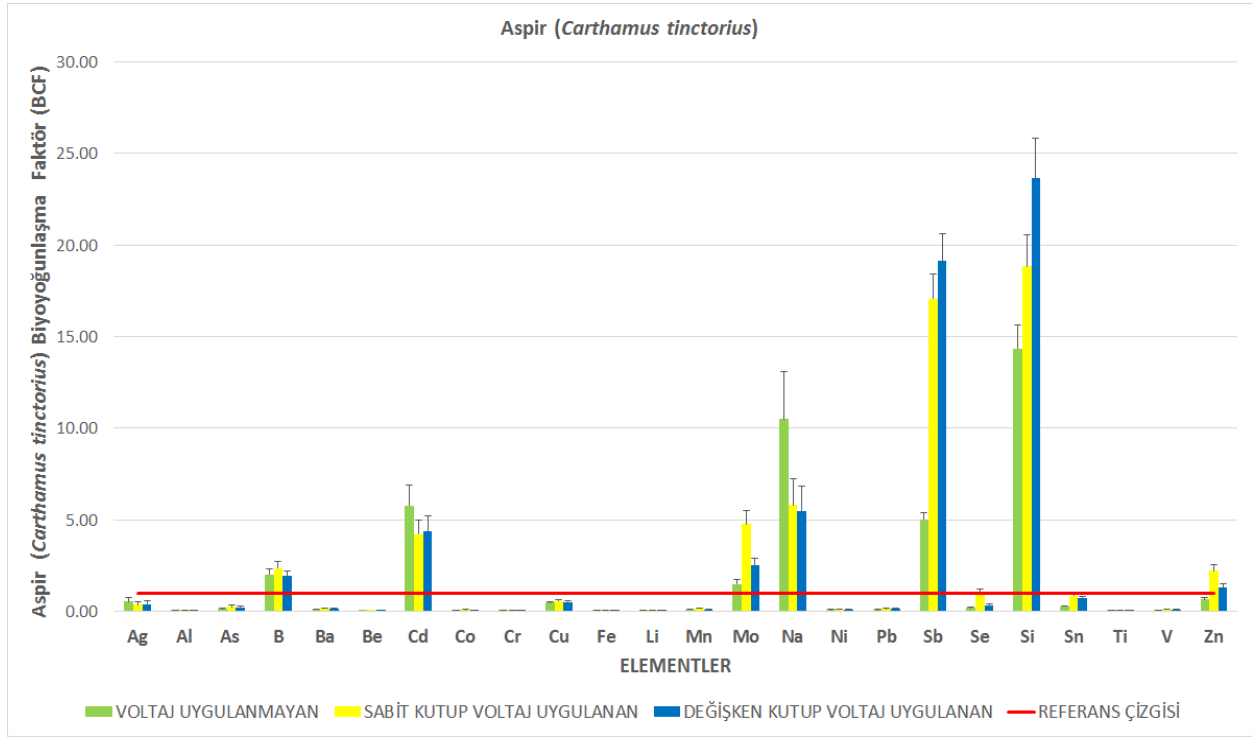
*kkk*: kökteki elementin konsantrasyonu

*T7*: şahit numune toprağındaki element konsantrasyonu

*T7B*: şahit numune toprağındaki elementin belirsizliği

### 3.3.2.1. Aspir (*Carthamus tinctorius*) bitkisi Biyoyoğunlaşma Faktörü

Aspir bitkisine ait Biyoyoğunlaşma Faktörü ve bu faktöre ait belirsizlik değerleri hesaplanmıştır. Buna göre, herhangi bir element için  $BCF > 1$  olması, aspir bitkisinin fitoekstraksiyon için uygun olduğunu ifade etmektedir. Tablo 3.12 ve Şekil 3.10'dan görülebileceği gibi, B, Cd, Mo, Na, Sb, Si ve Zn elementleri için aspir bitkisi  $BCF > 1$  değerlerine sahip olup, bu elementler için fitoekstraksiyona uygundur. Bu bitkinin  $BCF$  değerinde, değişken kutuplu DC voltaj uygulaması, voltaj uygulanmayan duruma göre Mo, Sb ve Si elementleri için anlamlı bir artış, Na elementi için anlamlı bir azalış yaratmıştır. Buna karşın, sabit kutuplu DC voltaj uygulaması Mo, Sb ve Zn elementleri için 3 kattan fazla olan anlamlı bir artış, Na elementi için anlamlı bir azalış yaratmıştır.

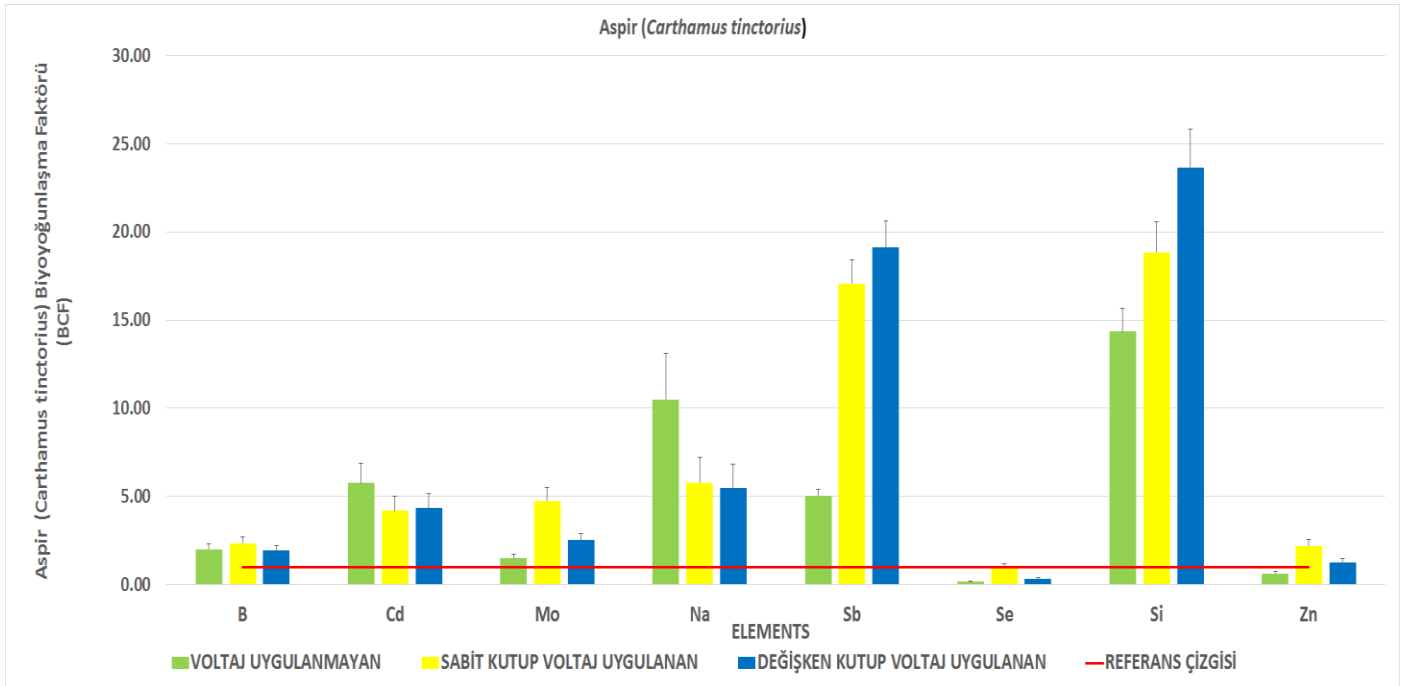


**Şekil 3.10:** Aspir (*Carthamus tinctorius*) bitkisinin 24 elemente ait Biyoyöğünlaşma Faktörü

**Tablo 3.12:** Aspir (*Carthamus tinctorius*) bitkisinin Biyoyöğünlaşma Faktörü

| Aspir ( <i>Carthamus tinctorius</i> ) bitkisi Biyoyöğünlaşma Faktörü (BCF) |                     |                              |                                 |                                 |                                          |                                             |
|----------------------------------------------------------------------------|---------------------|------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|------------------------------------------|---------------------------------------------|
| Elementler                                                                 | Voltaj uygulanmayan | Sabit kutup voltaj uygulanan | Değişken kutup voltaj uygulanan | Voltaj uygulanmayan belirsizlik | Sabit kutup voltaj uygulanan belirsizlik | Değişken kutup voltaj uygulanan belirsizlik |
| Ag                                                                         | 0,536               | 0,363                        | 0,387                           | 0,230                           | 0,155                                    | 0,166                                       |
| Al                                                                         | 0,031               | 0,037                        | 0,037                           | 0,005                           | 0,006                                    | 0,005                                       |
| As                                                                         | 0,132               | 0,243                        | 0,204                           | 0,036                           | 0,066                                    | 0,055                                       |
| B                                                                          | 2,016               | 2,354                        | 1,921                           | 0,290                           | 0,339                                    | 0,277                                       |
| Ba                                                                         | 0,105               | 0,146                        | 0,142                           | 0,017                           | 0,024                                    | 0,024                                       |
| Be                                                                         | 0,033               | 0,060                        | 0,043                           |                                 |                                          |                                             |
| Cd                                                                         | 5,768               | 4,192                        | 4,348                           | 1,107                           | 0,805                                    | 0,835                                       |
| Co                                                                         | 0,044               | 0,073                        | 0,053                           | 0,009                           | 0,015                                    | 0,011                                       |
| Cr                                                                         | 0,035               | 0,058                        | 0,043                           | 0,009                           | 0,015                                    | 0,011                                       |
| Cu                                                                         | 0,470               | 0,543                        | 0,487                           | 0,055                           | 0,064                                    | 0,057                                       |
| Fe                                                                         | 0,035               | 0,046                        | 0,044                           | 0,005                           | 0,007                                    | 0,007                                       |
| Li                                                                         | 0,037               | 0,043                        | 0,042                           | 0,011                           | 0,013                                    | 0,013                                       |
| Mn                                                                         | 0,089               | 0,143                        | 0,093                           | 0,019                           | 0,030                                    | 0,019                                       |
| Mo                                                                         | 1,490               | 4,767                        | 2,518                           | 0,226                           | 0,725                                    | 0,383                                       |
| Na                                                                         | 10,501              | 5,797                        | 5,466                           | 2,604                           | 1,438                                    | 1,356                                       |
| Ni                                                                         | 0,062               | 0,096                        | 0,072                           | 0,018                           | 0,028                                    | 0,021                                       |
| Pb                                                                         | 0,069               | 0,123                        | 0,140                           | 0,018                           | 0,032                                    | 0,037                                       |
| Sb                                                                         | 5,014               | 17,074                       | 19,125                          | 0,391                           | 1,332                                    | 1,492                                       |
| Se                                                                         | 0,169               | 0,936                        | 0,330                           | 0,046                           | 0,257                                    | 0,090                                       |
| Si                                                                         | 14,344              | 18,833                       | 23,651                          | 1,320                           | 1,733                                    | 2,176                                       |
| Sn                                                                         | 0,252               | 0,833                        | 0,722                           | 0,023                           | 0,075                                    | 0,065                                       |
| Ti                                                                         | 0,040               | 0,046                        | 0,050                           | 0,004                           | 0,005                                    | 0,005                                       |
| V                                                                          | 0,050               | 0,092                        | 0,100                           | 0,010                           | 0,019                                    | 0,020                                       |
| Zn                                                                         | 0,639               | 2,202                        | 1,279                           | 0,101                           | 0,348                                    | 0,202                                       |

Şekil 3.11 ve Tablo 3.13’de yalnızca, aspir bitkisinin fitoekstraktör olabileceği elementler gösterilmiştir. Üç farklı voltaj durumundan herhangi birisi için  $BCF > 1$  olması, bitkinin o element için ekstraktör olabileceği anlamına gelmektedir. Bu durumda, aspir bitkisi B, Cd, Mo, Na, Sb, Si ve Zn olmak üzere 7 element için bu potansiyele sahiptir. Görüldüğü gibi, Cd ve Na elementinin fitoekstraksiyonu için voltaj uygulaması yapılmayan, B, Mo ve Zn elementleri için sabit kutuplu voltaj uygulamasına tabi tutulan, Sb ve Si elementleri için ise değişken kutuplu voltaj uygulamasına tabi tutulan aspir (*Carthamus tinctorius*) bitkisi daha etkilidir.



Şekil 3.11: Aspir (*Carthamus tinctorius*) bitkisi için  $BCF > 1$  olan elementler

**Tablo 3.13:** Aspir (*Carthamus tinctorius*) bitkisi için BCF>1 olduğu elementler

| Aspir ( <i>Carthamus tinctorius</i> ) Biyoyoğunlaşma Faktörü (BCF) |                     |                              |                                 |                                 |                                          |                                             |
|--------------------------------------------------------------------|---------------------|------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|------------------------------------------|---------------------------------------------|
| Elementler                                                         | Voltaj uygulanmayan | Sabit kutup voltaj uygulanan | Değişken kutup voltaj uygulanan | Voltaj uygulanmayan belirsizlik | Sabit kutup voltaj uygulanan belirsizlik | Değişken kutup voltaj uygulanan belirsizlik |
| B                                                                  | 2,016               | 2,354                        | 1,921                           | 0,290                           | 0,339                                    | 0,277                                       |
| Cd                                                                 | 5,768               | 4,192                        | 4,348                           | 1,107                           | 0,805                                    | 0,835                                       |
| Mo                                                                 | 1,490               | 4,767                        | 2,518                           | 0,226                           | 0,725                                    | 0,383                                       |
| Na                                                                 | 10,501              | 5,797                        | 5,466                           | 2,604                           | 1,438                                    | 1,356                                       |
| Sb                                                                 | 5,014               | 17,074                       | 19,125                          | 0,391                           | 1,332                                    | 1,492                                       |
| Se                                                                 | 0,169               | 0,936                        | 0,330                           | 0,046                           | 0,257                                    | 0,090                                       |
| Si                                                                 | 14,344              | 18,833                       | 23,651                          | 1,320                           | 1,733                                    | 2,176                                       |
| Zn                                                                 | 0,639               | 2,202                        | 1,279                           | 0,101                           | 0,348                                    | 0,202                                       |

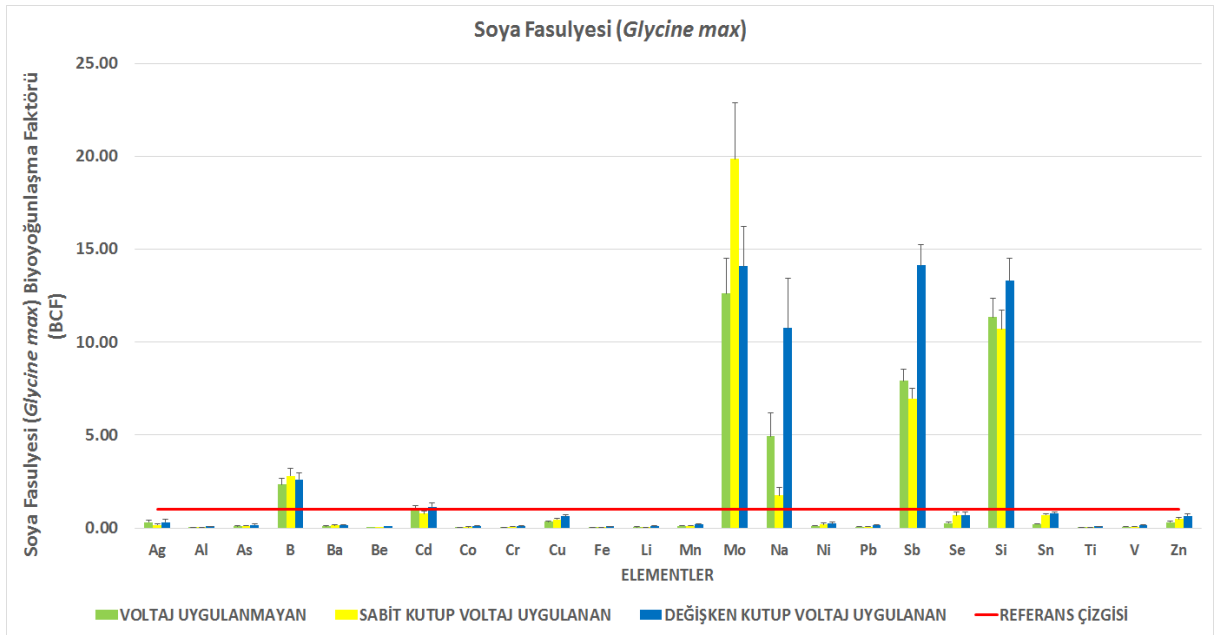
### 3.3.2.2. Soya fasulyesi (*Glycine max*) bitkisi Biyoyoğunlaşma Faktörü

Soya fasulyesi bitkisine ait Biyoyoğunlaşma Faktörü ve bu faktöre ait belirsizlik değerleri hesaplanmıştır. Buna göre, herhangi bir element için BCF>1 olması, soya fasulyesi bitkisinin fitoekstraksiyon için uygun olduğunu ifade etmektedir.

Tablo 3.14 ve Şekil 3.12’den görülebileceği gibi, B, Cd, Mo, Na, Sb ve Si elementleri için soya fasulyesi bitkisi BCF>1 değerlerine sahip olup, bu elementler için fitoekstraksiyona uygundur. Bu bitkinin BCF değerinde, değişken kutuplu DC voltaj uygulaması, voltaj uygulanmayan duruma göre Na ve Sb elementleri için anlamlı bir artış yaratmıştır. Buna karşın, sabit kutuplu DC voltaj uygulaması Mo elementi için anlamlı bir artış, Na elementi için anlamlı bir azalış yaratmıştır.

**Tablo 3.14:** Soya Fasulyesi (*Glycine max*) bitkisinin Biyoyoğunlaşma Faktörü

| Soya Fasulyesi ( <i>Glycine max</i> ) bitkisi Biyoyoğunlaşma Faktörü (BCF) |                     |                              |                                 |                                 |                                          |                                             |
|----------------------------------------------------------------------------|---------------------|------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|------------------------------------------|---------------------------------------------|
| Elementler                                                                 | Voltaj uygulanmayan | Sabit kutup voltaj uygulanan | Değişken kutup voltaj uygulanan | Voltaj uygulanmayan belirsizlik | Sabit kutup voltaj uygulanan belirsizlik | Değişken kutup voltaj uygulanan belirsizlik |
| Ag                                                                         | 0,299               | 0,163                        | 0,317                           | 0,128                           | 0,070                                    | 0,136                                       |
| Al                                                                         | 0,035               | 0,026                        | 0,079                           | 0,005                           | 0,004                                    | 0,012                                       |
| As                                                                         | 0,091               | 0,104                        | 0,168                           | 0,025                           | 0,028                                    | 0,045                                       |
| B                                                                          | <b>2,333</b>        | <b>2,807</b>                 | <b>2,606</b>                    | 0,336                           | 0,404                                    | 0,375                                       |
| Ba                                                                         | 0,098               | 0,134                        | 0,157                           | 0,016                           | 0,022                                    | 0,026                                       |
| Be                                                                         | 0,037               | 0,043                        | 0,098                           |                                 |                                          |                                             |
| Cd                                                                         | <b>1,012</b>        | 0,769                        | <b>1,150</b>                    | 0,194                           | 0,148                                    | 0,221                                       |
| Co                                                                         | 0,040               | 0,051                        | 0,107                           | 0,008                           | 0,010                                    | 0,022                                       |
| Cr                                                                         | 0,040               | 0,056                        | 0,095                           | 0,010                           | 0,015                                    | 0,025                                       |
| Cu                                                                         | 0,333               | 0,459                        | 0,635                           | 0,039                           | 0,054                                    | 0,075                                       |
| Fe                                                                         | 0,037               | 0,027                        | 0,082                           | 0,005                           | 0,004                                    | 0,012                                       |
| Li                                                                         | 0,043               | 0,031                        | 0,090                           | 0,013                           | 0,009                                    | 0,027                                       |
| Mn                                                                         | 0,111               | 0,121                        | 0,175                           | 0,023                           | 0,025                                    | 0,037                                       |
| Mo                                                                         | <b>12,620</b>       | <b>19,854</b>                | <b>14,082</b>                   | 1,918                           | 3,018                                    | 2,140                                       |
| Na                                                                         | <b>4,945</b>        | <b>1,759</b>                 | <b>10,755</b>                   | 1,226                           | 0,436                                    | 2,667                                       |
| Ni                                                                         | 0,103               | 0,195                        | 0,236                           | 0,030                           | 0,057                                    | 0,069                                       |
| Pb                                                                         | 0,065               | 0,069                        | 0,143                           | 0,017                           | 0,018                                    | 0,038                                       |
| Sb                                                                         | <b>7,907</b>        | <b>6,958</b>                 | <b>14,134</b>                   | 0,617                           | 0,543                                    | 1,102                                       |
| Se                                                                         | 0,252               | 0,678                        | 0,690                           | 0,069                           | 0,186                                    | 0,189                                       |
| Si                                                                         | <b>11,339</b>       | <b>10,720</b>                | <b>13,303</b>                   | 1,043                           | 0,986                                    | 1,224                                       |
| Sn                                                                         | 0,209               | 0,702                        | 0,794                           | 0,019                           | 0,063                                    | 0,071                                       |
| Ti                                                                         | 0,045               | 0,034                        | 0,088                           | 0,005                           | 0,004                                    | 0,009                                       |
| V                                                                          | 0,062               | 0,062                        | 0,128                           | 0,013                           | 0,013                                    | 0,026                                       |
| Zn                                                                         | 0,313               | 0,469                        | 0,653                           | 0,049                           | 0,074                                    | 0,103                                       |

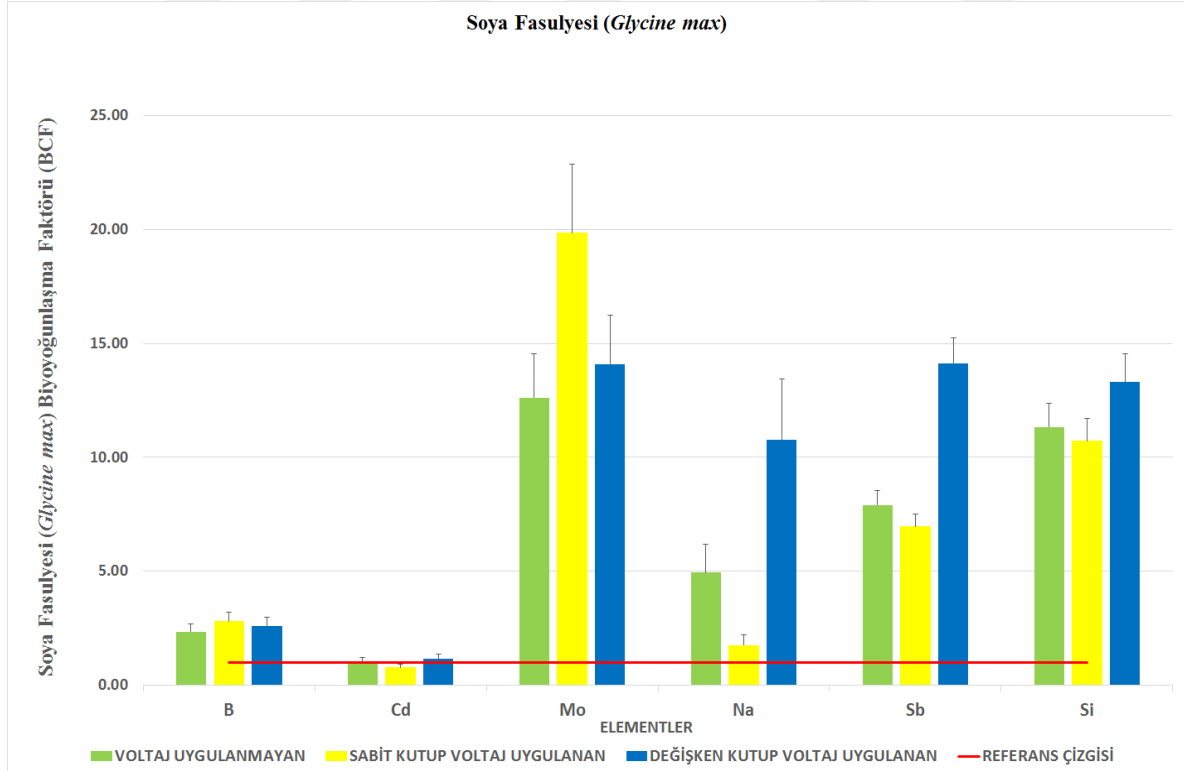


**Şekil 3.12:** Soya fasulyesi (*Glycine max*) bitkisinin 24 elemente ait biyoyoğunlaşma faktörü

Şekil 3.13 ve Tablo 3.15’da yalnızca, soya fasulyesi bitkisinin fitoekstraktör olabileceği elementler gösterilmiştir. Üç farklı voltaj durumundan herhangi birisi için  $BCF > 1$  olması, bitkinin o element için ekstraktör olabileceği anlamına gelmektedir. Bu durumda, soya fasulyesi bitkisi B, Cd, Mo, Na, Sb ve Si olmak üzere 6 element için bu potansiyele sahiptir. Görüldüğü gibi, B ve Mo elementleri için sabit kutuplu voltaj uygulamasına tabi tutulan, Cd, Na, Sb ve Si elementleri için ise değişken kutuplu voltaj uygulamasına tabi tutulan soya fasulyesi bitkisi daha etkilidir.

**Tablo 3.15:** Soya Fasulyesi (*Glycine max*) bitkisi için  $BCF > 1$  olan elementler

| Soya fasulyesi ( <i>Glycine max</i> ) bitkisi Biyoyöğünleşme Faktörü (BCF) |                     |                              |                                 |                                   |                                            |                                               |
|----------------------------------------------------------------------------|---------------------|------------------------------|---------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------------------|-----------------------------------------------|
| Elementler                                                                 | Voltaj uygulanmayan | Sabit kutup voltaj uygulanan | Değişken kutup voltaj uygulanan | ± Voltaj uygulanmayan belirsizlik | ± Sabit kutup voltaj uygulanan belirsizlik | ± Değişken kutup voltaj uygulanan belirsizlik |
| <b>B</b>                                                                   | <b>2,333</b>        | <b>2,807</b>                 | <b>2,606</b>                    | 0,336                             | 0,404                                      | 0,375                                         |
| <b>Cd</b>                                                                  | <b>1,012</b>        | 0,769                        | <b>1,150</b>                    | 0,194                             | 0,148                                      | 0,221                                         |
| <b>Mo</b>                                                                  | <b>12,620</b>       | <b>19,854</b>                | <b>14,082</b>                   | 1,918                             | 3,018                                      | 2,140                                         |
| <b>Na</b>                                                                  | <b>4,945</b>        | <b>1,759</b>                 | <b>10,755</b>                   | 1,226                             | 0,436                                      | 2,667                                         |
| <b>Sb</b>                                                                  | <b>7,907</b>        | <b>6,958</b>                 | <b>14,134</b>                   | 0,617                             | 0,543                                      | 1,102                                         |
| <b>Si</b>                                                                  | <b>11,339</b>       | <b>10,720</b>                | <b>13,303</b>                   | 1,043                             | 0,986                                      | 1,224                                         |

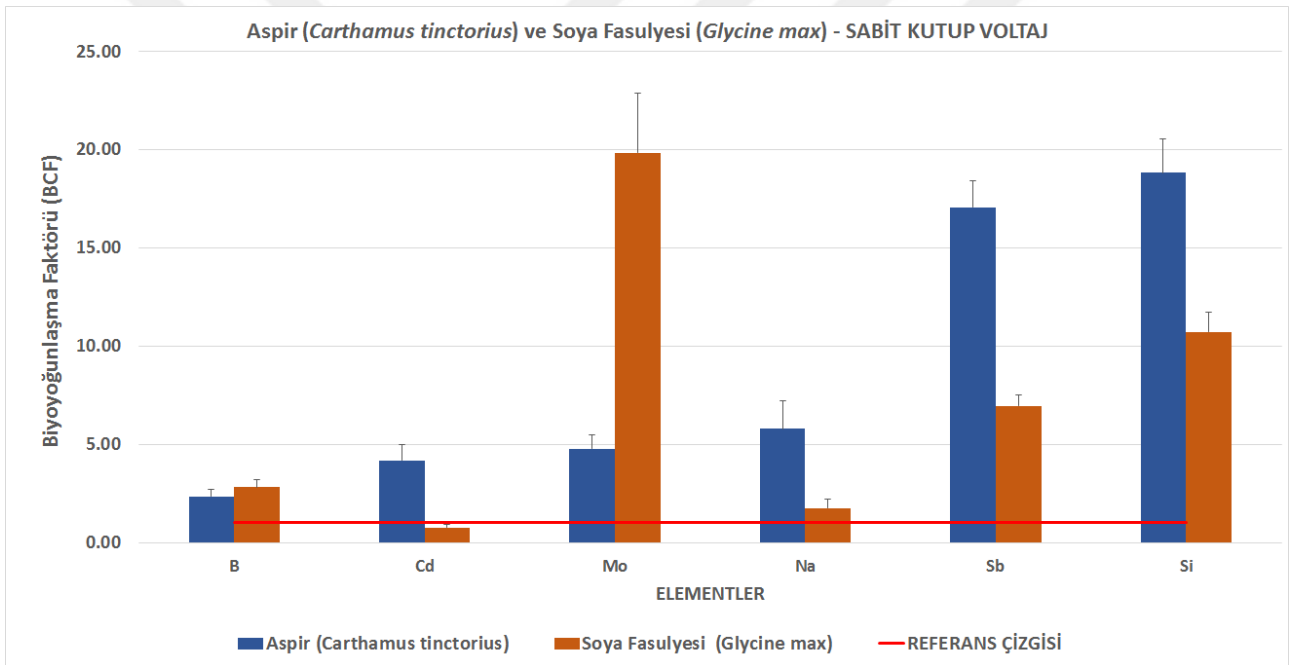


**Şekil 3.13:** Soya fasulyesi (*Glycine max*) bitkisi için  $BCF > 1$  olduğu elementler

### 3.3.2.3 Aspir (*Carthamus tinctorius*) ve Soya fasulyesi (*Glycine max*) bitkilerinin Biyoyoğunlaşma Faktörlerinin karşılaştırılması

İlk olarak, sabit kutup voltaj uygulaması yapılan aspir ve soya fasulyesi bitkilerinin Biyoyoğunlaşma Faktörleri ve buna bağlı olarak da fitoekstraksiyon yetenekleri karşılaştırılarak ele alınmıştır (Şekil 3.14 ve Tablo 3.16).

Sabit kutup voltaj uygulaması yapılan aspir bitkisi Cd, Na, Sb ve Si elementleri için daha yüksek BCF değerlerine sahipken, soya fasulyesi bitkisi B ve Mo elementleri için daha yüksek BCF değerlerine sahiptir. BCF değerinin yüksek olması, bitkinin fitoekstraksiyon yeteneği daha yüksek olduğu anlamına gelmektedir.



**Şekil 3.14:** Sabit kutuplu aspir (*Carthamus tinctorius*) ve soya fasulyesi (*Glycine max*) bitkilerinin Biyoyoğunlaşma Faktörleri karşılaştırması

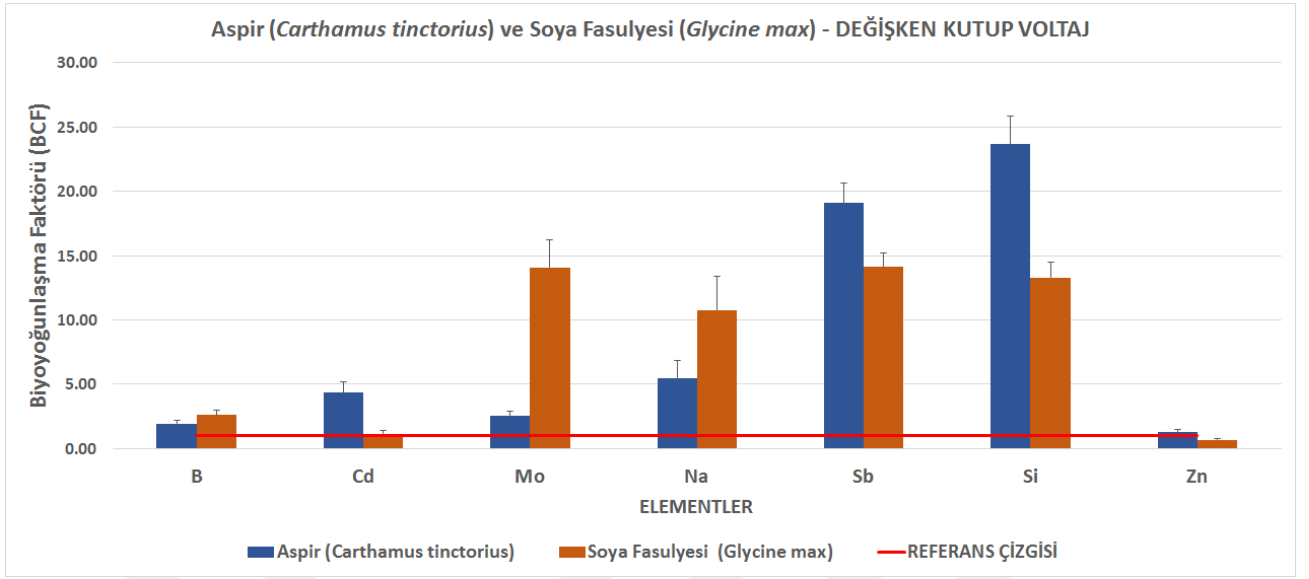
**Tablo 3.16:** Sabit kutuplu aspir (*Carthamus tinctorius*) ve Soya fasulyesi (*Glycine max*) bitkilerinin biyoyoğunlaşma faktörleri karşılaştırması

| Aspir ( <i>Carthamus tinctorius</i> ) ve Soya Fasulyesi ( <i>Glycine max</i> ) - SABİT KUTUP |                                          |                                             |                        |                                 |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------|---------------------------------------------|------------------------|---------------------------------|
| Elementler                                                                                   | Aspir<br>( <i>Carthamus tinctorius</i> ) | Soya<br>fasulyesi<br>( <i>Glycine max</i> ) | ± Aspir<br>belirsizlik | ± Soya fasulyesi<br>belirsizlik |
| <b>B</b>                                                                                     | <b>2.354</b>                             | <b>2.807</b>                                | <b>0.339</b>           | 0.404                           |
| <b>Cd</b>                                                                                    | <b>4.192</b>                             | 0.769                                       | <b>0.805</b>           | 0.148                           |
| <b>Mo</b>                                                                                    | <b>4.767</b>                             | <b>19.854</b>                               | <b>0.725</b>           | 3.018                           |
| <b>Na</b>                                                                                    | <b>5.797</b>                             | <b>1.759</b>                                | <b>1.438</b>           | 0.436                           |
| <b>Sb</b>                                                                                    | <b>17.074</b>                            | <b>6.958</b>                                | <b>1.332</b>           | 0.543                           |
| <b>Si</b>                                                                                    | <b>18.833</b>                            | <b>10.720</b>                               | <b>1.733</b>           | 0.986                           |

Değişken kutup voltaj uygulamasına tabi tutulan aspir ve soya fasulyesi bitkilerinin Biyoyoğunlaşma Faktörleri ve buna bağlı olarak da kirleticiler karşısında fitoekstraksiyon yetenekleri ele alınarak karşılaştırılmıştır (Tablo 3.17 ve Şekil 3.15). Değişken kutup voltaj uygulaması yapılan aspir bitkisinin BCF değerleri Cd, Sb, Si ve Zn elementleri için daha yüksek iken, soya fasulyesi bitkisinin BCF değerleri B, Mo ve Na elementleri için daha yüksektir.

**Tablo 3.17:** Değişken kutuplu voltaj uygulanan aspir (*Carthamus tinctorius*) ve soya fasulyesi (*Glycine max*) bitkilerinin Biyoyoğunlaşma Faktörleri karşılaştırması

| Aspir ( <i>Carthamus tinctorius</i> ) ve Soya Fasulyesi ( <i>Glycine max</i> ) - DEĞİŞKEN KUTUP |                                          |                                             |                                                        |                                                        |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------|---------------------------------------------|--------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|
| Elementler                                                                                      | Aspir<br>( <i>Carthamus tinctorius</i> ) | Soya<br>Fasulyesi<br>( <i>Glycine max</i> ) | ± Değişken<br>kutup voltaj<br>uygulanan<br>belirsizlik | ± Değişken<br>kutup voltaj<br>uygulanan<br>belirsizlik |
| <b>B</b>                                                                                        | <b>1,921</b>                             | <b>2,606</b>                                | 0,277                                                  | 0,375                                                  |
| <b>Cd</b>                                                                                       | <b>4,348</b>                             | <b>1,150</b>                                | 0,835                                                  | 0,221                                                  |
| <b>Mo</b>                                                                                       | <b>2,518</b>                             | <b>14,082</b>                               | 0,383                                                  | 2,140                                                  |
| <b>Na</b>                                                                                       | <b>5,466</b>                             | <b>10,755</b>                               | 1,356                                                  | 2,667                                                  |
| <b>Sb</b>                                                                                       | <b>19,125</b>                            | <b>14,134</b>                               | 1,492                                                  | 1,102                                                  |
| <b>Si</b>                                                                                       | <b>23,651</b>                            | <b>13,303</b>                               | 2,176                                                  | 1,224                                                  |
| <b>Zn</b>                                                                                       | <b>1,279</b>                             | 0,653                                       | 0,202                                                  | 0,103                                                  |



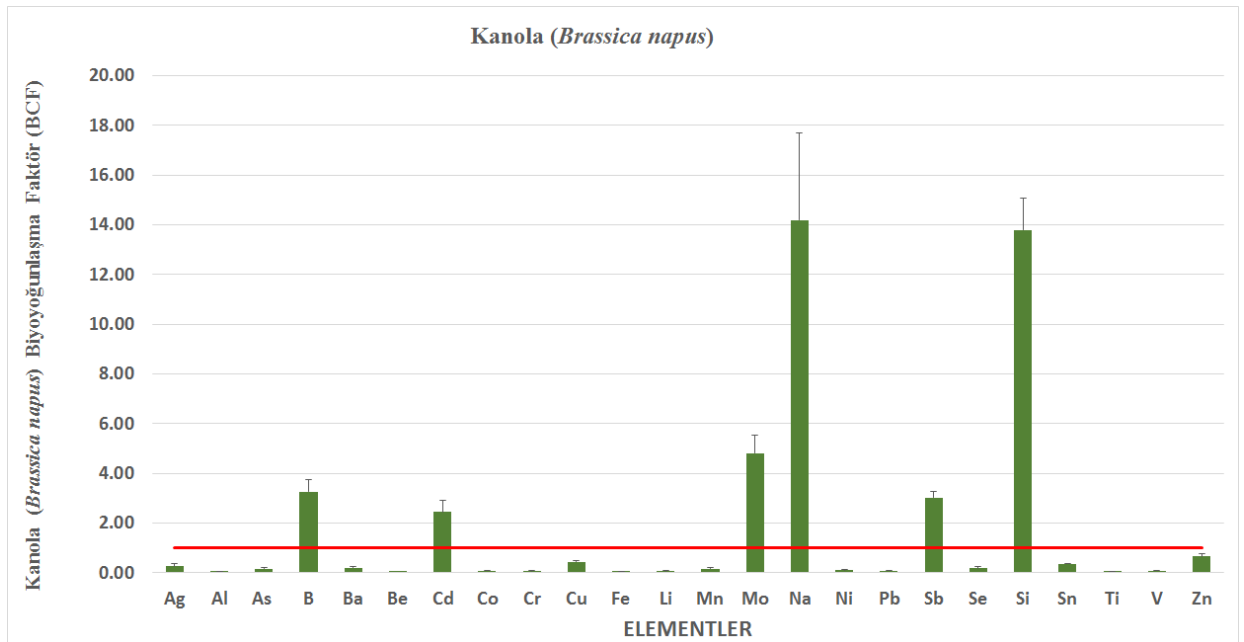
**Şekil 3.15:** Değişken kutuplu voltaj uygulanan aspir (*Carthamus tinctorius*) ve soya fasulyesi (*Glycine max*) bitkilerinin Biyoyöğünlaşma Faktörleri karşılaştırması

#### 3.3.2.4. Kanola (*Brassica napus*) bitkisi Biyoyöğünlaşma Faktörü

Kanola bitkisi voltaj uygulamasına dahil edilmemiştir. Bu bitki, Tablo 3.18 ve Şekil 3.16'dan görülebileceği gibi, B, Cd, Mo, Na, Sb ve Si elementleri için fitoekstraksiyon yeteneğine sahiptir.

**Tablo 3.18:** Kanola (*Brassica napus*) bitkisi Biyoyoğunlaşma Faktörü

| Kanola ( <i>Brassica napus</i> ) Biyoyoğunlaşma Faktörü |                                  |                                                |
|---------------------------------------------------------|----------------------------------|------------------------------------------------|
| Elementler                                              | Kanola ( <i>Brassica napus</i> ) | ± Kanola ( <i>Brassica napus</i> ) belirsizlik |
| Ag                                                      | 0,273                            | 0,117                                          |
| Al                                                      | 0,061                            | 0,009                                          |
| As                                                      | 0,163                            | 0,044                                          |
| B                                                       | <b>3,270</b>                     | 0,471                                          |
| Ba                                                      | 0,216                            | 0,036                                          |
| Be                                                      | 0,061                            |                                                |
| Cd                                                      | <b>2,444</b>                     | 0,469                                          |
| Co                                                      | 0,085                            | 0,017                                          |
| Cr                                                      | 0,070                            | 0,018                                          |
| Cu                                                      | 0,449                            | 0,053                                          |
| Fe                                                      | 0,063                            | 0,009                                          |
| Li                                                      | 0,065                            | 0,019                                          |
| Mn                                                      | 0,170                            | 0,036                                          |
| Mo                                                      | <b>4,818</b>                     | 0,732                                          |
| Na                                                      | <b>14,190</b>                    | 3,519                                          |
| Ni                                                      | 0,099                            | 0,029                                          |
| Pb                                                      | 0,093                            | 0,025                                          |
| Sb                                                      | <b>3,027</b>                     | 0,236                                          |
| Se                                                      | 0,189                            | 0,052                                          |
| Si                                                      | <b>13,787</b>                    | 1,268                                          |
| Sn                                                      | 0,360                            | 0,032                                          |
| Ti                                                      | 0,064                            | 0,007                                          |
| V                                                       | 0,093                            | 0,019                                          |
| Zn                                                      | 0,672                            | 0,106                                          |

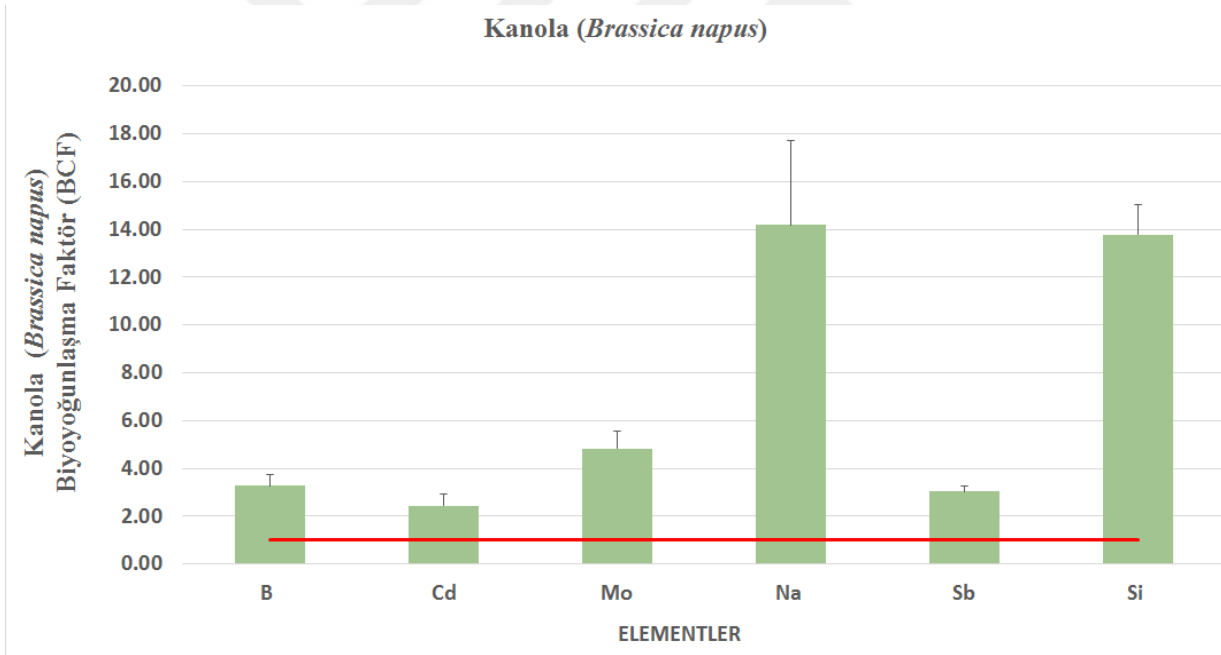


**Şekil 3.16:** Kanola (*Brassica napus*) bitkisinin 24 elemente ait Biyoyoğunlaşma Faktörü

Şekil 3.17 ve Tablo 3.19’de yalnızca, kanola bitkisinin fitoekstraktör olabileceği elementler gösterilmiştir. Üç farklı voltaj durumundan herhangi birisi için BCF>1 olması, bitkinin o element için ekstraktör olabileceği anlamına gelmektedir. Bu durumda, kanola bitkisi B, Cd, Mo, Na, Sb ve Si olmak üzere 6 element için bu potansiyele sahiptir.

**Tablo 3.19:** Kanola (*Brassica napus*) bitkisinin BCF>1 olduğu elementler

| ELEMENTLER | Kanola ( <i>Brassica napus</i> ) | ± Kanola ( <i>Brassica napus</i> ) belirsizlik |
|------------|----------------------------------|------------------------------------------------|
| B          | 3,270                            | 0,471                                          |
| Cd         | 2,444                            | 0,469                                          |
| Mo         | 4,818                            | 0,732                                          |
| Na         | 14,190                           | 3,519                                          |
| Sb         | 3,027                            | 0,236                                          |
| Si         | 13,787                           | 1,268                                          |



**Şekil 3.17:** Kanola (*Brassica napus*) bitkisinin BCF>1 olduğu elementler

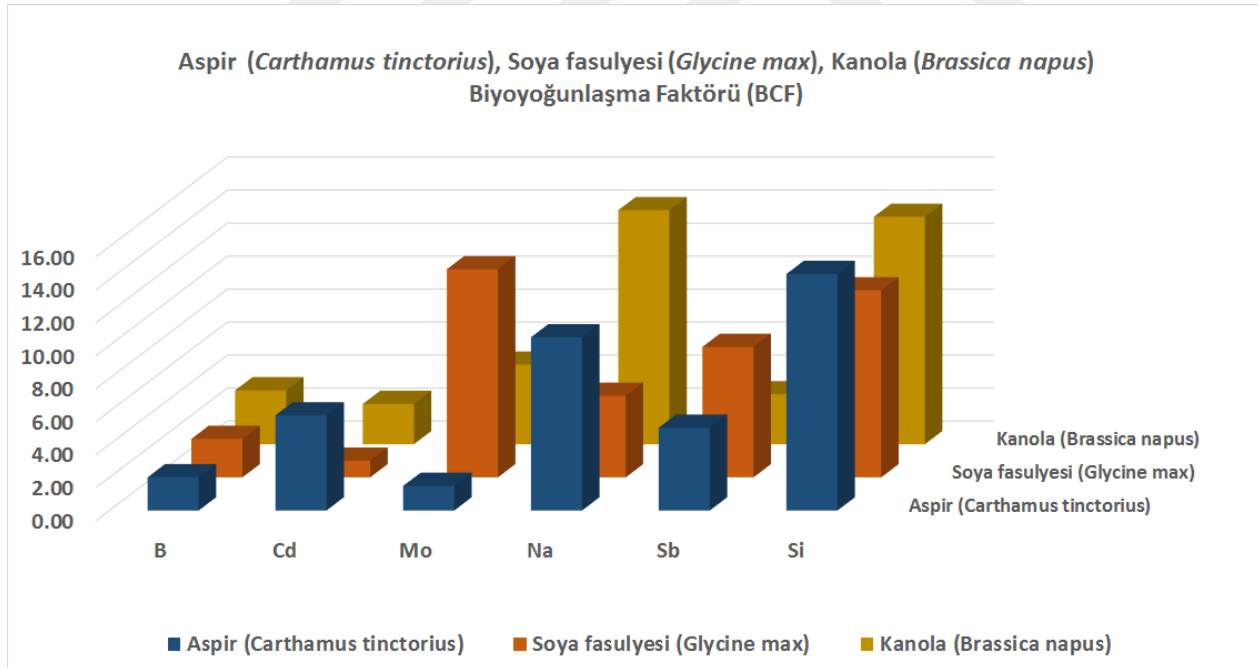
### 3.3.2.5. Aspir (*Carthamus tinctorius*), Soya fasulyesi (*Glycine max*) ve Kanola (*Brassica napus*) bitkilerinin Biyoöğünlaşma Faktörlerinin karşılaştırılması

Voltaj uygulaması yapılmayan aspir, soya fasulyesi ve kanola bitkilerinin Biyoöğünlaşma Faktörleri ve buna bağlı olarak da kirleticiler karşısındaki fitoekstraktör

yetenekleri ele alınarak karşılaştırılmıştır (Tablo 3.20 ve Şekil 3.18). B ve Na elementleri için kanola, Cd ve Si elementleri için aspir, Mo ve Sb elementleri için soya fasulyesi bitkileri en yüksek etkinliği göstermiştir. Mo, Na, Sb ve Si elementleri için oldukça yüksek BCF değerleri gözlenmiştir.

**Tablo 3.20:** Aspir (*Carthamus tinctorius*), Soya fasulyesi (*Glycine max*) ve Kanola (*Brassica napus*) bitkilerinin Biyoyoğunlaşma Faktörleri karşılaştırması

| ELEMENTLER | Aspir<br>( <i>Carthamus tinctorius</i> ) | ± Aspir<br>Belirsizlik | Soya<br>fasulyesi<br>( <i>Glycine max</i> ) | ± Soya<br>fasulyesi<br>Belirsizlik | Kanola<br>( <i>Brassica napus</i> ) | ± Kanola<br>Belirsizlik |
|------------|------------------------------------------|------------------------|---------------------------------------------|------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------|
| B          | 2,016                                    | 0,290                  | 2,333                                       | 0,336                              | 3,270                               | 0,471                   |
| Cd         | 5,768                                    | 1,107                  | 1,012                                       | 0,194                              | 2,444                               | 0,469                   |
| Mo         | 1,490                                    | 0,226                  | 12,620                                      | 1,918                              | 4,818                               | 0,732                   |
| Na         | 10,501                                   | 2,604                  | 4,945                                       | 1,226                              | 14,190                              | 3,519                   |
| Sb         | 5,014                                    | 0,391                  | 7,907                                       | 0,617                              | 3,027                               | 0,236                   |
| Si         | 14,344                                   | 1,320                  | 11,339                                      | 1,043                              | 13,787                              | 1,268                   |



**Şekil 3.18:** Aspir (*Carthamus tinctorius*), soya fasulyesi (*Glycine max*) ve kanola (*Brassica napus*) bitkilerinin Biyoyoğunlaşma Faktörleri karşılaştırması

### 3.3.3 Zenginleşme Katsayısı ( $EC_f$ )

Bir bitki için Zenginleşme Katsayısı ( $EC_f$ ), gövde ve yapraklardaki (toprak üstü kısımlar) ortalama kirletici konsantrasyonunun topraktakine oranıdır. Bu faktör, bir bitkinin hasat sonrası kirleticileri topraktan uzaklaştırma yeteneğinin bir göstergesi olup,  $EC_f > 1$  durumu, fitoekstraksiyon için bitkinin kullanılabilirliğinin yüksek olduğunu ifade eder (Madanan ve ark., 2020).

$$EC_f = \frac{\text{Bitkinin toprak üstü kısımlarındaki ortalama kirletici konsantrasyonu}}{\text{Toprağın ortalama kirletici konsantrasyonu}}$$

Her bitkinin yaprak, gövde ve köklerine ait olan element konsantrasyon değerlerinin belirsizlikleri, kullanılan analitik teknik ve cihaz için verilen % değerlerden hesaplanmıştır. Ölçüm sonuçlarının hesaplamalarda kullanımında, her bir element konsantrasyonuna ait % belirsizlik değerleri de uygun formüllerle hesaplamalara dahil edilmiştir. Zenginleşme Katsayısı hesabında, yaprak ve gövdedeki ortalama kirletici konsantrasyonunun topraktakine oranı belirlenmiştir. Bu oranın sayısal değerinin belirsizliğini hesaplamak için aşağıda verilen matematiksel formüller kullanılmıştır.

$$\Delta A = \frac{1}{2} * (ykbo + gkbo)$$

$$\Delta f = \frac{1}{T7} * \Delta A + \frac{\frac{(ykk + gkk)/2}{2}}{(T7)^2 * T7B}$$

*ykbo*: yapraktaki elementin belirsizliği

*gkbo*: gövdedeki elementin belirsizliği

*ykk*: yapraktaki elementin konsantrasyonu

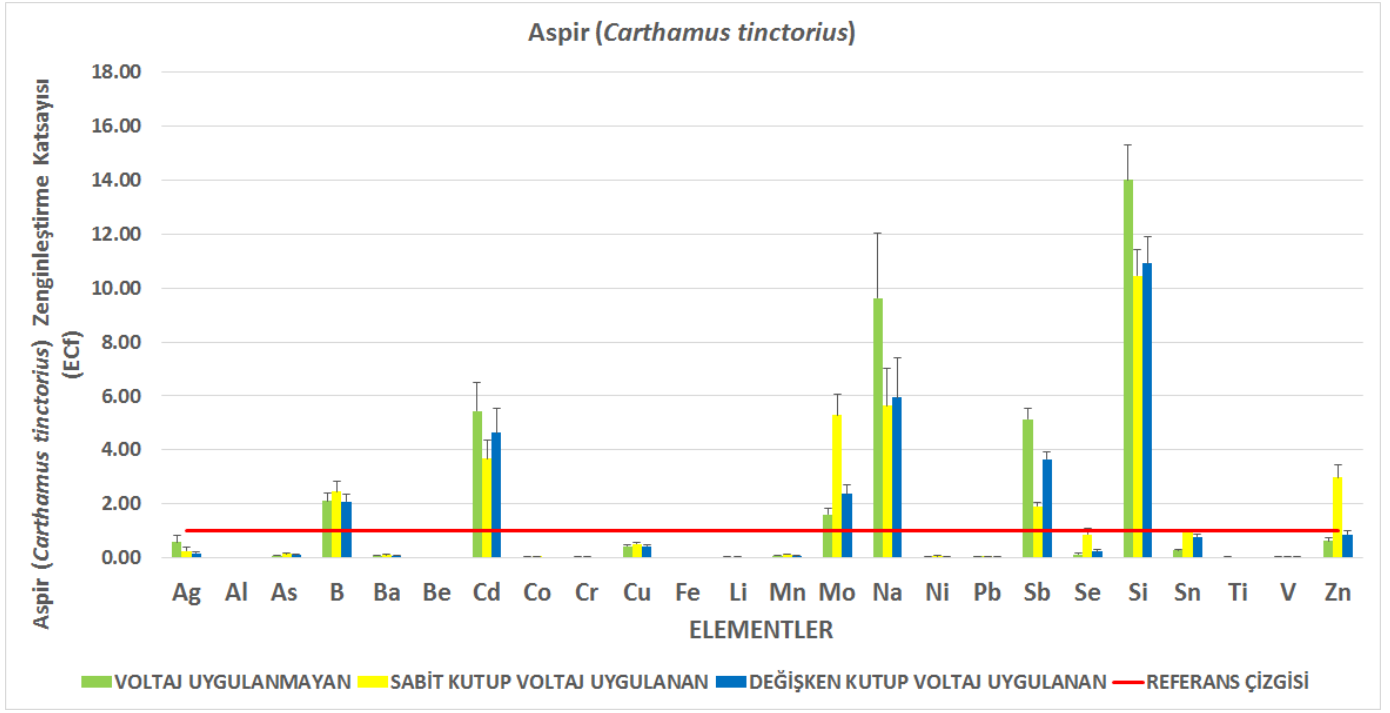
*gkk*: gövdedeki elementin konsantrasyonu

*T7*: şahit numune toprağındaki elementin konsantrasyonu

*T7B*: şahit numune toprağındaki element konsantrasyonunun belirsizliği

### 3.3.3.1. Aspir (*Carthamus tinctorius*) bitkisi Zenginleşme Katsayısı

Bir bitki için  $EC_f > 1$  durumu, bitkinin o element için fitoekstraksiyon yeteneğini ifade etmektedir. Tablo 3.21 ve Şekil 3.19'den anlaşılabileceği gibi, aspir bitkisi B, Cd, Mo, Na, Sb, Si ve Zn elementleri için fitoekstraksiyon yeteneğine sahiptir.



Şekil 3.19: Aspir (*Carthamus tinctorius*) bitkisinin 24 elemente ait Zenginleşme Katsayısı

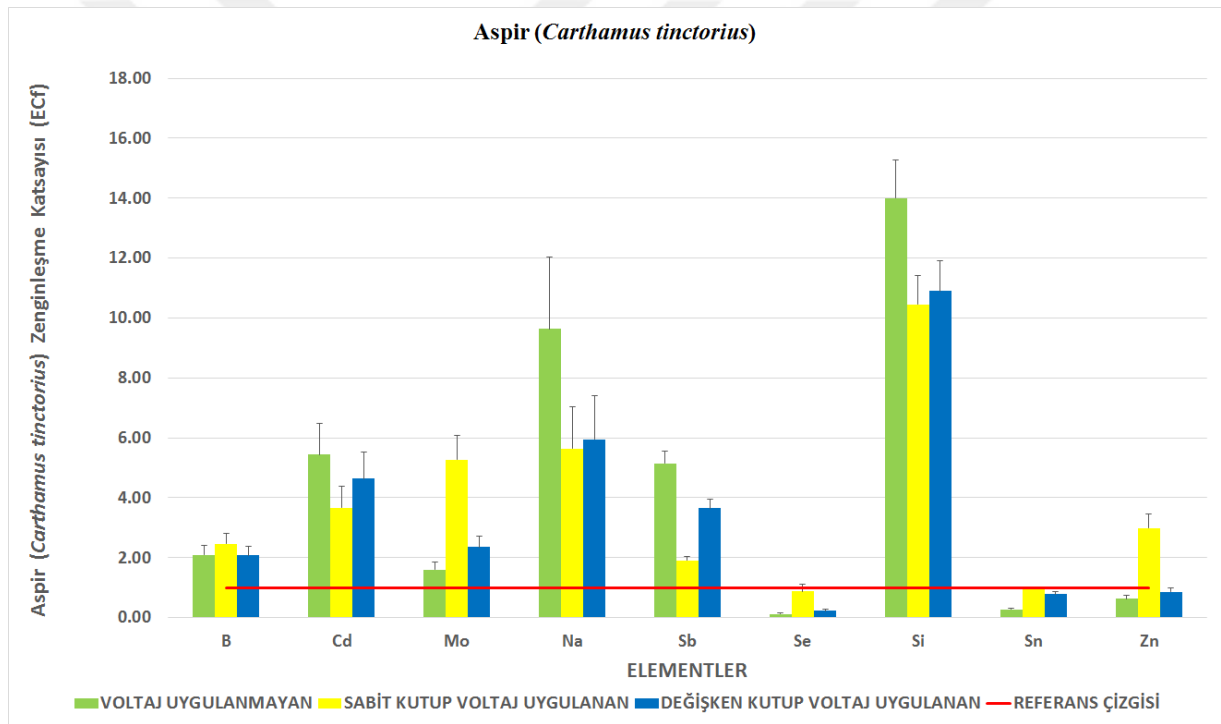
**Tablo 3.21:** Aspir (*Carthamus tinctorius*) bitkisi Zenginleşme Katsayısı

| <b>Aspir (<i>Carthamus tinctorius</i>) bitkisi Zenginleşme Katsayısı (EC<sub>f</sub>)</b> |                            |                                     |                                        |                                          |                                                   |                                                      |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------|-------------------------------------|----------------------------------------|------------------------------------------|---------------------------------------------------|------------------------------------------------------|
| <b>Elementler</b>                                                                         | <b>Voltaj uygulanmayan</b> | <b>Sabit kutup voltaj uygulanan</b> | <b>Değişken kutup voltaj uygulanan</b> | <b>± Voltaj uygulanmayan belirsizlik</b> | <b>± Sabit kutup voltaj uygulanan belirsizlik</b> | <b>± Değişken kutup voltaj uygulanan belirsizlik</b> |
| <b>Ag</b>                                                                                 | 0,590                      | 0,263                               | 0,170                                  | 0,253                                    | 0,113                                             | 0,073                                                |
| <b>Al</b>                                                                                 | 0,018                      | 0,013                               | 0,012                                  | 0,003                                    | 0,002                                             | 0,002                                                |
| <b>As</b>                                                                                 | 0,085                      | 0,153                               | 0,101                                  | 0,023                                    | 0,041                                             | 0,027                                                |
| <b>B</b>                                                                                  | <b>2,102</b>               | <b>2,463</b>                        | <b>2,075</b>                           | 0,303                                    | 0,355                                             | 0,299                                                |
| <b>Ba</b>                                                                                 | 0,085                      | 0,104                               | 0,073                                  | 0,014                                    | 0,017                                             | 0,012                                                |
| <b>Be</b>                                                                                 | 0,018                      | 0,038                               | 0,013                                  |                                          |                                                   |                                                      |
| <b>Cd</b>                                                                                 | <b>5,437</b>               | <b>3,674</b>                        | <b>4,635</b>                           | 1,044                                    | 0,705                                             | 0,890                                                |
| <b>Co</b>                                                                                 | 0,027                      | 0,049                               | 0,020                                  | 0,006                                    | 0,010                                             | 0,004                                                |
| <b>Cr</b>                                                                                 | 0,021                      | 0,027                               | 0,015                                  | 0,006                                    | 0,007                                             | 0,004                                                |
| <b>Cu</b>                                                                                 | 0,436                      | 0,510                               | 0,431                                  | 0,051                                    | 0,060                                             | 0,051                                                |
| <b>Fe</b>                                                                                 | 0,021                      | 0,019                               | 0,016                                  | 0,003                                    | 0,003                                             | 0,002                                                |
| <b>Li</b>                                                                                 | 0,024                      | 0,020                               | 0,017                                  | 0,007                                    | 0,006                                             | 0,005                                                |
| <b>Mn</b>                                                                                 | 0,074                      | 0,127                               | 0,067                                  | 0,016                                    | 0,027                                             | 0,014                                                |
| <b>Mo</b>                                                                                 | <b>1,600</b>               | <b>5,278</b>                        | <b>2,361</b>                           | 0,243                                    | 0,802                                             | 0,359                                                |
| <b>Na</b>                                                                                 | <b>9,635</b>               | <b>5,641</b>                        | <b>5,947</b>                           | 2,389                                    | 1,399                                             | 1,475                                                |
| <b>Ni</b>                                                                                 | 0,044                      | 0,069                               | 0,036                                  | 0,013                                    | 0,020                                             | 0,010                                                |
| <b>Pb</b>                                                                                 | 0,053                      | 0,049                               | 0,042                                  | 0,014                                    | 0,013                                             | 0,011                                                |
| <b>Sb</b>                                                                                 | <b>5,142</b>               | <b>1,906</b>                        | <b>3,658</b>                           | 0,401                                    | 0,149                                             | 0,285                                                |
| <b>Se</b>                                                                                 | 0,125                      | 0,872                               | 0,233                                  | 0,034                                    | 0,239                                             | 0,064                                                |
| <b>Si</b>                                                                                 | <b>13,996</b>              | <b>10,450</b>                       | <b>10,909</b>                          | 1,288                                    | 0,961                                             | 1,004                                                |
| <b>Sn</b>                                                                                 | 0,277                      | 0,947                               | 0,785                                  | 0,025                                    | 0,085                                             | 0,071                                                |
| <b>Ti</b>                                                                                 | 0,025                      | 0,017                               | 0,020                                  | 0,003                                    | 0,002                                             | 0,002                                                |
| <b>V</b>                                                                                  | 0,033                      | 0,041                               | 0,034                                  | 0,007                                    | 0,008                                             | 0,007                                                |
| <b>Zn</b>                                                                                 | 0,630                      | <b>2,988</b>                        | 0,862                                  | 0,100                                    | 0,472                                             | 0,136                                                |

Şekil 3.20 ve Tablo 3.22’de yalnızca, aspir bitkisinin fitoekstraktör olabileceği elementler gösterilmiştir. Üç farklı voltaj durumundan herhangi birisi için EC<sub>f</sub> >1 olması, bitkinin o element için fitoekstraktör olabileceği anlamına gelmektedir. Bu durumda, aspir bitkisi B, Cd, Mo, Na, Sb, Si ve Zn olmak üzere 7 element için bu potansiyele sahiptir. Görüldüğü gibi, Cd, Na, Sb ve Si elementlerinin fitoekstraksiyonu için voltaj uygulaması yapılmayan, B, Mo ve Zn elementleri için sabit kutuplu voltaj uygulamasına tabi tutulan aspir (*Carthamus tinctorius*) bitkisi daha etkilidir.

**Tablo 3.22:** Aspir (*Carthamus tinctorius*) bitkisi için  $EC_f > 1$  olan elementler

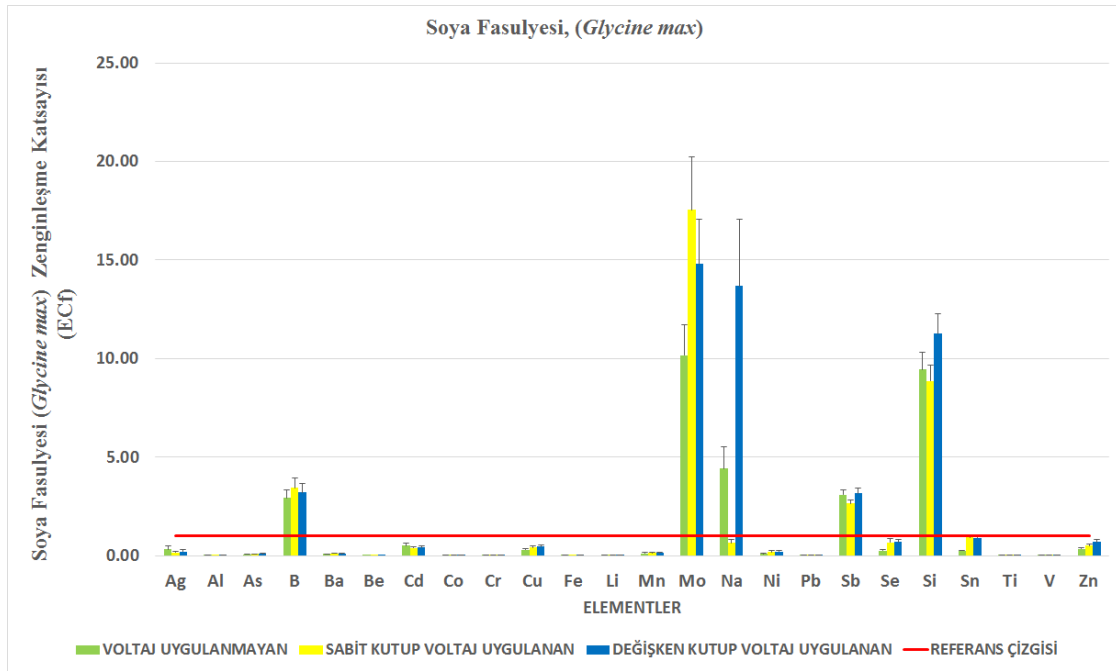
| Aspir ( <i>Carthamus tinctorius</i> ) bitkisi Zenginleşme Katsayısı ( $EC_f$ ) |                     |                              |                                 |                                       |                                                |                                                   |
|--------------------------------------------------------------------------------|---------------------|------------------------------|---------------------------------|---------------------------------------|------------------------------------------------|---------------------------------------------------|
| Elementler                                                                     | Voltaj uygulanmayan | Sabit kutup voltaj uygulanan | Değişken kutup voltaj uygulanan | $\pm$ Voltaj uygulanmayan belirsizlik | $\pm$ Sabit kutup voltaj uygulanan belirsizlik | $\pm$ Değişken kutup voltaj uygulanan belirsizlik |
| B                                                                              | 2,102               | 2,463                        | 2,075                           | 0,303                                 | 0,355                                          | 0,299                                             |
| Cd                                                                             | 5,437               | 3,674                        | 4,635                           | 1,044                                 | 0,705                                          | 0,890                                             |
| Mo                                                                             | 1,600               | 5,278                        | 2,361                           | 0,243                                 | 0,802                                          | 0,359                                             |
| Na                                                                             | 9,635               | 5,641                        | 5,947                           | 2,389                                 | 1,399                                          | 1,475                                             |
| Sb                                                                             | 5,142               | 1,906                        | 3,658                           | 0,401                                 | 0,149                                          | 0,285                                             |
| Si                                                                             | 13,996              | 10,450                       | 10,909                          | 1,288                                 | 0,961                                          | 1,004                                             |
| Zn                                                                             | 0,630               | 2,988                        | 0,862                           | 0,100                                 | 0,472                                          | 0,136                                             |



**Şekil 3.20:** Aspir (*Carthamus tinctorius*) bitkisi için  $EC_f > 1$  olan elementler

### 3.3.3.2. Soya fasulyesi (*Glycine max*) bitkisi Zenginleşme Katsayısı

Soya fasulyesi bitkisi için  $EC_f > 1$  olan elementler B, Mo, Na, Sb ve Si olup, soya fasulyesi bitkisi bu elementler için fitoekstraksiyon yeteneğine sahiptir (Şekil 3.21 ve Tablo 3.23).



**Şekil 3.21:** Soya fasulyesi (*Glycine max*) bitkisinin 24 elemente ait Zenginleşme Katsayısı

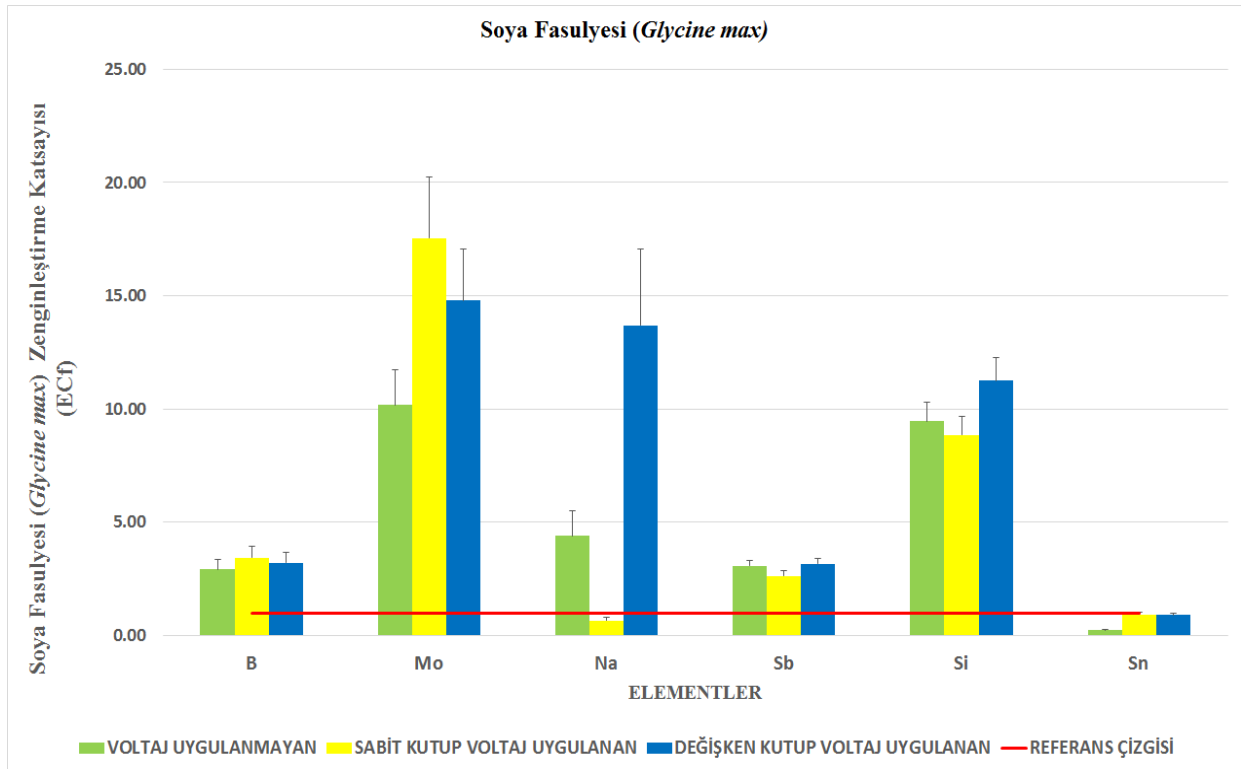
**Tablo 3.23:** Soya fasulyesi (*Glycine max*) bitkisinin Zenginleştirme Katsayısı değerleri

| Soya Fasulyesi ( <i>Glycine max</i> ) bitkisi Zenginleşme Katsayısı (ECf) |                     |                              |                                 |                                   |                                            |                                               |
|---------------------------------------------------------------------------|---------------------|------------------------------|---------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------------------|-----------------------------------------------|
| Elementler                                                                | Voltaj uygulanmayan | Sabit kutup voltaj uygulanan | Değişken kutup voltaj uygulanan | ± Voltaj uygulanmayan belirsizlik | ± Sabit kutup voltaj uygulanan belirsizlik | ± Değişken kutup voltaj uygulanan belirsizlik |
| Ag                                                                        | 0.333               | 0.154                        | 0.204                           | 0.143                             | 0.066                                      | 0.087                                         |
| Al                                                                        | 0.009               | 0.005                        | 0.011                           | 0.001                             | 0.001                                      | 0.002                                         |
| As                                                                        | 0.068               | 0.080                        | 0.091                           | 0.018                             | 0.021                                      | <b>0.025</b>                                  |
| B                                                                         | <b>2.933</b>        | <b>3.437</b>                 | <b>3.219</b>                    | 0.422                             | 0.495                                      | 0.463                                         |
| Ba                                                                        | 0.080               | 0.120                        | 0.098                           | 0.013                             | 0.020                                      | 0.016                                         |
| Be                                                                        | 0.012               | 0.019                        | 0.018                           |                                   |                                            |                                               |
| Cd                                                                        | 0.519               | 0.383                        | 0.408                           | 0.100                             | 0.074                                      | 0.078                                         |
| Co                                                                        | 0.019               | 0.029                        | 0.036                           | 0.004                             | 0.006                                      | 0.007                                         |
| Cr                                                                        | 0.011               | 0.016                        | 0.016                           | 0.003                             | 0.004                                      | 0.004                                         |
| Cu                                                                        | 0.305               | 0.427                        | 0.472                           | 0.036                             | 0.050                                      | 0.056                                         |
| Fe                                                                        | 0.011               | 0.007                        | 0.013                           | 0.002                             | 0.001                                      | 0.002                                         |
| Li                                                                        | 0.017               | 0.011                        | 0.028                           | 0.005                             | 0.003                                      | 0.008                                         |
| Mn                                                                        | 0.125               | 0.128                        | 0.142                           | 0.026                             | 0.027                                      | 0.030                                         |
| Mo                                                                        | <b>10.175</b>       | <b>17.556</b>                | <b>14.802</b>                   | 1.547                             | 2.668                                      | 2.250                                         |
| Na                                                                        | <b>4.410</b>        | 0.658                        | <b>13.690</b>                   | 1.094                             | 0.163                                      | 3.395                                         |
| Ni                                                                        | 0.094               | 0.193                        | 0.211                           | 0.028                             | 0.057                                      | 0.062                                         |
| Pb                                                                        | 0.030               | 0.027                        | 0.036                           | 0.008                             | 0.007                                      | 0.010                                         |
| Sb                                                                        | <b>3.084</b>        | <b>2.641</b>                 | <b>3.162</b>                    | 0.241                             | 0.206                                      | 0.247                                         |
| Se                                                                        | 0.252               | 0.678                        | 0.690                           | 0.042                             | 0.173                                      | 0.150                                         |
| Si                                                                        | <b>9.452</b>        | <b>8.854</b>                 | <b>11.251</b>                   | 0.870                             | 0.815                                      | 1.035                                         |
| Sn                                                                        | 0.244               | 0.933                        | 0.905                           | 0.022                             | <b>0.084</b>                               | 0.081                                         |
| Ti                                                                        | 0.016               | 0.011                        | 0.021                           | 0.002                             | <b>0.001</b>                               | 0.002                                         |
| V                                                                         | 0.031               | 0.026                        | 0.034                           | 0.006                             | <b>0.005</b>                               | 0.007                                         |
| Zn                                                                        | 0.349               | 0.514                        | 0.698                           | 0.055                             | <b>0.081</b>                               | 0.110                                         |

Şekil 3.22 ve Tablo 3.24’de yalnızca, soya fasulyesi bitkisinin fitoekstraktör olabileceği elementler gösterilmiştir. Üç farklı voltaj durumundan herhangi birisi için  $EC_f > 1$  olması, bitkinin o element için fitoekstraktör olabileceği anlamına gelmektedir. Bu durumda, soya fasulyesi bitkisi B, Mo, Na, Sb ve Si olmak üzere 5 element için bu potansiyele sahiptir. Görüldüğü gibi, B ve Mo elementlerinin fitoekstraksiyonu için sabit kutuplu voltaj uygulamasına tabi tutulan, Na, Sb ve Si elementlerinin fitoekstraksiyonu için değişken kutuplu voltaj uygulamasına tabi tutulan soya fasulyesi bitkisi daha etkilidir. Özellikle Mo, Na ve Si için oldukça yüksek  $EC_f$  değerleri söz konusudur.

**Tablo 3.24:** Soya fasulyesi (*Glycine max*) bitkisi için  $EC_f > 1$  olan elementler

| Elementler | Soya Fasulyesi ( <i>Glycine max</i> ) bitkisi Zenginleşme Katsayısı ( $EC_f$ ) |                              |                                 |                                   |                                            |                                               |
|------------|--------------------------------------------------------------------------------|------------------------------|---------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------------------|-----------------------------------------------|
|            | Voltaj uygulanmayan                                                            | Sabit kutup voltaj uygulanan | Değişken kutup voltaj uygulanan | ± Voltaj uygulanmayan belirsizlik | ± Sabit kutup voltaj uygulanan belirsizlik | ± Değişken kutup voltaj uygulanan belirsizlik |
| <b>B</b>   | 2,933                                                                          | 3,437                        | 3,219                           | 0,422                             | 0,495                                      | 0,463                                         |
| <b>Mo</b>  | 10,175                                                                         | 17,556                       | 14,802                          | 1,547                             | 2,668                                      | 2,250                                         |
| <b>Na</b>  | 4,410                                                                          | 0,658                        | 13,690                          | 1,094                             | 0,163                                      | 3,395                                         |
| <b>Sb</b>  | 3,084                                                                          | 2,641                        | 3,162                           | 0,241                             | 0,206                                      | 0,247                                         |
| <b>Si</b>  | 9,452                                                                          | 8,854                        | 11,251                          | 0,870                             | 0,815                                      | 1,035                                         |

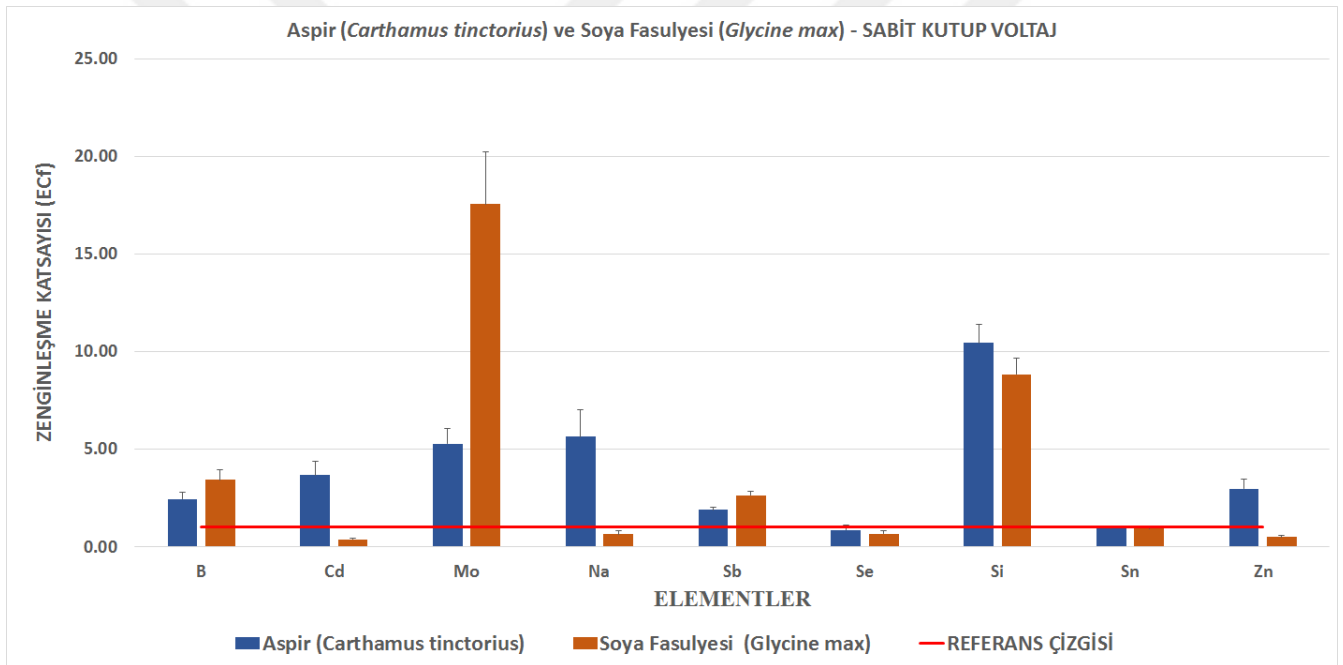


**Şekil 3.22:** Soya fasulyesi (*Glycine max*) bitkisi için  $EC_f > 1$  olan elementler

### 3.3.3.3 Aspir (*Carthamus tinctorius*) ve Soya fasulyesi (*Glycine max*) bitkilerinin Zenginleşme Katsayılarının karşılaştırılması

İlk olarak, sabit kutup voltaj uygulaması yapılan aspir ve soya fasulyesi bitkilerinin zenginleşme katsayıları ve buna bağlı olarak da fitoekstraksiyon yetenekleri ele alınarak karşılaştırılmıştır (Şekil 3.23 ve Tablo 3.25).

Sabit kutup voltaj uygulaması yapılan aspir bitkisi Cd, Na, Si ve Zn elementleri için daha yüksek  $EC_f$  değerlerine sahipken, soya fasulyesi bitkisi B, Mo ve Sb elementleri için daha yüksek  $EC_f$  değerlerine sahiptir.  $EC_f$  değerinin yüksek olması, bitkinin fitoekstraksiyon yeteneğinin daha yüksek olduğu anlamına gelmektedir.



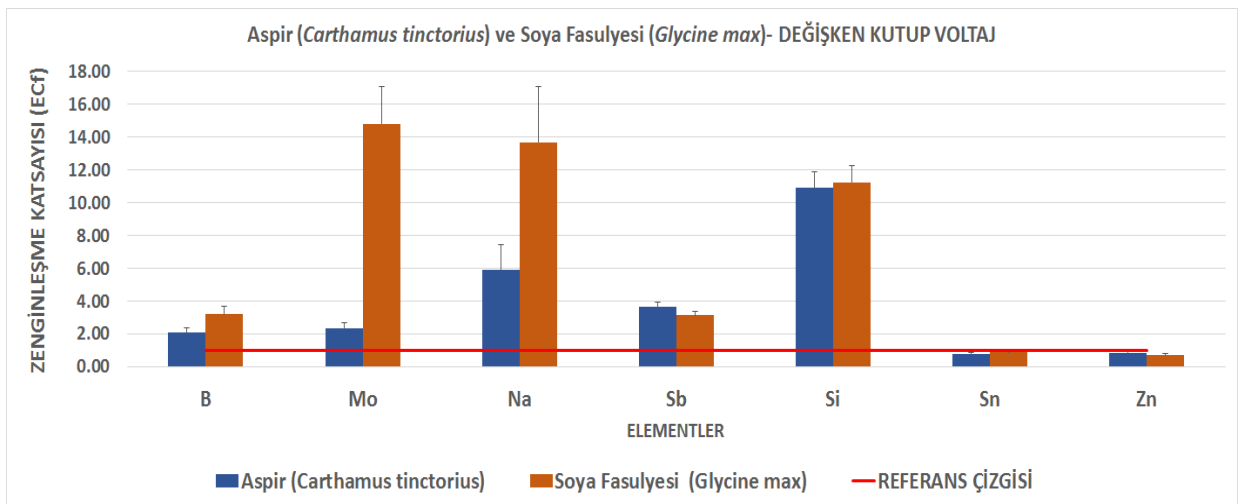
**Şekil 3.23:** Sabit kutuplu aspir (*Carthamus tinctorius*) ve soya fasulyesi (*Glycine max*) bitkilerinin Zenginleşme Katsayısı karşılaştırması

**Tablo 3.25:** Sabit kutuplu DC voltaj uygulanan aspir (*Carthamus tinctorius*) ve soya fasulyesi (*Glycine max*) bitkilerinin Zenginleşme Katsayısı karşılaştırması

| Elementler | Aspir<br>( <i>Carthamus tinctorius</i> ) | Soya Fasulyesi<br>( <i>Glycine max</i> ) | ± Aspir belirsizlik | ± Soya fasulyesi belirsizlik |
|------------|------------------------------------------|------------------------------------------|---------------------|------------------------------|
| <b>B</b>   | <b>2,463</b>                             | <b>3,437</b>                             | 0,355               | 0,495                        |
| <b>Cd</b>  | <b>3,674</b>                             | 0,383                                    | 0,705               | 0,074                        |
| <b>Mo</b>  | <b>5,278</b>                             | <b>17,556</b>                            | 0,802               | 2,668                        |
| <b>Na</b>  | <b>5,641</b>                             | 0,658                                    | 1,399               | 0,163                        |
| <b>Sb</b>  | <b>1,906</b>                             | <b>2,641</b>                             | 0,149               | 0,206                        |
| <b>Si</b>  | <b>10,450</b>                            | <b>8,854</b>                             | 0,961               | 0,815                        |
| <b>Zn</b>  | <b>2,988</b>                             | 0,514                                    | 0,472               | 0,081                        |

İkinci olarak, değişken kutup voltaj uygulaması yapılan aspir ve soya fasulyesi bitkilerinin Zenginleşme Katsayıları ve buna bağlı olarak da fitoekstraksiyon yetenekleri ele alınarak karşılaştırılmıştır (Şekil 3.24 ve Tablo 3.26).

Değişken kutup voltaj uygulaması yapılan aspir bitkisi Sb elementi için daha yüksek  $EC_f$  değerine sahipken, soya fasulyesi bitkisi B, Mo, Na ve Si elementleri için daha yüksek  $EC_f$  değerlerine sahiptir.  $EC_f$  değerinin yüksek olması, bitkinin fitoekstraksiyon yeteneğinin daha yüksek olduğu anlamına gelmektedir.



**Şekil 3.24:** Değişken kutuplu DC voltaj uygulanan aspir (*Carthamus tinctorius*) ve soya fasulyesi (*Glycine max*) bitkilerinin Zenginleşme Katsayısı karşılaştırması

**Tablo 3.26:** Değişken kutuplu DC voltaj uygulanan aspir (*Carthamus tinctorius*) ve soya fasulyesi (*Glycine max*) bitkilerinin Zenginleşme Katsayısı karşılaştırması

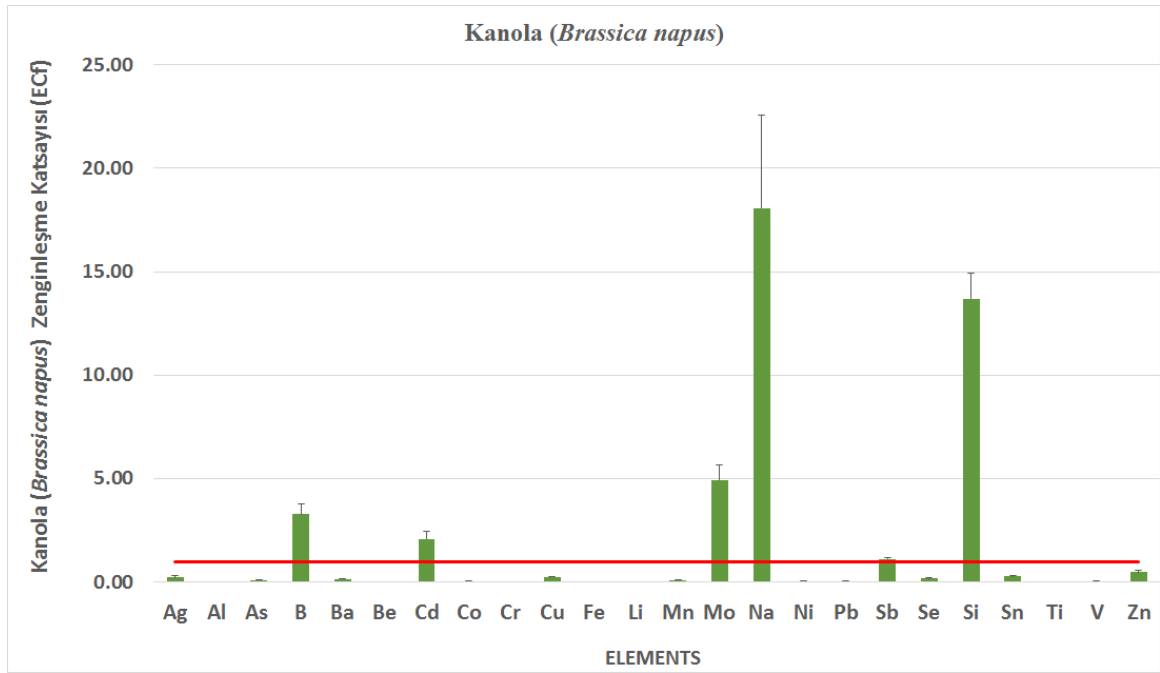
| Elementler | Aspir<br>( <i>Carthamus tinctorius</i> ) | Soya fasulyesi<br>( <i>Glycine max</i> ) | ± Aspir belirsizlik | ± Soya fasulyesi belirsizlik |
|------------|------------------------------------------|------------------------------------------|---------------------|------------------------------|
| <b>B</b>   | <b>2,075</b>                             | <b>3,219</b>                             | 0,299               | 0,463                        |
| <b>Mo</b>  | <b>2,361</b>                             | <b>14,802</b>                            | 0,359               | 2,250                        |
| <b>Na</b>  | <b>5,947</b>                             | <b>13,690</b>                            | 1,475               | 3,395                        |
| <b>Sb</b>  | <b>3,658</b>                             | <b>3,162</b>                             | 0,285               | 0,247                        |
| <b>Si</b>  | <b>10,909</b>                            | <b>11,251</b>                            | 1,004               | 1,035                        |

### 3.3.3.4 Kanola bitkisi Zenginleştirme Katsayısı değerleri

Kanola bitkisi voltaj uygulamasına dahil edilmemiştir. Bu bitki, Tablo 3.27 ve Şekil 3.25’den görülebileceği gibi, B, Cd, Mo, Na, Sb ve Si elementleri için fitoekstraksiyon yeteneğine sahiptir.

**Tablo 3.27:** Kanola (*Brassica napus*) bitkisi Zenginleşme Katsayısı

| Elementler | Kanola ( <i>Brassica napus</i> ) | ± Kanola ( <i>Brassica napus</i> ) Belirsizlik |
|------------|----------------------------------|------------------------------------------------|
| <b>Ag</b>  | 0,227                            | 0,097                                          |
| <b>Al</b>  | 0,015                            | 0,002                                          |
| <b>As</b>  | 0,102                            | 0,028                                          |
| <b>B</b>   | <b>3,285</b>                     | 0,473                                          |
| <b>Ba</b>  | 0,148                            | 0,025                                          |
| <b>Be</b>  | 0,017                            |                                                |
| <b>Cd</b>  | <b>2,075</b>                     | 0,398                                          |
| <b>Co</b>  | 0,033                            | 0,007                                          |
| <b>Cr</b>  | 0,024                            | 0,006                                          |
| <b>Cu</b>  | 0,249                            | 0,029                                          |
| <b>Fe</b>  | 0,018                            | 0,003                                          |
| <b>Li</b>  | 0,024                            | 0,007                                          |
| <b>Mn</b>  | 0,091                            | 0,019                                          |
| <b>Mo</b>  | <b>4,935</b>                     | 0,75                                           |
| <b>Na</b>  | <b>18,074</b>                    | 4,482                                          |
| <b>Ni</b>  | 0,046                            | 0,014                                          |
| <b>Pb</b>  | 0,038                            | 0,01                                           |
| <b>Sb</b>  | <b>1,111</b>                     | 0,087                                          |
| <b>Se</b>  | 0,180                            | 0,049                                          |
| <b>Si</b>  | <b>13,683</b>                    | 1,259                                          |
| <b>Sn</b>  | 0,270                            | 0,024                                          |
| <b>Ti</b>  | 0,030                            | 0,003                                          |
| <b>V</b>   | 0,041                            | 0,008                                          |
| <b>Zn</b>  | 0,479                            | 0,076                                          |

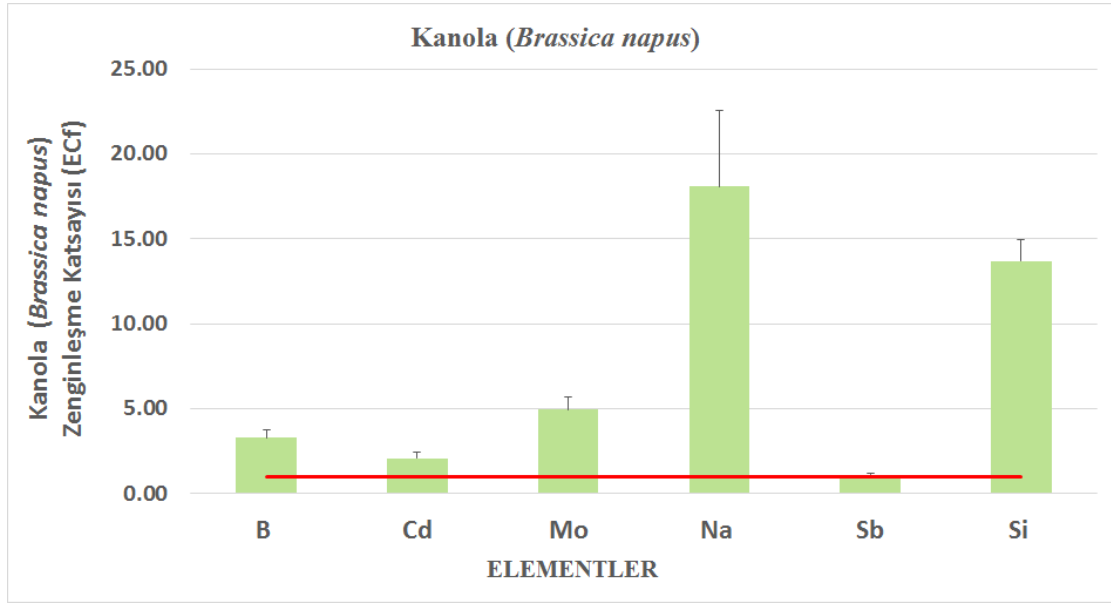


**Şekil 3.25:** Kanola (*Brassica napus*) bitkisinin 24 elemente ait Zenginleşme Katsayısı değerleri

Şekil 3.26 ve Tablo 3.28’de yalnızca, kanola bitkisinin fitoekstraktör olabileceği elementler gösterilmiştir. Üç farklı voltaj durumundan herhangi birisi için  $EC_f > 1$  olması, bitkinin o element için fitoekstraktör olabileceği anlamına gelmektedir. Bu durumda, kanola bitkisi B, Cd, Mo, Na, Sb ve Si olmak üzere 6 element için bu potansiyele sahiptir. Özellikle Na ve Si elementleri için oldukça yüksek değerler söz konusudur.

**Tablo 3.28:** Kanola (*Brassica napus*) bitkisi için  $EC_f > 1$  olan elementler

| Elementler | Kanola        | ± Kanola belirsizlik |
|------------|---------------|----------------------|
| <b>B</b>   | <b>3,285</b>  | 0,473                |
| <b>Cd</b>  | <b>2,075</b>  | 0,398                |
| <b>Mo</b>  | <b>4,935</b>  | 0,75                 |
| <b>Na</b>  | <b>18,074</b> | 4,482                |
| <b>Sb</b>  | <b>1,111</b>  | 0,087                |
| <b>Si</b>  | <b>13,683</b> | 1,259                |



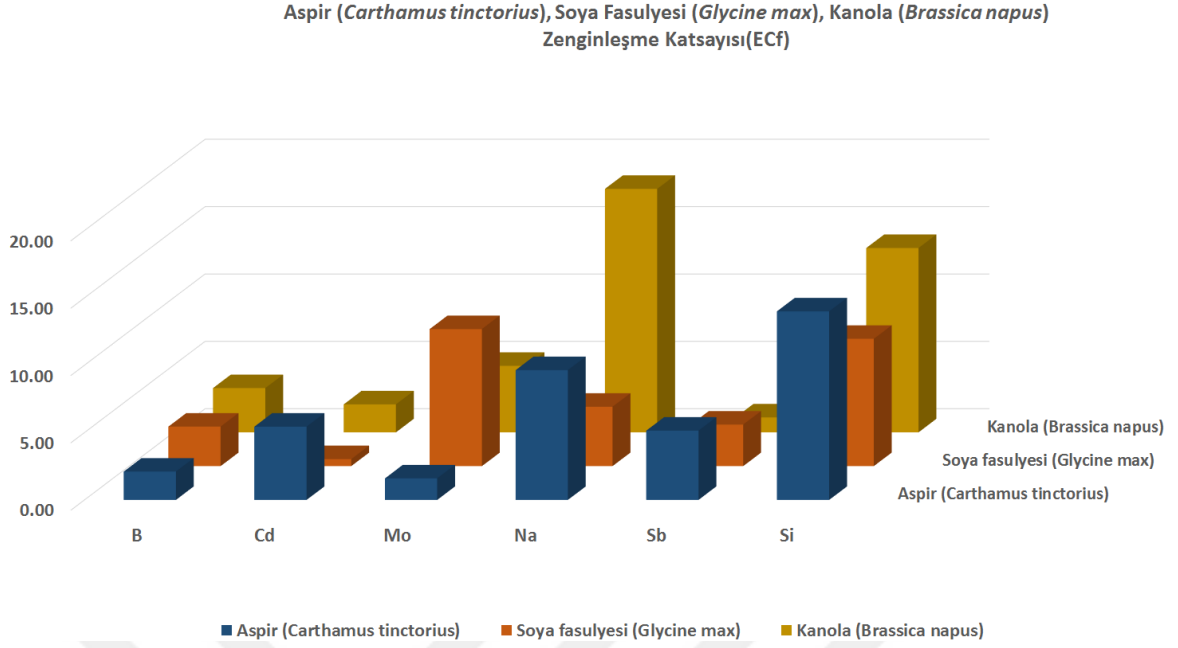
Şekil 3.26: Kanola (*Brassica napus*) bitkisi için  $EC_f > 1$  olan elementler

### 3.3.3.5. Aspir (*Carthamus tinctorius*), soya fasulyesi (*Glycine max*) ve kanola (*Brassica napus*) bitkilerinin Zenginleşme Katsayılarının karşılaştırılması

Voltaj uygulaması yapılmayan aspir, soya fasulyesi ve kanola bitkilerinin Zenginleşme Katsayıları ve buna bağlı olarak da kirleticilerin uzaklaştırılmasında fitoekstraktör yetenekleri ele alınarak karşılaştırılmıştır (Tablo 3.29 ve Şekil 3.27). Buna göre, voltaj uygulaması yapılmayan üç bitki arasında en yüksek etkinlik, B ve Na elementleri için kanola, Cd, Sb ve Si elementleri için aspir, Mo elementi için soya fasulyesi olarak ortaya çıkmıştır.

**Tablo 3.29:** Aspir (*Carthamus tinctorius*), Soya fasulyesi (*Glycine max*) ve Kanola (*Brassica napus*) bitkilerinin Zenginleşme Katsayılarının karşılaştırılması

| Elementler | Aspir ( <i>Carthamus tinctorius</i> ) | ± Aspir Belirsizlik | Soya fasulyesi ( <i>Glycine max</i> ) | ± Soya fasulyesi Belirsizlik | Kanola ( <i>Brassica napus</i> ) | ± Kanola Belirsizlik |
|------------|---------------------------------------|---------------------|---------------------------------------|------------------------------|----------------------------------|----------------------|
| <b>B</b>   | 2,102                                 | 0,303               | 2,933                                 | 0,422                        | <b>3,285</b>                     | 0,473                |
| <b>Cd</b>  | <b>5,437</b>                          | 1,044               | 0,519                                 | 0,100                        | 2,075                            | 0,398                |
| <b>Mo</b>  | 1,600                                 | 0,243               | <b>10,175</b>                         | 1,547                        | 4,935                            | 0,75                 |
| <b>Na</b>  | 9,635                                 | 2,389               | 4,410                                 | 1,094                        | <b>18,074</b>                    | 4,482                |
| <b>Sb</b>  | <b>5,142</b>                          | 0,401               | 3,084                                 | 0,241                        | 1,111                            | 0,087                |
| <b>Si</b>  | <b>13,996</b>                         | 1,288               | 9,452                                 | 0,870                        | 13,683                           | 1,259                |



**Şekil 3.27:** Aspir (*Carthamus tinctorius*), Soya fasulyesi (*Glycine max*) ve Kanola (*Brassica napus*) bitkilerinin Zenginleşme Katsayısı karşılaştırması

### 3.3.4. Bitki / Toprak Oranı Yüzdesi

Herhangi bir kirleticinin bitki biyokütlesindeki toplam miktarının, bitkinin yetiştiği topraktaki aynı kirleticinin toplam miktarına oranıdır. Dolayısıyla, gerek fitostabilizasyon ve gerekse fitoekstraksiyon yoluyla kirleticinin mobilitesinin engellenmesinin bir ölçüsüdür. Başka bir deyişle, bitkinin topraktan bünyesine aldığı element miktarı hakkında bir göstergedir.

$$\text{Bitki / Toprak (\%)} = \frac{(\text{Kirleticinin bitki biyokütlesindeki toplam miktarı})}{(\text{Kirleticinin topraktaki toplam miktarı})} \times 100$$

Bu çalışmada kullanılan her bir bitki için belirlenmiş olan yaprak, gövde ve kök kısımlarının kuru biyokütle miktarları, her bir element için o kısma ait konsantrasyon değeri ile çarpılıp çıkan değerler toplandıktan sonra, her bir elementin o bitkinin biyokütlesindeki toplam miktarı mikrogram ( $\mu\text{g}$ ) cinsinden hesaplanmıştır. Bu matematiksel işlemler, sonuçların belirsizlik hesaplarında göz önüne alınmıştır.

Her bir elementin topraktaki toplam miktarı, her bir saksıda bulunan 7 kg toprak kütlesi, o elementin toprakta ölçülen konsantrasyonu ile çarpılarak elde edilmiştir. Hesaplanan değerlerin belirsizlik hesabında matematiksel formül kullanılmıştır.

$$\Delta f = \frac{1}{t_{tek}} * bktb + \left( \frac{bktk}{t_{tek}^2} \right) * (tb)$$

*bktk*: elementin bitkideki toplam miktarı

*bktb*: elementin bitkideki toplam miktarının belirsizliği

*ttek*: elementin topraktaki toplam miktarı

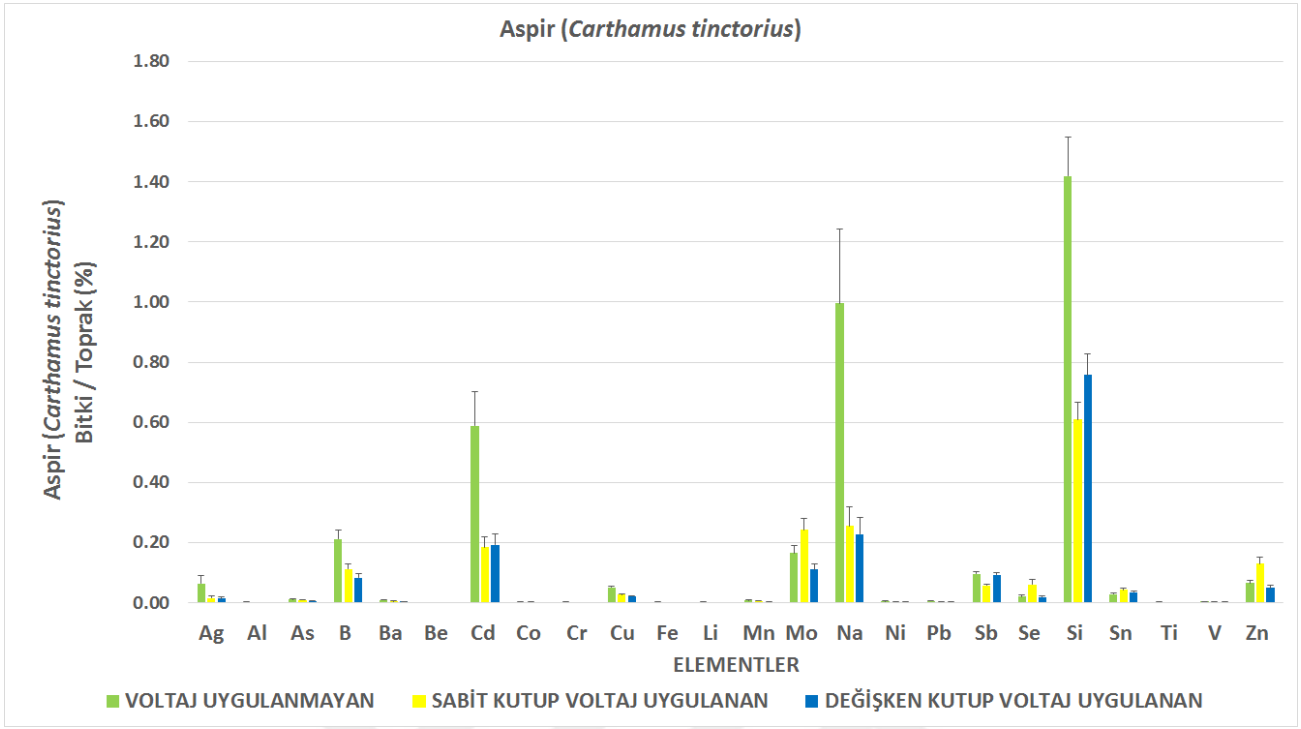
*tb*: elementin topraktaki toplam miktarının belirsizliği

### 3.3.4.1. Aspir (*Carthamus tinctorius*) bitkisi için Bitki / Toprak Oranı Yüzdesi

Aspir bitkisi kullanılarak, çalışmada kullanılan topraktan uzaklaştırılmasında en fazla verim alınabilecek elementler B, Cd, Mo, Na, Si ve Zn olarak belirlenmiştir. Bunların arasında B, Cd, Na ve Si elementleri için voltaj uygulaması yapılmayan aspir çok daha etkiliyken, Mo ve Zn elementleri için, sabit kutuplu DC voltaj uygulaması yapılan aspir çok daha etkili olmuştur (Tablo 3.30 ve Şekil 3.28).

**Tablo 3.30:** Aspir (*Carthamus tinctorius*) bitkisi için Bitki / Toprak Oranı Yüzdesi

| Bitki/Toprak (%) | Voltaj uygulanmayan | Sabit kutup voltaj uygulanan | Değişken kutup voltaj uygulanan | ± Bitki/ toprak belirsizlik (%) voltaj yok | ± Bitki / toprak belirsizlik (%) sabit kutup | ± Bitki / toprak belirsizlik değişken kutup |
|------------------|---------------------|------------------------------|---------------------------------|--------------------------------------------|----------------------------------------------|---------------------------------------------|
| Ag               | 0,06413             | 0,01530                      | 0,01454                         | 0,02745                                    | 0,00655                                      | 0,00622                                     |
| Al               | 0,00249             | 0,00100                      | 0,00117                         | 0,00037                                    | 0,00015                                      | 0,00018                                     |
| As               | 0,01098             | 0,00883                      | 0,00678                         | 0,00297                                    | 0,00238                                      | 0,00183                                     |
| B                | <b>0,21176</b>      | <b>0,11187</b>               | <b>0,08393</b>                  | 0,03049                                    | 0,01611                                      | 0,01209                                     |
| Ba               | 0,00956             | 0,00549                      | 0,00472                         | 0,00159                                    | 0,00091                                      | 0,00078                                     |
| Be               | 0,00252             | 0,00216                      | 0,00134                         |                                            |                                              |                                             |
| Cd               | <b>0,58885</b>      | <b>0,18488</b>               | <b>0,19261</b>                  | 0,11306                                    | 0,03550                                      | 0,03698                                     |
| Co               | 0,00355             | 0,00266                      | 0,00170                         | 0,00072                                    | 0,00054                                      | 0,00035                                     |
| Cr               | 0,00289             | 0,00179                      | 0,00138                         | 0,00076                                    | 0,00047                                      | 0,00036                                     |
| Cu               | 0,05082             | 0,02659                      | 0,02181                         | 0,00600                                    | 0,00314                                      | 0,00257                                     |
| Fe               | 0,00291             | 0,00137                      | 0,00147                         | 0,00043                                    | 0,00020                                      | 0,00022                                     |
| Li               | 0,00314             | 0,00133                      | 0,00140                         | 0,00093                                    | 0,00039                                      | 0,00041                                     |
| Mn               | 0,00824             | 0,00599                      | 0,00349                         | 0,00173                                    | 0,00126                                      | 0,00073                                     |
| Mo               | <b>0,16620</b>      | <b>0,24365</b>               | <b>0,11172</b>                  | 0,02526                                    | 0,03703                                      | 0,01698                                     |
| Na               | <b>0,99554</b>      | <b>0,25643</b>               | <b>0,22801</b>                  | 0,24689                                    | 0,06359                                      | 0,05655                                     |
| Ni               | 0,00540             | 0,00364                      | 0,00245                         | 0,00159                                    | 0,00107                                      | 0,00072                                     |
| Pb               | 0,00568             | 0,00312                      | 0,00386                         | 0,00150                                    | 0,00082                                      | 0,00102                                     |
| Sb               | 0,09578             | 0,05865                      | 0,09404                         | 0,00747                                    | 0,00457                                      | 0,00734                                     |
| Se               | 0,02161             | 0,06154                      | 0,01866                         | 0,00592                                    | 0,01686                                      | 0,00511                                     |
| Si               | <b>1,41854</b>      | <b>0,60927</b>               | <b>0,75731</b>                  | 0,13051                                    | 0,05605                                      | 0,06967                                     |
| Sn               | 0,02905             | 0,04413                      | 0,03480                         | 0,00261                                    | 0,00397                                      | 0,00313                                     |
| Ti               | 0,00323             | 0,00122                      | 0,00162                         | 0,00035                                    | 0,00013                                      | 0,00017                                     |
| V                | 0,00417             | 0,00273                      | 0,00312                         | 0,00084                                    | 0,00055                                      | 0,00063                                     |
| Zn               | 0,06573             | <b>0,13102</b>               | 0,05021                         | 0,01038                                    | 0,02070                                      | 0,00793                                     |

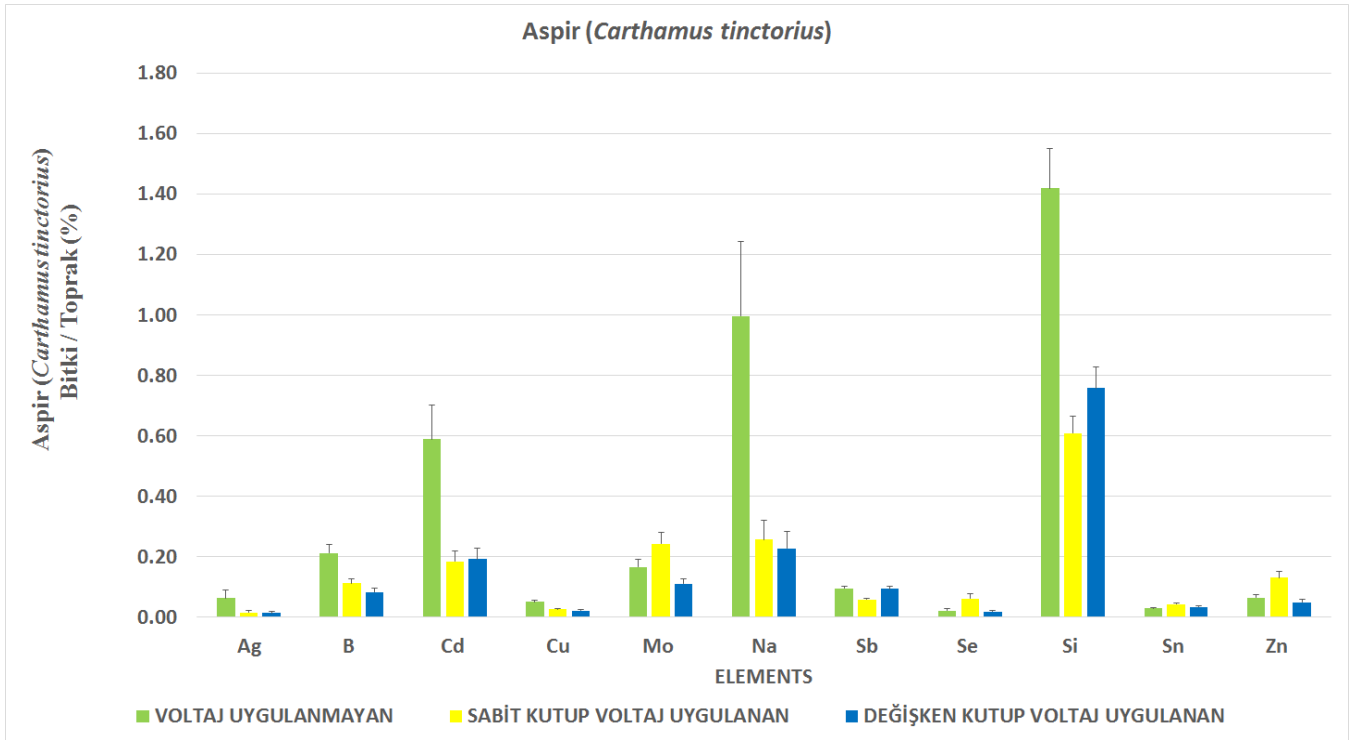


**Şekil 3.28:** Aspir (*Carthamus tinctorius*) bitkisi için Bitki/ Toprak Oranı Yüzdesi

Tablo 3.31 ve Şekil 3.29’da yalnızca, aspir bitkisinin topraktan uzaklaştırılmasında etkili olabileceği elementler gösterilmiştir. Üç farklı voltaj durumundan herhangi birisi için Bitki/Toprak Oranı Yüzdesi  $> 0,1$  olan değerler, bitkinin o elementin topraktan uzaklaştırılmasında fayda sağlayabileceği durum olarak kabul edilmiştir. Aspir bitkisi en yüksek etkiyi sırasıyla Si, Na, Cd, Mo, B ve Zn elementleri için göstermektedir.

**Tablo 3.31:** Aspir (*Carthamus tinctorius*) bitkisinin etkili olduğu elementler

| BİTKİ/TOPRAK (%) | Voltaj uygulanmayan | Sabit kutup voltaj uygulanan | Değişken kutup voltaj uygulanan | ±Bitki / toprak belirsizlik (%) voltaj yok | ±Bitki / toprak belirsizlik (%) sabit kutup | ±Bitki / toprak belirsizlik değişken yok |
|------------------|---------------------|------------------------------|---------------------------------|--------------------------------------------|---------------------------------------------|------------------------------------------|
| <b>B</b>         | <b>0,21176</b>      | 0,11187                      | 0,08393                         | 0,03049                                    | 0,01611                                     | 0,01209                                  |
| <b>Cd</b>        | <b>0,58885</b>      | 0,18488                      | 0,19261                         | 0,11306                                    | 0,03550                                     | 0,03698                                  |
| <b>Mo</b>        | 0,16620             | <b>0,24365</b>               | 0,11172                         | 0,02526                                    | 0,03703                                     | 0,01698                                  |
| <b>Na</b>        | <b>0,99554</b>      | 0,25643                      | 0,22801                         | 0,24689                                    | 0,06359                                     | 0,05655                                  |
| <b>Si</b>        | <b>1,41854</b>      | 0,60927                      | 0,75731                         | 0,13051                                    | 0,05605                                     | 0,06967                                  |
| <b>Zn</b>        | 0,06573             | <b>0,13102</b>               | 0,05021                         | 0,01038                                    | 0,02070                                     | 0,00793                                  |



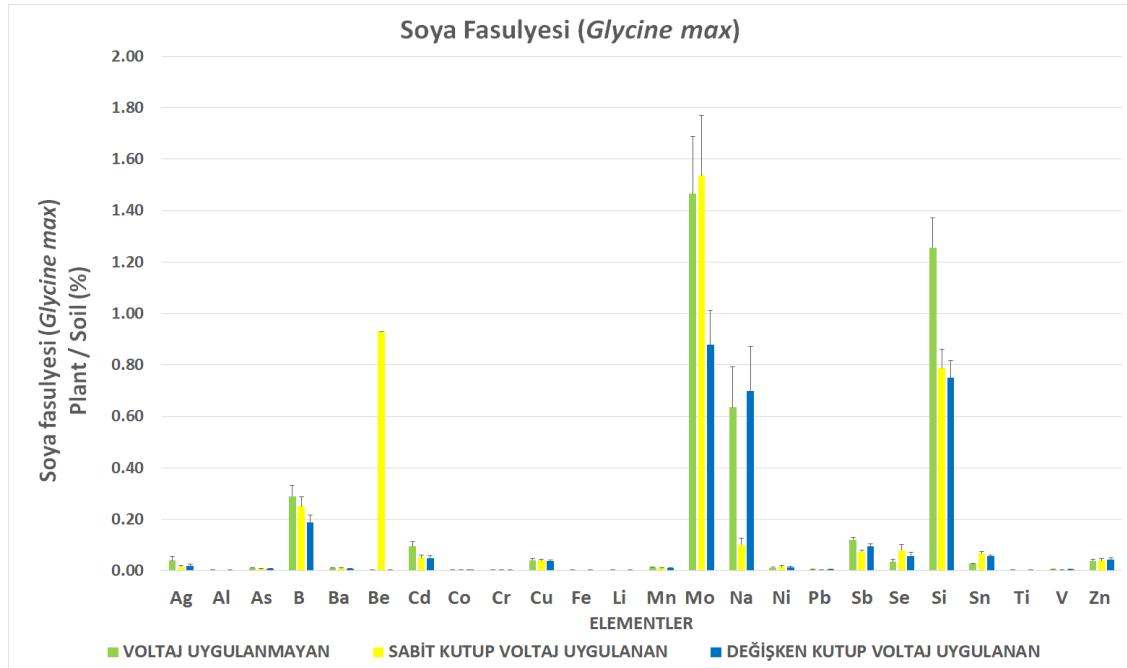
Şekil 3.29: Aspir (*Carthamus tinctorius*) bitkisinin etkili olduğu elementler

#### 3.3.4.2. Soya fasulyesi (*Glycine max*) bitkisi için Bitki / Toprak Oranı Yüzdesi

Soya fasulyesi bitkisi kullanılarak, çalışmada kullanılan topraktan uzaklaştırılmasında en fazla verim alınabilecek elementler B, Be, Mo, Na, Sb ve Si olarak belirlenmiştir. Bunların arasında B, Sb ve Si elementleri için voltaj uygulaması yapılmayan soya fasulyesi daha etkiliyken, Mo ve Be elementleri için, sabit kutuplu DC voltaj uygulaması yapılan, Na için ise sabit kutuplu DC voltaj uygulaması yapılan soya fasulyesi daha etkili olmuştur (Tablo 3.33 ve Şekil 3.30).

**Tablo 3.32:** Soya fasulyesi (*Glycine max*) bitkisi için Bitki / Toprak Oranı Yüzdesi

| BİTKİ/TOPRAK (%) | Voltaj uygulanmayan | Sabit kutup voltaj uygulanan | Değişken kutup voltaj uygulanan | ±Bitki / toprak belirsizlik (%) voltaj yok | ±Bitki / toprak belirsizlik (%) sabit kutup | ±Bitki / toprak belirsizlik değişken yok |
|------------------|---------------------|------------------------------|---------------------------------|--------------------------------------------|---------------------------------------------|------------------------------------------|
| Ag               | 0,04001             | 0,01442                      | 0,01846                         | 0,01712                                    | 0,00617                                     | 0,00790                                  |
| Al               | 0,00245             | 0,00142                      | 0,00275                         | 0,00037                                    | 0,00021                                     | 0,00041                                  |
| As               | 0,01005             | 0,00797                      | 0,00848                         | 0,00271                                    | 0,00215                                     | 0,00229                                  |
| B                | <b>0,29062</b>      | <b>0,25096</b>               | <b>0,18957</b>                  | 0,04185                                    | 0,03614                                     | 0,02730                                  |
| Ba               | 0,01049             | 0,01036                      | 0,00808                         | 0,00174                                    | 0,00172                                     | 0,00134                                  |
| Be               | 0,00271             | <b>0,92980</b>               | 0,00352                         | 0,00000                                    | 0,00000                                     | 0,00000                                  |
| Cd               | 0,09431             | 0,05100                      | 0,04938                         | 0,01811                                    | 0,00979                                     | 0,00948                                  |
| Co               | 0,00330             | 0,00344                      | 0,00443                         | 0,00067                                    | 0,00070                                     | 0,00090                                  |
| Cr               | 0,00284             | 0,00328                      | 0,00343                         | 0,00074                                    | 0,00086                                     | 0,00090                                  |
| Cu               | 0,04169             | 0,03966                      | 0,03827                         | 0,00492                                    | 0,00468                                     | 0,00452                                  |
| Fe               | 0,00273             | 0,00160                      | 0,00299                         | 0,00040                                    | 0,00024                                     | 0,00044                                  |
| Li               | 0,00352             | 0,00184                      | 0,00363                         | 0,00104                                    | 0,00055                                     | 0,00108                                  |
| Mn               | 0,01229             | 0,00984                      | 0,01007                         | 0,00258                                    | 0,00207                                     | 0,00211                                  |
| Mo               | <b>1,46565</b>      | <b>1,53654</b>               | <b>0,87845</b>                  | 0,22278                                    | 0,23355                                     | 0,13353                                  |
| Na               | <b>0,63486</b>      | <b>0,10226</b>               | <b>0,69789</b>                  | 0,15744                                    | 0,02536                                     | 0,17308                                  |
| Ni               | 0,01200             | 0,01574                      | 0,01422                         | 0,00353                                    | 0,00463                                     | 0,00418                                  |
| Pb               | 0,00496             | 0,00386                      | 0,00505                         | 0,00131                                    | 0,00102                                     | 0,00133                                  |
| Sb               | <b>0,12129</b>      | 0,07435                      | 0,09623                         | 0,00946                                    | 0,00580                                     | 0,00751                                  |
| Se               | 0,03512             | 0,07972                      | 0,05679                         | 0,00962                                    | 0,02184                                     | 0,01556                                  |
| Si               | <b>1,25610</b>      | <b>0,78775</b>               | <b>0,74966</b>                  | 0,11556                                    | 0,07247                                     | 0,06897                                  |
| Sn               | 0,02624             | 0,06772                      | 0,05732                         | 0,00236                                    | 0,00609                                     | 0,00516                                  |
| Ti               | 0,00339             | 0,00196                      | 0,00330                         | 0,00037                                    | 0,00021                                     | 0,00036                                  |
| V                | 0,00544             | 0,00385                      | 0,00500                         | 0,00110                                    | 0,00078                                     | 0,00101                                  |
| Zn               | 0,03935             | 0,04009                      | 0,04407                         | 0,00622                                    | 0,00633                                     | 0,00696                                  |

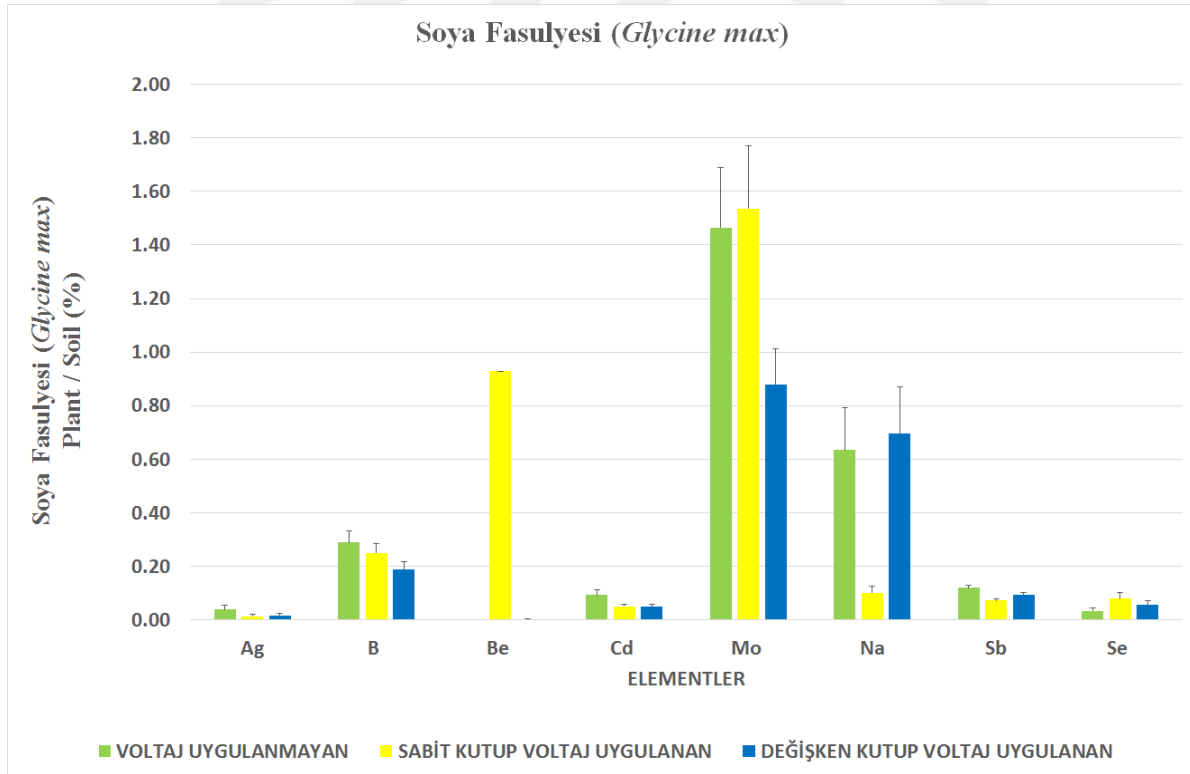


**Şekil 3.30:** Soya fasulyesi (*Glycine max*) bitkisi için bitki / toprak oranı yüzdesi

Tablo 3.33 ve Şekil 3.31’de yalnızca, soya fasulyesi bitkisinin topraktan uzaklaştırılmasında etkili olabileceği elementler gösterilmiştir. Üç farklı voltaj durumundan herhangi birisi için Bitki/Toprak Oranı Yüzdesi  $> 0,1$  olan değerler, bitkinin o elementin topraktan uzaklaştırılmasında fayda sağlayabileceği durum olarak kabul edilmiştir. Soya fasulyesi bitkisi en yüksek etkiyi sırasıyla Mo, Si, Be, Na, B ve Sb elementleri için göstermiştir.

**Tablo 3.33:** Soya fasulyesi (*Glycine max*) bitkisinin etkili olduğu elementler

| BİTKİ/TOPRAK (%) | Voltaj uygulanmayan | Sabit kutup voltaj uygulanan | Değişken kutup voltaj uygulanan | ±Bitki / toprak belirsizlik (%) voltaj yok | ±Bitki / toprak belirsizlik (%) sabit kutup | ±Bitki / toprak belirsizlik (%) değişken yok |
|------------------|---------------------|------------------------------|---------------------------------|--------------------------------------------|---------------------------------------------|----------------------------------------------|
| <b>B</b>         | <b>0,29062</b>      | 0,25096                      | 0,18957                         | 0,04185                                    | 0,03614                                     | 0,02730                                      |
| <b>Be</b>        | 0,00271             | <b>0,92980</b>               | 0,00352                         | 0,00000                                    | 0,00000                                     | 0,00000                                      |
| <b>Mo</b>        | 1,46565             | <b>1,53654</b>               | 0,87845                         | 0,22278                                    | 0,23355                                     | 0,13353                                      |
| <b>Na</b>        | 0,63486             | 0,10226                      | <b>0,69789</b>                  | 0,15744                                    | 0,02536                                     | 0,17308                                      |
| <b>Sb</b>        | <b>0,12129</b>      | 0,07435                      | 0,09623                         | 0,00946                                    | 0,00580                                     | 0,00751                                      |
| <b>Si</b>        | <b>1,25610</b>      | 0,78775                      | 0,74966                         | 0,11556                                    | 0,07247                                     | 0,06897                                      |



**Şekil 3.31:** Soya fasulyesi (*Glycine max*) bitkisinin etkili olduğu elementler

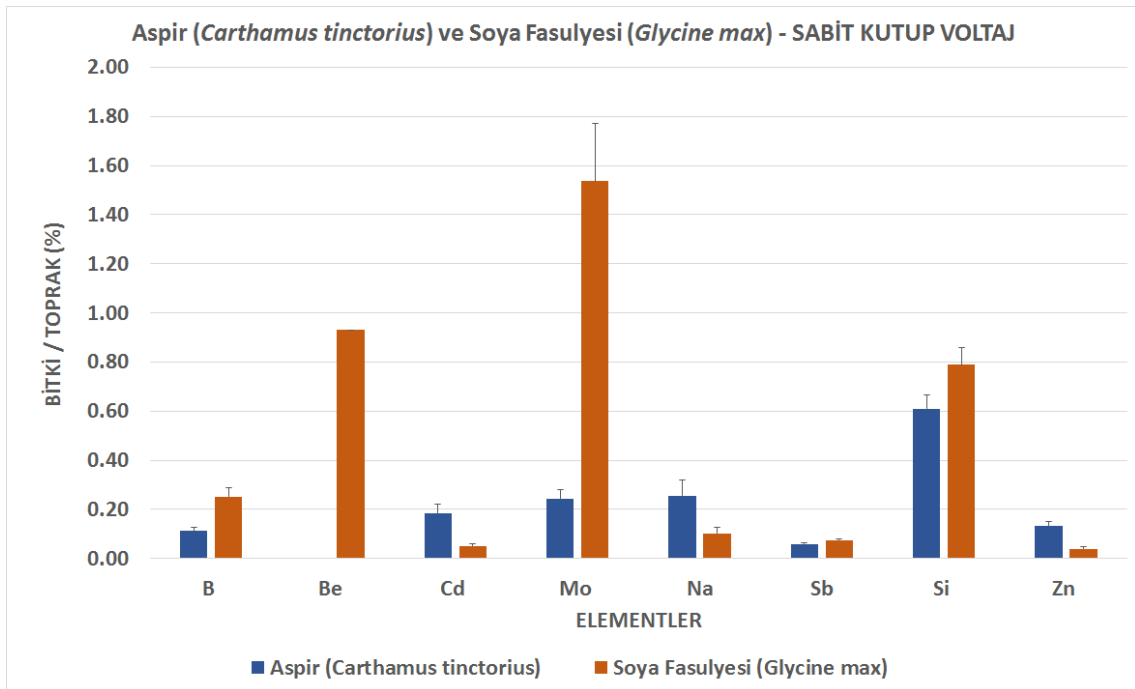
### 3.3.4.3. Aspir (*Carthamus tinctorius*) ve soya fasulyesi (*Glycine max*) bitkilerinin Bitki / Toprak Oranı Yüzdesi karşılaştırması

İlk olarak, sabit kutuplu DC voltaj uygulaması yapılan aspir ve soya fasulyesi bitkilerinin karşılaştırılmasını yapalım.

Sabit kutuplu DC voltaj uygulaması yapılan aspir bitkisi Cd, Na ve Zn elementleri için daha etkiliyken, soya fasulyesi bitkisi B, Be, Mo ve Si elementleri için daha etkili olmuştur (Tablo 3.34 ve Şekil 3.32).

**Tablo 3.34:** Sabit kutuplu DC voltaj uygulanan aspir (*Carthamus tinctorius*) ve soya fasulyesi (*Glycine max*) bitkilerinin etkili olduğu elementlerin karşılaştırılması

| BİTKİ/TOPRAK (%)                              | B              | Be             | Cd             | Mo             | Na             | Si             | Zn             |
|-----------------------------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| Aspir ( <i>Carthamus tinctorius</i> )         | 0,11187        | 0,00216        | <b>0,18488</b> | 0,24365        | <b>0,25643</b> | 0,60927        | <b>0,13102</b> |
| Soya fasulyesi ( <i>Glycine max</i> )         | <b>0,25096</b> | <b>0,92980</b> | 0,05100        | <b>1,53654</b> | 0,10226        | <b>0,78775</b> | 0,04009        |
| Aspir bitki / toprak belirsizlik (%)          | 0,01611        |                | 0,03550        | 0,03703        | 0,06359        | 0,05605        | 0,02070        |
| Soya fasulyesi bitki / toprak belirsizlik (%) | 0,03614        | 0,00000        | 0,00979        | 0,23355        | 0,02536        | 0,07247        | 0,00633        |



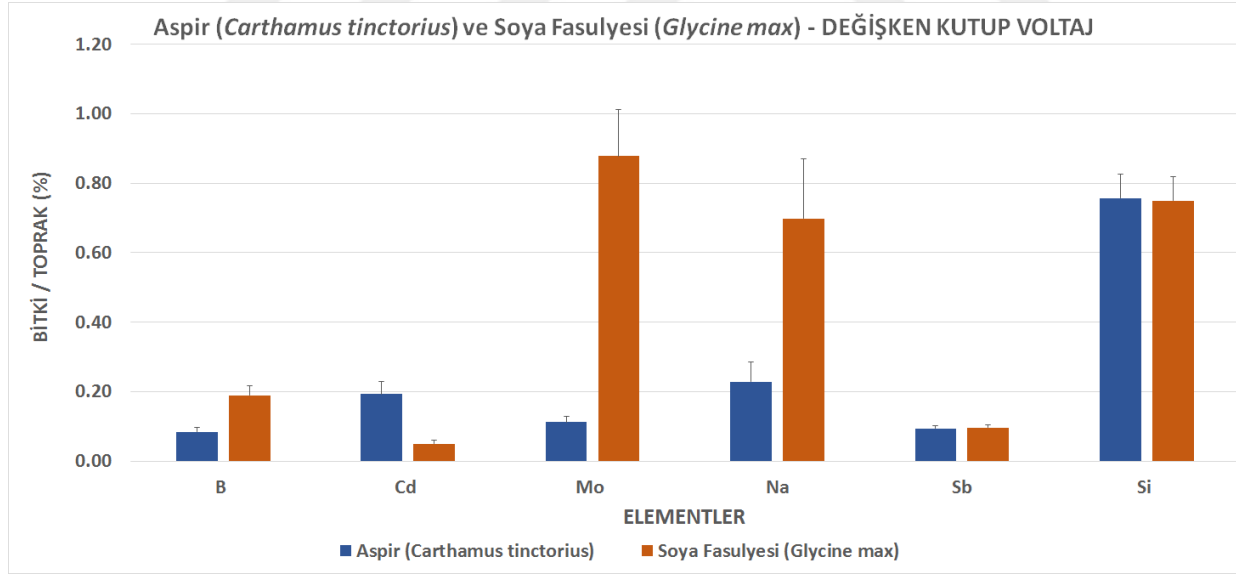
**Şekil 3.32:** Sabit kutuplu aspir (*Carthamus tinctorius*) ve soya fasulyesi (*Glycine max*) bitkilerinin etkili olduğu elementlerin karşılaştırılması

İkinci olarak, değişken kutuplu DC voltaj uygulaması yapılan aspir ve soya fasulyesi bitkilerinin karşılaştırılmasını yapalım.

Değişken kutuplu DC voltaj uygulaması yapılan aspir bitkisi Cd ve Si elementleri için daha etkiliyken, soya fasulyesi bitkisi B, Mo ve Na elementleri için daha etkili olmuştur (Tablo 3.35 ve Şekil 3.33).

**Tablo 3.35:** Değişken kutuplu DC voltaj uygulanan aspir (*Carthamus tinctorius*) ve soya fasulyesi (*Glycine max*) bitkilerinin etkili olduğu elementlerin karşılaştırılması

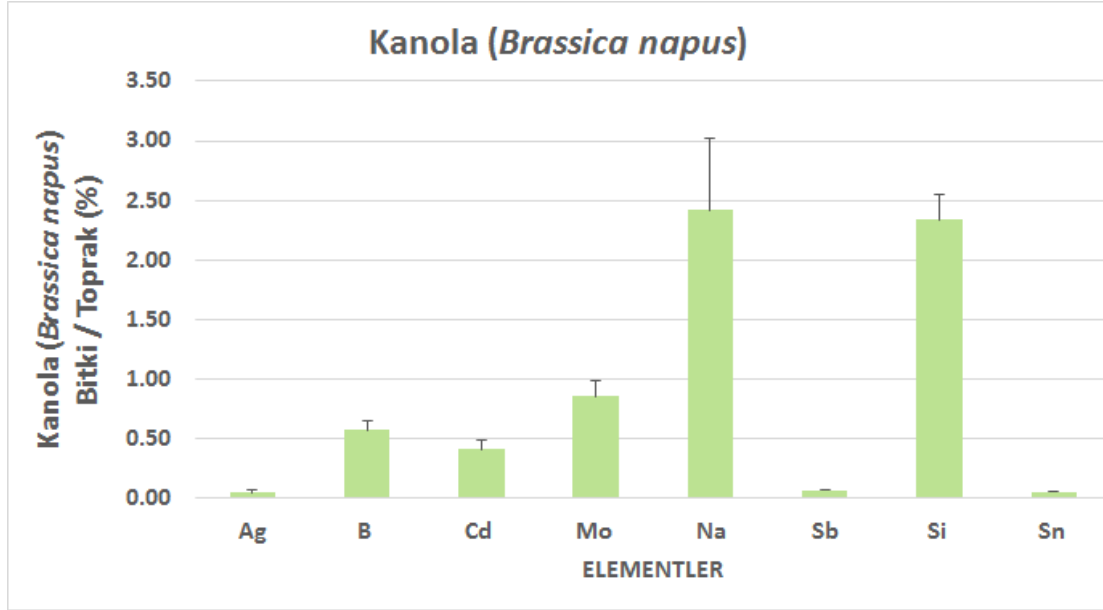
| Bitki/toprak (%)                           | B              | Cd             | Mo             | Na             | Si             |
|--------------------------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| <b>Aspir (<i>Carthamus tinctorius</i>)</b> | 0,08393        | <b>0,19261</b> | 0,11172        | 0,22801        | <b>0,75731</b> |
| <b>Soya fasulyesi (<i>Glycine max</i>)</b> | <b>0,18957</b> | 0,04938        | <b>0,87845</b> | <b>0,69789</b> | 0,74966        |
| <b>Aspir belirsizlik</b>                   | 0,01209        | 0,03698        | 0,01698        | 0,05655        | 0,06967        |
| <b>Soya fasulyesi belirsizlik</b>          | 0,02730        | 0,00948        | 0,13353        | 0,17308        | 0,06897        |



**Şekil 3.33:** Değişken kutuplu DC voltaj uygulanan aspir (*Carthamus tinctorius*) ve soya fasulyesi (*Glycine max*) bitkilerinin etkili olduğu elementlerin karşılaştırılması

#### 3.3.4.4. Kanola (*Carthamus tinctorius*) Bitki/Toprak Oranı Yüzdesi

Voltaj uygulamasına tabi tutulmayan kanola bitkisi B, Cd, Mo, Na ve Si elementlerinin topraktan uzaklaştırılmasında etkili olma potansiyeline sahiptir (Şekil 3.34 ve Tablo 3.36).



Şekil 3.34: Kanola (*Carthamus tinctorius*) bitkisinin etkili olduğu elementler

Tablo 3.36: Kanola (*Carthamus tinctorius*) bitkisinin etkili olduğu elementler

| ELEMENT | Kanola<br>Bitki / Toprak (%) | Bitki / toprak<br>belirsizlik (%) |
|---------|------------------------------|-----------------------------------|
| B       | 0,57362                      | 0,08260                           |
| Cd      | 0,41504                      | 0,07969                           |
| Mo      | 0,85590                      | 0,13010                           |
| Na      | 2,41891                      | 0,59989                           |
| Si      | 2,33879                      | 0,21517                           |

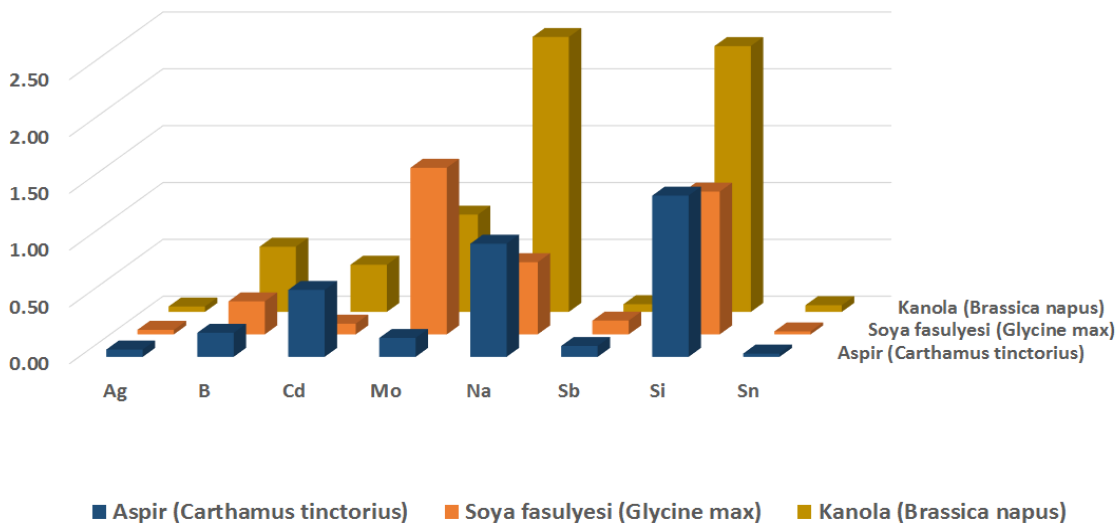
**3.3.4.5. Voltaj uygulaması yapılmayan aspir (*Carthamus tinctorius*), soya fasulyesi (*Glycine max*) ve kanola (*Brassica napus*) bitkilerinin Bitki / Toprak Oranı Yüzdelerinin karşılaştırılması**

Voltaj uygulanmamış aspir (*Carthamus tinctorius*), soya fasulyesi (*Glycine max*) ve kanola (*Brassica napus*) bitkileri, topraktan uzaklaştırma potansiyeli taşıdıkları elementler bakımından karşılaştırılmışlardır. Sonuçlar, Cd elementi için aspir, Mo ve Sb elementleri için soya fasulyesi ve B, Na ve Si elementleri için kanola bitkilerinin daha etkili olduklarını göstermiştir (Tablo 3.37 ve Şekil 3.35).

**Tablo 3.37:** Voltaj uygulanmamış aspir (*Carthamus tinctorius*), soya fasulyesi (*Glycine max*), kanola (*Brassica napus*) bitkilerinin etkili olduğu elementlerin karşılaştırılması

| Bitki / Toprak (%) | Aspir ( <i>Carthamus tinctorius</i> ) | Soya fasulyesi ( <i>Glycine max</i> ) | Kanola ( <i>Brassica napus</i> ) |
|--------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|----------------------------------|
| <b>B</b>           | 0,21176                               | 0,29062                               | <b>0,57362</b>                   |
| <b>Cd</b>          | <b>0,58885</b>                        | 0,09431                               | 0,41504                          |
| <b>Mo</b>          | 0,16620                               | <b>1,46565</b>                        | 0,85590                          |
| <b>Na</b>          | 0,99554                               | 0,63486                               | <b>2,41891</b>                   |
| <b>Sb</b>          | 0,09578                               | <b>0,12129</b>                        | 0,06814                          |
| <b>Si</b>          | 1,41854                               | 1,25610                               | <b>2,33879</b>                   |

Aspir (*Carthamus tinctorius*), Soya Fasulyesi (*Glycine max*),  
Kanola (*Brassica napus*)  
Bitki / Toprak (%)



**Şekil 3.35:** Voltaj uygulanmamış aspir (*Carthamus tinctorius*), soya fasulyesi (*Glycine max*), kanola (*Brassica napus*) bitkilerinin etkili olduğu elementlerin karşılaştırılması

## 4. SONUÇLAR

Çalışmada kullanılan bitki ve toprak numunelerinde, ICP-MS analizi ile ölçümü yapılan element konsatrasyonları kullanılarak hesaplanan Translokasyon Faktörü, Biyoyoğunlaşma Faktörü, Zenginleşme Katsayısı ve Bitki/Toprak Oranı Yüzdesi değerleri birlikte değerlendirildiğinde aşağıdaki bulgulara ulaşılmıştır:

Translokasyon Faktörü (TF) ile elde edilen bulgular;

- Aspir bitkisinin Ag, B, Cd, Mo, Na, Sb, Sn ve Zn elementleri için  $TF > 1$  şartını sağladığı için biriktirici (fitoakümülatör) olduğu, ölçüm belirsizlikleri göz önüne alındığında, Si ve Se elementleri için de biriktirici olma potansiyeli taşıdığı anlaşılmıştır. Bu elementlerden Ag, Sb ve Si için voltaj uygulamasının yapılmadığı, Mo, Se, Sn ve Zn için sabit kutuplu DC voltaj uygulamasının yapıldığı, B, Cd ve Na için değişken kutuplu DC voltaj uygulamasının yapıldığı deneylerin, aspir bitkisinin biriktiricilik performansı açısından daha iyi sonuç verdiği gözlenmiştir.
- Soya fasulyesi bitkisinin Ag, B, Mn, Mo, Na, Sn ve Zn elementleri için  $TF > 1$  şartını sağladığı için biriktirici (fitoakümülatör) olduğu, ölçüm belirsizlikleri göz önüne alındığında, Ni ve Se elementleri için de biriktirici olma potansiyeli taşıdığı anlaşılmıştır. Bu elementlerden Ag, B, Mn ve Zn için voltaj uygulamasının yapılmadığı, Sn, Ni ve Se için sabit kutuplu DC voltaj uygulamasının yapıldığı, Mo ve Na için değişken kutuplu DC voltaj uygulamasının yapıldığı deneylerin, soya fasulyesi bitkisinin biriktiricilik performansı açısından daha iyi sonuç verdiği gözlenmiştir.
- Aspir ve soya fasulyesi bitkilerinin TF değerleri karşılaştırıldığında, Sb için voltaj uygulanmayan aspir, Mo ve Zn için sabit kutuplu DC voltaj uygulanan aspir, Cd için değişken kutuplu DC voltaj uygulanan aspir daha yüksek performans göstermiştir. Buna karşın, Ag, B ve Mn için voltaj uygulanmayan soya fasulyesi, Sn için sabit kutuplu DC voltaj uygulanan soya fasulyesi, Na için değişken kutuplu DC voltaj uygulanan soya fasulyesinin daha yüksek performans gösterdiği gözlenmiştir.

- DC voltaj uygulamasının en fazla performans artışı oluşturduğu elementler, aspir bitkisi için, sabit kutuplu uygulamada Zn (%500) ve değişken kutuplu uygulamada Cd (%50) ve Na (%50) olurken, soya fasulyesi bitkisi için, sabit kutuplu uygulamada Sn (%200) ve değişken kutuplu uygulamada Na (%400) ve Mo (%200) olmuştur.
- Voltaj uygulamasına tabi tutulmayan kanola bitkisinin B, Mo ve Na elementleri için  $TF > 1$  şartını sağladığı için biriktirici (fitoakümülatör) olduğu, ölçüm belirsizlikleri göz önüne alındığında, Si ve Se elementleri için de biriktirici olma potansiyeli taşıdığı anlaşılmıştır. Bu bitki, voltaj uygulamasına tabi tutulmayan aspir ve soya fasulyesi bitkileriyle TF üzerinden karşılaştırıldığında, Na için %400 daha yüksek performans göstermiştir.

Biyoyoğunlaşma faktörü ile elde edilen bulgular;

- Aspir bitkisinin B, Cd, Mo, Na, Sb, Si ve Zn elementleri için  $BCF > 1$  şartını sağladığı için özütleyici (fitoekstraktör) olduğu, ölçüm belirsizlikleri göz önüne alındığında, Se ve Sn elementleri için de özütleyici olma potansiyeli taşıdığı anlaşılmıştır. Bu elementlerden Cd ve Na için voltaj uygulamasının yapılmadığı, B, Mo, Se, Sn ve Zn için sabit kutuplu DC voltaj uygulamasının yapıldığı, Sb ve Si için değişken kutuplu DC voltaj uygulamasının yapıldığı deneylerin, aspir bitkisinin özütleyicilik performansı açısından daha iyi sonuç verdiği gözlenmiştir. Sonuç olarak, aspir bitkisi B, Cd, Mo, Na, Sb ve Zn elementleri için hem  $TF > 1$  hem de  $BCF > 1$  şartlarını sağladığından, bu elementler için fitoremediasyona uygundur. Ayrıca, ölçüm belirsizlikleri gözönüne alındığında, Si, Se ve Sn elementleri için de bu şartları sağlama potansiyeline olduğu anlaşılmıştır.
- Soya fasulyesi bitkisinin B, Cd, Mo, Na, Sb ve Si elementleri için  $BCF > 1$  şartını sağladığı için özütleyici (fitoekstraktör) olduğu anlaşılmıştır. Bu elementlerden B ve Mo için sabit kutuplu DC voltaj uygulamasının yapıldığı, Cd, Na, Sb ve Si için değişken kutuplu DC voltaj uygulamasının yapıldığı deneylerin, soya fasulyesi bitkisinin özütleyicilik performansı açısından daha iyi sonuç verdiği gözlenmiştir. Sonuç olarak, soya fasulyesi bitkisi B, Mo ve Na elementleri için hem  $TF > 1$  hem de  $BCF > 1$  şartlarını sağladığından, bu elementler için fitoremediasyona uygundur.

- Voltaj uygulamasına tabi tutulmayan aspir bitkisi Cd elementi için, değişken kutuplu DC voltaj uygulamasına tabi tutulan aspir bitkisi ise Sb ve Si elementleri için daha yüksek BCF değerlerine sahiptir. Buna karşın, sabit kutuplu DC voltaj uygulamasına tabi tutulan soya fasulyesi bitkisi B ve Mo elementleri için, değişken kutuplu DC voltaj uygulamasına tabi tutulan soya fasulyesi bitkisi Na elementi için daha yüksek BCF değerlerine sahiptir.
- DC voltaj uygulamasının en fazla performans artışı oluşturduğu elementler, aspir bitkisi için, sabit kutuplu uygulamada Zn (%350) ile Mo (%300) ve değişken kutuplu uygulamada Sb (%400) ve Si (%150) olurken, soya fasulyesi bitkisi için, sabit kutuplu uygulamada Mo (%150) ve değişken kutuplu uygulamada Sb (%200) ile Na (%200) olmuştur.
- Voltaj uygulamasına tabi tutulmayan kanola bitkisinin B, Cd, Mo, Na, Sb ve Si elementleri için  $BCF > 1$  şartını sağladığı için özütleyici (fitoekstraktör) olduğu anlaşılmıştır. Kanola bitkisi B, Mo, Na ve Si elementleri için  $TF > 1$  ve  $BCF > 1$  şartlarını sağladığından, bu elementler için fitoremediasyon kullanımına uygundur. Bu bitki, voltaj uygulamasına tabi tutulmayan aspir ve soya fasulyesi bitkileriyle BCF üzerinden karşılaştırıldığında, B ve Na elementleri için %150 daha yüksek performans göstermiştir.

Zenginleşme Katsayısı ile elde edilen bulgular;

- Aspir bitkisinin B, Cd, Mo, Na, Sb, Si ve Zn elementleri için  $EC_f > 1$  şartını sağladığı için özütleyici (fitoekstraktör) olduğu, ölçüm belirsizlikleri göz önüne alındığında, Se ve Sn elementleri için de özütleyici olma potansiyeli taşıdığı anlaşılmıştır. Bu elementlerden Cd, Na, Sb ve Si için voltaj uygulamasının yapılmadığı, B, Mo, Zn, Se ve Sn için sabit kutuplu DC voltaj uygulamasının yapıldığı deneylerin, aspir bitkisinin özütleyicilik performansı açısından daha iyi sonuç verdiği gözlenmiştir. Sonuç olarak, aspir bitkisi B, Cd, Mo, Na, Sb ve Zn elementleri için  $TF > 1$  ve  $EC_f > 1$  değerlerine sahip olduğundan, hasat sonrası bu elementlerin topraktan uzaklaştırılması için uygundur. Ayrıca, ölçüm belirsizlikleri gözönüne alındığında, Se ve Sn elementleri için de bu şartları sağlama potansiyeli olduğu anlaşılmıştır.
- Soya fasulyesi bitkisinin B, Mo, Na, Sb ve Si elementleri için  $EC_f > 1$  şartını

sağladığı için özütleyici (fitoekstraktör) olduğu, ölçüm belirsizlikleri göz önüne alındığında, Sn elementi için de özütleyici olma potansiyeli taşıdığı anlaşılmıştır. Bu elementlerden B, Mo ve Sn için sabit kutuplu DC voltaj uygulamasının yapıldığı, Na, Sb ve Si için değişken kutuplu DC voltaj uygulamasının yapıldığı deneylerin, soya fasulyesi bitkisinin özütleyicilik performansı açısından daha iyi sonuç verdiği gözlenmiştir. Sonuç olarak, soya fasulyesi bitkisi B, Mo, Na ve Sn elementleri için  $TF > 1$  ve  $EC_f > 1$  değerlerine sahip olduğundan, hasat sonrası bu elementlerin topraktan uzaklaştırılması için uygundur. Ayrıca, ölçüm belirsizlikleri gözönüne alındığında, Sn elementi için de bu şartları sağlama potansiyeli olduğu anlaşılmıştır.

- Voltaj uygulamasına tabi tutulmayan aspir bitkisi Cd, Sb ve Si elementleri için, sabit kutuplu DC voltaj uygulamasına tabi tutulan aspir bitkisi ise Zn, Sn ve Se elementleri için daha yüksek  $EC_f$  değerlerine sahiptir. Buna karşın, sabit kutuplu DC voltaj uygulamasına tabi tutulan soya fasulyesi bitkisi B, Mo ve Sn elementleri için, değişken kutuplu DC voltaj uygulamasına tabi tutulan soya fasulyesi bitkisi Na elementi için daha yüksek  $EC_f$  değerlerine sahiptir.
- DC voltaj uygulamasının en fazla performans artışı oluşturduğu elementler, aspir bitkisi için, sabit kutuplu uygulamada Mo (%350) ile Zn (%500), soya fasulyesi bitkisi için, sabit kutuplu uygulamada Mo (%170) ve değişken kutuplu uygulamada Na (%300) olmuştur.
- Voltaj uygulamasına tabi tutulmayan kanola bitkisinin B, Cd, Mo, Na, Sb ve Si elementleri için  $EC_f > 1$  şartını sağladığı için özütleyici (fitoekstraktör) olduğu anlaşılmıştır. Kanola bitkisi B, Mo ve Na elementleri için  $TF > 1$  ve  $EC_f > 1$  değerlerine sahip olduğundan, hasat sonrası bu elementlerin topraktan uzaklaştırılması için uygundur. Ayrıca, ölçüm belirsizlikleri gözönüne alındığında, Si elementi için de bu şartları sağlama potansiyeli olduğu anlaşılmıştır. Bu bitki, voltaj uygulamasına tabi tutulmayan aspir ve soya fasulyesi bitkileriyle  $EC_f$  üzerinden karşılaştırıldığında, B için %150 ve Na için %200 daha yüksek performans göstermiştir.

Bitki/Toprak Oranı Yüzdesi ile elde edilen bulgular;

- Aspir bitkisi kullanılarak, çalışmada kullanılan topraktan uzaklaştırılmasında en fazla verim alınabilecek elementler B, Cd, Mo, Na, Si ve Zn olarak belirlenmiştir. Bunların arasında B, Cd, Na ve Si elementleri için voltaj uygulaması yapılmayan aspir çok daha etkiliyken, Mo ve Zn elementleri için, sabit kutuplu DC voltaj uygulaması yapılan aspir çok daha etkili olmuştur.
- Soya fasulyesi bitkisi kullanılarak, çalışmada kullanılan topraktan uzaklaştırılmasında en fazla verim alınabilecek elementler B, Be, Mo, Na, Sb ve Si olarak belirlenmiştir. Bunların arasında B, Sb ve Si elementleri için voltaj uygulaması yapılmayan soya fasulyesi daha etkiliyken, Mo ve Be elementleri için, sabit kutuplu DC voltaj uygulaması yapılan, Na için ise sabit kutuplu DC voltaj uygulaması yapılan soya fasulyesi daha etkili olmuştur.
- Voltaj uygulamasına tabi tutulmayan kanola bitkisi B, Cd, Mo, Na ve Si elementlerinin topraktan uzaklaştırılmasında etkili olma potansiyeline sahiptir.
- Çalışmada incelenen tüm bitkiler ve voltaj alternatifleri gözönüne alınarak, elementlerin topraktan uzaklaştırılmasında pratikte kullanılabilecek sonuçlar ortaya konmuştur. Buna göre, Cd için voltaj uygulanmayan aspir, Zn için sabit kutuplu DC voltaj uygulanan aspir, Sb için voltaj uygulanmayan soya fasulyesi, Mo ve Be için sabit kutuplu DC voltaj uygulanan soya fasulyesi, B, Na ve Si için voltaj uygulanmayan kanola bitkilerinin kullanımının, performansı en yüksek alternatifler olacağı anlaşılmıştır.

Bu tez çalışmasında elde edilen sonuçların pratikte uygulanabilmesi için, Tarım ve Orman Bakanlığı ile bakanlığa bağlı bulunan araştırma enstitüleri, üniversiteler, çiftçi örgütleri, kooperatifler ve sivil toplum örgütleri ile özel sektör kurumları arasında düzenli bir işbirliği ve planlı bir sorumluluk paylaşımının oluşturulması mutlaka gereklidir. Kirlenici ve tehlikeli olarak anılan ağır metaller ile kirlenmiş olan alanların bitkiler ile rehabilitasyonu için, devletin kamu yatırım hizmetleri özellikle tohum, sulama, ekipman ve işleme hizmeti ile diğer desteklemelerinin yanı sıra, tarım kooperatifleri altındaki örgütlenmeler de faaliyetlerin etkin kılınması açısından önem arz etmektedir.

## 5. KAYNAKLAR

Acar, Y. ve Alshawabkeh N., (1993) Principles of electrokinetic remediation. Environ. Sci. Technol., (27) 2638-2647.

Adrees, M., Ali, S., Rizwan, M., Zia-ur-Rehman, M., Ibrahim, M., Abbas, F., Farid, M., Qayyum, M.F., Irshad, M.K., (2015) Mechanisms of silicon-mediated alleviation of heavy metal toxicity in plants: a review. Ecotoxicol. Environ. Saf. 119, 186–197.

Alloway B.J., 1993. Heavy Metals in Soils. Wiley & Sons, Inc. New York. 338p.

Angelova, V.R., Ivanova, R.I., Todorov, J.M., Ivanov, K.I. (2017) Potential of Rapeseed (*Brassica Napus* L.) for Phytoremediation of Soils Contaminated With Heavy Metals, Journal of Environmental Protection and Ecology (18), 2, 468–478

Arıoğlu, H. H.,(2007) Yağ Bitkileri Yetiştirme ve Islahı Ders Kitapları Yayın No: A-70, Çukurova Üniversitesi Ziraat Fakültesi Ofset Atölyesi, Adana, 14-21, 49.

Arslan, F. ( 2011) Ergene Havzası Koruma Eylem Planı Durum Değerlendirme Raporu, Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, Türkiye

Ashraf, S., Alia, Q., Zahir, Z.A, Ashraf, S., Asghar, H.N. (2019) Ecotoxicology and Environmental Safety 174 (2019) 714–727

Ayangbenro, A.S., Babalola, O.O., (2017) A new strategy for heavy metal polluted environments: a review of microbial biosorbents. Int. J. Environ. Res. Public Health 14 (1), 94

Baran, U., (2018) Aspir bitkisinin yerel (*Carthamus tinctorius*) ve atasal (*Carthamus oxyacantha*) genotiplerinin nikel toleranslarının belirlenmesi ve fitoremediasyonunda kullanılma potansiyellerinin değerlendirilmesi, Hacettepe Üniversitesi, Biyoloji Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi, Ankara

Bayar R., ve Yılmaz M. (2004), Türkiye’de Soya Fasulyesi ve Önemi, Uluslararası İnsan Bilimleri Dergisi, ISSN: 1303-5134

Bingöl AM, (2008) Bor ile Kirlenmiş Zeminlerin Yeşil Islah (phytoremediation) Yöntemi ile Temizlenmesi. Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Erzurum.

Bitew, Y., Alemayehu, M., (2017) Impact of crop production inputs on soil health: a review. Asian J. Plant. Sci. 16, 109–131.

Blaylock, M.J., Huang, J.W. (2000) Phytoextraction of Metals. Phytoremediation of Toxic Metals Using Plants to Clean-up the Environment, 53-70.

Boamponsem LK., Adam JI., Dampare SB., Nyarko BJB., Essumang DK. (2010) Assessment of atmospheric heavy metal deposition in the Tarkwa gold mining area of Ghana using epiphytic lichens. NuclInstrum Meth B. 268, 1492–1501.

Bolan, N.S., Park, J.H., Robinson, B., Naidu, R., Huh, K.Y., 2011. Phytostabilization. A green approach to contaminant containment. Adv. Agron. 112, 145–204.

Cameselle, C., Chirakkara, R.A., Reddy, K.R., (2013) Electrokinetic-enhanced phytoremediation of soils: Status and opportunities. Chemosphere 93) 626-636.

Cameselle C., Gouveia S., Urrejola S. (2019) Benefits Of Phytoremediation Amended With DC Electric Field. Application To Soils Contaminated With Heavy Metals, 229, 481-488.

Cang, L., Wang, Q.-Y., Zhou, D.-M., Xu, H., (2011) Effects of electrokinetic-assisted phytoremediation of a multiple-metal contaminated soil on soil metal bioavailability and uptake by Indian mustard. Separ. Purif. Technol. 79.

Cang, L., Zhou, D. M., Wang, Q.-Y., Fan, G.-P., (2012) Impact of electrokinetic-assisted phytoremediation of heavy metal contaminated soil on its physicochemical properties, enzymatic and microbial activities. Electrochim. 86, 41-48.

Carreras, HA., Pignata, ML. ( 2007) Effects of the heavy metals Cu<sup>2+</sup>,Ni<sup>2+</sup>,Pb<sup>2+</sup>, and Zn<sup>2+</sup> on some physiological parameters of the lichen *Usneaamblyoclada*. *Ecotox Environ Safe*, 67, 59- 66.

Chaney, R L, Malik M, Lim YM, Brown SL, Brewer EP, Angle JS and Baker AJM (1997). Phytoremediation of soils metals. *Curr. Opin. Biotechnol.* 279-284.

Connell, D.W., Miller GJ, (1984) *Chemistry and Ecotoxicology of Pollution*, John Willey & Sons.

Cosge, B., Gurbuz, B., Kiralan, M., (2007) Oil Content and Fatty Acid Composition of Some Safflower (*Carthamus tinctorius* L.) Varieties Sown in Spring and Winter, *International Journal of Natural And Engineering Sciences* (1), 11-15.

Dada, E.O., Njoku, K.I., Osuntoki, A.A., Akinola, M.O., (2015) A review of current techniques of physico-chemical and biological remediation of heavy metals polluted soil. *Ethiop. J. Environ. Stud. Manag.* 8 (5), 606–615.

Dağdeviren, Ş. (2007) Çorlu Ve Civarındaki Topraklarda Ağır Metal Konsantrasyonunun Belirlenmesi ve Sonuçların Yapay Sinir Ağları İle Değerlendirilmesi, T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Çevre Bilimleri Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, Edirne.

Dajue, L, Mundel, H.H., (1996) Safflower. *Carthamus tinctorius* L. Promoting the conservation and use of underutilized and neglected crops. Institute of plant genetics and crop plant research, Gaterslebe, Germany and international plant genetic resources institute, Rome, Italy

Dhanwal, P., Kumar, A., Dudeja, S., Chhokar, V., Beniwal, V., (2017) Recent advances in phytoremediation technology. In: Kumar, R., Sharma, A.K., Ahluwalia, S.S. (Eds.), *Advances in Environmental Biotechnology*. Springer, Singapore, 227–241.

DSİ 11. Bölge Müdürlüğü, (2009) Ergene Nehri 2003-2008 Yılı Kalite Gözlem Çalışmaları, 19, Edirne

Elliott, H.A., Liberati M. R., Huang C. P., (1986) Competitive Adsorption of Heavy Metals by Soils, J. Environ. Qual. 15, 214-219.

Emenike, C.U., Jayanthi, B., Agamuthu, P., Fauziah, S.H. (2018) Biotransformation and removal of heavy metals: a review of phytoremediation and microbial remediation assessment on contaminated soil. Environ. Rev. 26 (2), 156–168.

Environment Canada, Environmental Protection Fraser Pollution Abatement North Vancouver, B.C., (1997) Technical Pollution Prevention Guide for Dairy Processing Operations in the Lower Fraser Basin, Fraser River Action Plan, (40), West Esplanade-North Vancouver Canada

Fatima H. Ahmed, A. (2018) Heavy metal pollution -A mini review. J. Bacteriol. Mycol. 6 (3), 179–181.

Fulekar M. H. Ve Jadia C.D., (2008) Phytotoxicity and remediation of heavy metals by fibrous root grass (sorghum) Journal of Applied Biosciences, 10, 491 - 499

Gisbert, CR, Ros A, De Haro DJ, Walker, M, Pilar- Bernal M, Serrano R and Avino JN (2003) A plant genetically modified that accumulates Pb is especially promising for phytoremediation. Biochemical and Biophysical Research Communications (303) 440-445.

Google Earth (Erişim Tarihi: 23.01.2021)  
<https://earth.google.com/web/search/Sinanl%c4%b1,+Babaeski%2fk%c4%b1rklareli/@41.35938264,27.14485173,30.08162743a,434.23742308d,35y,-0h,0t,0r/data=CigiJgokCVS8njWFYzVAEVK8njWFYzXAGQ984dW9pELAIVQBUHUnl2HA>

GRDC, (2017) Grownost, Canola, Grains Research and Development Corporation, Australia.

GRDC (2016), Soybeans, ACT, Australia, Grains Research and Development Corporation, Australia.

GRDC (2010), Raising the bar with better safflower agronomy, ACT, Grains Research and Development Corporation, Australia.

Günhan E., (2019) Ergene nehri su kalitesinin değerlendirilmesi ve yapay sinir ağları ile kimyasal oksijen ihtiyacının belirlenmesi, Sakarya Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya

Gürsoy O. ve Gökçe R. (2000) Soya ve ürünlerinde fenolik bileşikler ve beslenmeyi kısıtlayıcı faktörler, Pamukkale Üniversitesi, Journal Of Engineering Sciences, 7, 87-93

Hanedar A., (2015) Meriç-Ergene Havzası'nda Toprak Örneklerinde Ağır Metal ve Toplam Organik Karbon Tespiti Raporu, Namık Kemal Üniversitesi, Bilimsel Araştırma Projesi, NKU.BAP.00.17.AR.14.04

Helmisaari, H.S., Salemaa, M., Derome, J., Kiikkilo, O., Uhlig, C., Nieminen, T.M., (2007) Remediation of heavy metal contaminated forest soil using recycled organic matter and native woody plants. J. Environ. Qual. 36 (4), 1145–1153.

Jan, A.T., Azam, M., Siddiqui, K., Ali, A., Choi, I., Haq, Q.M., (2015) Heavy metals and human health: mechanistic insight into toxicity and counter defense system of antioxidants. Int. J. Mol. Sci. 16 (12), 29592–29630.

Juris, B., Karina, S., Ikrema, H., Reinis, J., & Sandris, L. (2015) Removal of heavy metals from contaminated soils by electrokinetic remediation, University of Latvia and The University of Western Ontario, Canada.

Kahraman A., Özkul M. (2018) : Ergene Havzası Koruma Eylem Planı Durum Değerlendirme Raporu, Marmara Belediyeler Birliği Çevre Yönetimi Koordinatörlüğü, İstanbul, Türkiye

Khalid, S., Shahid, M., Niazi, N.K., Murtaza, B., Bibi, I., Dumat, C., (2017) A comparison of technologies for remediation of heavy metal contaminated soils. J. Geochem. Explor. 182, 247–268.

Kanarya G., (2013) Kırklareli Yöresindeki Sulama Suyu Kaynaklarında Bulunan Bazı Makro Ve Mikro Elementlerin Tarımsal Açından Değerlendirilmesi Üzerine Bir Araştırma, Yüksek Lisans Tezi, Namık Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Tekirdağ, Türkiye

Karakaş Ö., (2013) Bazı Ağır Metaller (Pb, Cd, Co) İle Kirlenmiş Toprakların Kanola (*Brassica napus* L.) Bitkisi Kullanılarak Bitkisel Arıtım (fitoremediasyon) Tekniği İle Islahı, Namık Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Tekirdağ, Türkiye

Kennish, M.J. (1992) Ecology of Estuaries. Anthropogenic Effects. CRC. Press, Inc.,

Kocaer FO, Kemiksiz A, Başkaya HS (2003). Arıtma Çamuru Uygulanmış Bir Topraktaki Organik Azotun Mineralizasyonu Üzerine Bir Araştırma. *Ekoloji* 12, 46: 12-16.

Kocaman H., Koldere Y., Oğuzhan A. (2011) Trakya’da Ergene Nehri Kirliliğinin Tarım Üretimine Olan Etkisi: Edirne Örneği *Karadeniz Fen Bilimleri Dergisi* ISSN: 1309-4726 FABA (2):5 89-104

Kumar, S.P. ve Kumari B.D.R., (2011) Factors affecting on somatic embryogenesis of safflower (*Carthamus tinctorius* L) at morphological and biochemical levels", *World Journal of Agricultural Sciences*, 7, 197-205

Madanan, M.T., Shah, I.K, Varghese G., Kaushal, Rajendra K., (2021) Application of Aztec Marigold (*Tagetes erecta* L.) for phytoremediation of heavy metal polluted lateritic soil, *Environmental Chemistry and Ecotoxicology* (3), 17–22.

Mao X., Han F., Shao X., Guo K., McComb J., Arslan Z., Zhang Z. (2016) Electro-kinetic remediation coupled with phytoremediation to remove lead, arsenic and cesium from contaminated paddy soil, *Ecotoxicology and Environmental Safety* 125, 16–24.

Maenz DD, Canola protein concentrate for use as a high-valued animal feed ingredient, in *Feed and Industrial Raw Material: Feed*. 2007: China. p. 274-276

Mahar, A., Wang, P., Ali, A., Awasthi, M.K., Lahori, A.H., Wang, Q., Li, R., Zhang, Z., (2016) Challenges and opportunities in the phytoremediation of heavy metals contaminated soils: a review. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 126, 111–121.

Markley S. K. 1950. Soybeans and Soybean Products, Vol. 1, New York, USA. P, 15-210.

Marrugo-Negrete, J., Pinedo-Hernández, J., Díez, S., (2017) Assessment of heavy metal pollution, spatial distribution and origin in agricultural soils along the Sinú River Basin, Colombia. *Environ. Res.* 154, 380–388.

Meriç – Ergene Havzası Koruma Eylem Planı (2008) Çevre ve Orman Bakanlığı, Çevre Yönetimi Genel Müdürlüğü, Türkiye

Mukhopadhyay, S., Maiti, S.K., (2010) Phytoremediation of metal enriched mine waste: a review. *Glob. J. Environ. Res.* 4, 135–150.

Mukesh, K.R., Kumar, P., Singh, M., Singh, A.,( 2008) Toxic effect of heavy metals in livestock health. *Veterin World* 1, 28–30.

Nejad Z.D, Jung M.C, Kim K. (2017) Remediation of soils contaminated with heavy metals with an emphasis on immobilization technology. *Environ. Geochem. Health* 1-27.

Ojuederie O.B., ve Babalola O.O, (2017) Microbial and Plant-Assisted Bioremediation of Heavy Metal Polluted Environments: A Review , *South Africa Int. J. Environ. Res. Public Health*,14, 1504.

Pais I. ve Jones J.B., 2000. Handbook of trace elements. St. Lucie Press, Boca Raton, Florida, USA, 222 p.

Pajevic, S., Borisev, M., Nikolic, N., Arsenov, D.D., Orlovic, S., Zupunski, M., (2016) Phytoextraction of heavy metals by fast-growing trees: a review. In: Tsao, D. (Ed.), *Phytoremediation*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, pp. 29–64.

Pearl, S. A., Bowers, J. E., Reyes-Chin-Wo, S., Michelmores, R. W., Burke, J. M., (2014) Genetic Analysis of Safflower Domestication, *Bmc Plant Biology*, 14 43.

Ramanjaneyulu, A.V., Neelima, T.L., Madhavi, A., Ramprakash, T., (2017) Phytoremediation: an overview. In: Humberto, R.M., Ashok, G.R., Thakur, K., Sarkar, N.C. (Eds.), *Applied Botany*. American Academic Press, pp. 42–84.

Rizzi, L., Petruzzelli, G., Poggio, G. ve Vigna Guidi, G.,( 2004) Soil Physical Changes and Plant Availability of Zn and Pb in a Treatability Test of Phytostabilization. *Chemosphere*, 57, 1039-1046.

Sungur, A. (2013) Ardisık Ekstraksiyon Yöntemiyle Ergene Havzasından Alınan Toprak Örneklerinde Metal Analizi, Doktora Tezi, Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Çanakkale, Türkiye

Sürek, H. (2003) Ergene Nehri Kirliliğinin Çeltik Tarımına Olan Etkisi, *HASAD Aylık Gıda, Tarım ve Hayvancılık Dergisi*, (213), 70-71, İstanbul

Shen ZG., Zhao FJ., McGrath SP. (1997) Uptake And Transport Of Zinc in the Hyperaccumulator *Thlaspi Caerules* and The Non- Hyperaccumulator *Thlaspi Ochroleucum*, *Plant Cell Environ.* (20) 898-906.

Shi, G., Liu, C., Cai, Q., Liu, Q., ve Hou, C., (2010) Cadmium Accumulation and Tolerance of Two Safflower Cultivars in Relation to Photosynthesis and Antioxidative Enzymes, *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 85 256–263.

Singh R.J., (2007) Genetic resources, chromosome engineering and crop improvement. CRC Press Inc. Boca Raton, Florida, USA.

Singh, V., Bhargava, M., (2017) Phytomining: principles and Applications. In: Bhargava, A., Srivastava, S. (Eds.), *Biotechnology: Recent Trends and Emerging Dimensions*. CRC Press, pp. 141–159.

Smith SL., Thelen KD., MacDonald SJ. (2013) Yield and quality analyses of bioenergy crops grown on a regulatory brownfield. *Biomass Bioenerg* 49, 123–30.

Belouchrani A.S., Mameri, N., Abdi, N., Gribb, H., Lounici, H., Drouichec N., (2016) Phytoremediation of soil contaminated with Zn using Canola(*Brassica napus* L) *Ecological Engineering*, 95, 43–49

Rascio N, Navari-Izzo F, (2011) Heavy metal hyperaccumulating plants: How and why do they do it? And what makes them so interesting?, *Plant Science* 180 (2): 169–181.

Thangavel, P., Subbhuraam, C., (2004) Phytoextraction: role of hyperaccumulators in metal contaminated soils, *Proc. Indian Natl. Sci. Acad.* 70, 109 – 130.

Tokatlı C. ve Varol M. (2021) Impact of the COVID-19 lockdown period on surface water quality in the Meriç-Ergene River Basin, Northwest Turkey, *Environmental Research* 197, 111051

Tok H.H. (1997) Çevre Kirliliği. Anadolu Matbaacılık, İstanbul.

Turan H, Horuz A (2012). Bitki Besleme (Ed: MR Karaman). Bölüm: 3, Bitki Beslemenin Temel İlkeleri. Dumat Ofset, Matbacılık San. Tic. Ltd. Şti., 1080 s, Ankara.

United States Environmental Protection Agency - US EPA, (2016) Health Effects Assessment Summary Tables (HEAST); Annual Update. United States Environmental Protection Agency, Washington, DC, USA.

Wachsmann N., Potter T., Byrne R., Knights S. (2010) Raising the bar with better safflower agronomy. Agronomic information and safflower case studies. GRDC, Australia

Weiss E.A, (2000) Safflower. In: Oil seed Crops. 2nd ed. Blackwell Science, Oxford.

Xia, S., Song, Z., Jeyakumar, P., Shaheen, S.M., Rinklebe, J., Ok, Y.S., Bolan, N., Wang, H., (2019) A critical review on bioremediation technologies for Cr (VI)-contaminated soils and wastewater. *Crit. Rev. Environ. Sci. Technol.* 1–52

Var, I. (1999) Soya Fasulyesinin Gıda Endüstrisinde ve Beslenmedeki Yeri ve Değeri. *Gıda Bilimi ve Teknolojisi*. 3 (4), 74-88.

Zaghloul A., Saber M. (2019) Modern Technologies in Remediation of Heavy Metals in Soils, *Int. J. of Environmental Pollution & Environmental Modelling*, 2(1): 10-19.

## 6. EKLER

**Ek 1-Tablo 6.1:** ICP-MS analizi ile tespit edilen toprak element konsantrasyon değerleri

|              | T0<br>(Ham<br>Tarla<br>Toprağı) | T1<br>(Voltajsız<br>Aspir<br>Toprağı) | T2<br>(Voltajsız<br>Soya<br>Fasulyesi<br>Toprağı) | T3<br>(Sabit<br>Kutuplu<br>Aspir<br>Toprağı) | T4<br>(Sabit<br>Kutuplu<br>Soya<br>Fasulyesi<br>Toprağı) | T5<br>(Değişken<br>Kutuplu<br>Aspir<br>Toprağı) | T6<br>(Değişken<br>Kutuplu<br>Soya<br>Fasulyesi<br>Toprağı) | T7<br>(Şahit<br>Numune) | T8<br>(Kanola<br>Toprağı) |
|--------------|---------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------------------|----------------------------------------------|----------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|-------------------------|---------------------------|
| Ag<br>(ug/g) | 0,134                           | 0,136                                 | 0,177                                             | 0,142                                        | 0,138                                                    | 0,138                                           | 0,153                                                       | 0,148                   | 0,151                     |
| Al<br>(ug/g) | 45430,864                       | 42270,221                             | 46247,238                                         | 40808,437                                    | 43514,072                                                | 42838,355                                       | 45511,652                                                   | 45940,404               | 47058,834                 |
| As<br>(ug/g) | 7,506                           | 6,952                                 | 8,635                                             | 6,989                                        | 7,601                                                    | 7,399                                           | 7,641                                                       | 7,832                   | 7,844                     |
| B<br>(ug/g)  | 21,125                          | 19,813                                | 21,229                                            | 18,951                                       | 19,279                                                   | 19,027                                          | 21,182                                                      | 20,763                  | 20,730                    |
| Ba<br>(ug/g) | 213,775                         | 204,028                               | 213,240                                           | 192,890                                      | 207,143                                                  | 196,205                                         | 218,545                                                     | 214,341                 | 211,735                   |
| Be<br>(ug/g) | 1,735                           | 1,652                                 | 1,685                                             | 1,596                                        | 1,680                                                    | 1,628                                           | 1,752                                                       | 1,742                   | 1,727                     |
| Cd<br>(ug/g) | 0,150                           | 0,159                                 | 0,193                                             | 0,160                                        | 0,154                                                    | 0,152                                           | 0,168                                                       | 0,156                   | 0,164                     |
| Co<br>(ug/g) | 15,603                          | 14,660                                | 15,793                                            | 14,111                                       | 15,313                                                   | 14,789                                          | 15,805                                                      | 15,542                  | 15,628                    |
| Cr<br>(ug/g) | 143,452                         | 134,177                               | 137,149                                           | 129,971                                      | 138,721                                                  | 135,311                                         | 144,637                                                     | 145,277                 | 143,120                   |
| Cu<br>(ug/g) | 26,862                          | 25,523                                | 29,603                                            | 25,171                                       | 26,910                                                   | 26,220                                          | 27,522                                                      | 29,387                  | 28,997                    |
| Fe<br>(ug/g) | 30785,010                       | 28944,147                             | 31642,210                                         | 27823,439                                    | 30277,290                                                | 29210,843                                       | 31402,314                                                   | 31493,636               | 31442,262                 |
| Li<br>(ug/g) | 31,651                          | 30,493                                | 31,227                                            | 29,078                                       | 30,280                                                   | 29,685                                          | 32,710                                                      | 31,893                  | 32,006                    |
| Mn<br>(ug/g) | 875,970                         | 805,089                               | 838,196                                           | 779,166                                      | 861,243                                                  | 800,382                                         | 884,922                                                     | 842,867                 | 863,714                   |
| Mo<br>(ug/g) | 0,521                           | 0,435                                 | 0,560                                             | 0,462                                        | 0,464                                                    | 0,443                                           | 0,526                                                       | 0,530                   | 0,512                     |
| Na<br>(ug/g) | 1277,748                        | 1071,089                              | 1130,573                                          | 483,980                                      | 415,352                                                  | 1162,886                                        | 1148,343                                                    | 1248,462                | 906,693                   |
| Ni<br>(ug/g) | 64,555                          | 60,700                                | 64,368                                            | 59,078                                       | 64,106                                                   | 60,752                                          | 65,310                                                      | 64,808                  | 64,958                    |
| Pb<br>(ug/g) | 22,580                          | 20,398                                | 22,291                                            | 19,113                                       | 19,550                                                   | 19,899                                          | 20,929                                                      | 20,515                  | 19,947                    |
| Sb<br>(ug/g) | 10,192                          | 4,916                                 | 2,699                                             | 2,117                                        | 1,289                                                    | 2,274                                           | 1,157                                                       | 1,828                   | 1,262                     |
| Se<br>(ug/g) | 0,718                           | 0,800                                 | 0,979                                             | 0,815                                        | 0,964                                                    | 1,287                                           | 1,011                                                       | 1,061                   | 1,070                     |
| Si<br>(ug/g) | 69,987                          | 87,588                                | 101,011                                           | 119,162                                      | 157,077                                                  | 192,570                                         | 132,928                                                     | 68,628                  | 106,072                   |
| Sn<br>(ug/g) | 2,666                           | 2,573                                 | 2,641                                             | 2,552                                        | 2,591                                                    | 2,547                                           | 2,779                                                       | 2,737                   | 2,699                     |
| Ti<br>(ug/g) | 630,918                         | 594,002                               | 660,936                                           | 574,387                                      | 572,325                                                  | 583,832                                         | 596,903                                                     | 621,871                 | 652,289                   |
| V<br>(ug/g)  | 67,984                          | 63,070                                | 69,611                                            | 60,773                                       | 65,263                                                   | 63,775                                          | 67,027                                                      | 68,184                  | 68,883                    |
| Zn<br>(ug/g) | 72,490                          | 68,860                                | 78,318                                            | 66,770                                       | 105,423                                                  | 71,400                                          | 73,636                                                      | 72,969                  | 73,982                    |

**Ek 2-Tablo 6.2:** Voltaj uygulaması yapılmayan aspir (*Carthamus tinctorius*) bitki kısımlarına ait element konsantrasyon değerleri

|                      | <b>BELİRSİZLİK<br/>ORANI (%)</b> | <b>1A</b> | <b>1A<br/>BELİRSİZLİK<br/>±</b> | <b>1B</b> | <b>1B<br/>BELİRSİZLİK<br/>±</b> | <b>1C</b> | <b>1C<br/>BELİRSİZLİK<br/>±</b> |
|----------------------|----------------------------------|-----------|---------------------------------|-----------|---------------------------------|-----------|---------------------------------|
| <b>Ag<br/>(ug/g)</b> | 21,4                             | 0,093     | 0,020                           | 0,081     | 0,017                           | 0,063     | 0,014                           |
| <b>Al<br/>(ug/g)</b> | 7,5                              | 1060,768  | 79,558                          | 581,392   | 43,604                          | 2642,119  | 198,159                         |
| <b>As<br/>(ug/g)</b> | 13,5                             | 0,575     | 0,078                           | 0,749     | 0,101                           | 1,776     | 0,240                           |
| <b>B<br/>(ug/g)</b>  | 7,2                              | 53,753    | 3,870                           | 33,546    | 2,415                           | 38,258    | 2,755                           |
| <b>Ba<br/>(ug/g)</b> | 8,3                              | 19,092    | 1,585                           | 17,299    | 1,436                           | 30,891    | 2,564                           |
| <b>Be<br/>(ug/g)</b> |                                  | 0,036     |                                 | 0,028     |                                 | 0,107     |                                 |
| <b>Cd<br/>(ug/g)</b> | 9,6                              | 0,878     | 0,084                           | 0,813     | 0,078                           | 1,000     | 0,096                           |
| <b>Co<br/>(ug/g)</b> | 10,2                             | 0,542     | 0,055                           | 0,297     | 0,030                           | 1,195     | 0,122                           |
| <b>Cr<br/>(ug/g)</b> | 13,1                             | 4,085     | 0,535                           | 2,090     | 0,274                           | 9,167     | 1,201                           |
| <b>Cu<br/>(ug/g)</b> | 5,9                              | 14,527    | 0,857                           | 11,094    | 0,655                           | 15,836    | 0,934                           |
| <b>Fe<br/>(ug/g)</b> | 7,4                              | 894,960   | 66,227                          | 451,944   | 33,444                          | 1941,388  | 143,663                         |
| <b>Li<br/>(ug/g)</b> | 14,8                             | 0,973     | 0,144                           | 0,585     | 0,087                           | 2,005     | 0,297                           |
| <b>Mn<br/>(ug/g)</b> | 10,5                             | 87,631    | 9,201                           | 37,192    | 3,905                           | 101,253   | 10,632                          |
| <b>Mo<br/>(ug/g)</b> | 7,6                              | 1,106     | 0,084                           | 0,591     | 0,045                           | 0,673     | 0,051                           |
| <b>Na<br/>(ug/g)</b> | 12,4                             | 12374,698 | 1534,463                        | 11682,100 | 1448,580                        | 15271,887 | 1893,714                        |
| <b>Ni<br/>(ug/g)</b> | 14,7                             | 3,395     | 0,499                           | 2,324     | 0,342                           | 6,403     | 0,941                           |
| <b>Pb<br/>(ug/g)</b> | 13,2                             | 1,385     | 0,183                           | 0,793     | 0,105                           | 2,042     | 0,270                           |
| <b>Sb<br/>(ug/g)</b> | 3,9                              | 12,079    | 0,471                           | 6,718     | 0,262                           | 8,696     | 0,339                           |
| <b>Se<br/>(ug/g)</b> | 13,7                             | 0,133     | 0,018                           | 0,133     | 0,018                           | 0,272     | 0,037                           |
| <b>Si<br/>(ug/g)</b> | 4,6                              | 1024,944  | 47,147                          | 896,138   | 41,222                          | 1032,068  | 47,475                          |
| <b>Sn<br/>(ug/g)</b> | 4,5                              | 1,048     | 0,047                           | 0,469     | 0,021                           | 0,549     | 0,025                           |
| <b>Ti<br/>(ug/g)</b> | 5,4                              | 18,630    | 1,006                           | 13,019    | 0,703                           | 42,767    | 2,309                           |
| <b>V<br/>(ug/g)</b>  | 10,1                             | 2,527     | 0,255                           | 2,035     | 0,205                           | 5,639     | 0,570                           |
| <b>Zn<br/>(ug/g)</b> | 7,9                              | 51,701    | 4,084                           | 40,275    | 3,182                           | 47,963    | 3,789                           |

**Ek 3-Tablo 6.3:** Sabit kutup voltaj uygulaması yapılan aspir (*Carthamus tinctorius*) bitki kısımlarına ait element konsantrasyon değerleri

|                      | <b>BELİRSİZLİK<br/>ORANI (%)</b> | <b>3A</b> | <b>3A -<br/>BELİRSİZLİK<br/>±</b> | <b>3B</b> | <b>3B -<br/>BELİRSİZLİK<br/>±</b> | <b>3C</b> | <b>3C -<br/>BELİRSİZLİK<br/>±</b> |
|----------------------|----------------------------------|-----------|-----------------------------------|-----------|-----------------------------------|-----------|-----------------------------------|
| <b>Ag<br/>(ug/g)</b> | 21,4                             | 0,045     | 0,010                             | 0,033     | 0,007                             | 0,083     | 0,018                             |
| <b>Al<br/>(ug/g)</b> | 7,5                              | 880,797   | 66,060                            | 320,865   | 24,065                            | 3872,152  | 290,411                           |
| <b>As<br/>(ug/g)</b> | 13,5                             | 0,960     | 0,130                             | 1,442     | 0,195                             | 3,304     | 0,446                             |
| <b>B<br/>(ug/g)</b>  | 7,2                              | 68,543    | 4,935                             | 33,726    | 2,428                             | 44,355    | 3,194                             |
| <b>Ba<br/>(ug/g)</b> | 8,3                              | 20,225    | 1,679                             | 24,489    | 2,033                             | 49,404    | 4,101                             |
| <b>Be<br/>(ug/g)</b> |                                  | 0,093     |                                   | 0,041     |                                   | 0,182     |                                   |
| <b>Cd<br/>(ug/g)</b> | 9,6                              | 0,594     | 0,057                             | 0,549     | 0,053                             | 0,813     | 0,078                             |
| <b>Co<br/>(ug/g)</b> | 10,2                             | 0,964     | 0,098                             | 0,562     | 0,057                             | 1,857     | 0,189                             |
| <b>Cr<br/>(ug/g)</b> | 13,1                             | 4,788     | 0,627                             | 3,189     | 0,418                             | 17,465    | 2,288                             |
| <b>Cu<br/>(ug/g)</b> | 5,9                              | 17,962    | 1,060                             | 12,003    | 0,708                             | 17,893    | 1,056                             |
| <b>Fe<br/>(ug/g)</b> | 7,4                              | 963,812   | 71,322                            | 257,394   | 19,047                            | 3101,724  | 229,528                           |
| <b>Li<br/>(ug/g)</b> | 14,8                             | 0,928     | 0,137                             | 0,370     | 0,055                             | 2,830     | 0,419                             |
| <b>Mn<br/>(ug/g)</b> | 10,5                             | 153,392   | 16,106                            | 60,216    | 6,323                             | 148,011   | 15,541                            |
| <b>Mo<br/>(ug/g)</b> | 7,6                              | 3,790     | 0,288                             | 1,805     | 0,137                             | 1,985     | 0,151                             |
| <b>Na<br/>(ug/g)</b> | 12,4                             | 6297,239  | 780,858                           | 7786,675  | 965,548                           | 7627,639  | 945,827                           |
| <b>Ni<br/>(ug/g)</b> | 14,7                             | 5,002     | 0,735                             | 3,890     | 0,572                             | 9,719     | 1,429                             |
| <b>Pb<br/>(ug/g)</b> | 13,2                             | 1,110     | 0,147                             | 0,885     | 0,117                             | 5,546     | 0,732                             |
| <b>Sb<br/>(ug/g)</b> | 3,9                              | 1,769     | 0,069                             | 5,200     | 0,203                             | 86,659    | 3,380                             |
| <b>Se<br/>(ug/g)</b> | 13,7                             | 1,082     | 0,148                             | 0,768     | 0,105                             | 1,130     | 0,155                             |
| <b>Si<br/>(ug/g)</b> | 4,6                              | 891,878   | 41,026                            | 542,388   | 24,950                            | 2443,265  | 112,390                           |
| <b>Sn<br/>(ug/g)</b> | 4,5                              | 4,025     | 0,181                             | 1,158     | 0,052                             | 1,655     | 0,074                             |
| <b>Ti<br/>(ug/g)</b> | 5,4                              | 14,284    | 0,771                             | 6,240     | 0,337                             | 64,662    | 3,492                             |
| <b>V<br/>(ug/g)</b>  | 10,1                             | 2,809     | 0,284                             | 2,839     | 0,287                             | 13,190    | 1,332                             |
| <b>Zn<br/>(ug/g)</b> | 7,9                              | 387,909   | 30,645                            | 48,146    | 3,804                             | 46,000    | 3,634                             |

**Ek 4-Tablo 6.4:** Değişken kutup voltaj uygulaması yapılan aspir (*Carthamus tinctorius*)  
bitki kısımlarına ait element konsantrasyon değerleri

|                      | <b>BELİRSİZLİK<br/>ORANI (%)</b> | <b>5A</b> | <b>5A -<br/>BELİRSİZLİK<br/>±</b> | <b>5B</b> | <b>5B -<br/>BELİRSİZLİK<br/>±</b> | <b>5C</b> | <b>5C -<br/>BELİRSİZLİK<br/>±</b> |
|----------------------|----------------------------------|-----------|-----------------------------------|-----------|-----------------------------------|-----------|-----------------------------------|
| <b>Ag<br/>(ug/g)</b> | 21,4                             | 0,032     | 0,007                             | 0,018     | 0,004                             | 0,121     | 0,026                             |
| <b>Al<br/>(ug/g)</b> | 7,5                              | 640,918   | 48,069                            | 482,667   | 36,200                            | 3920,431  | 294,032                           |
| <b>As<br/>(ug/g)</b> | 13,5                             | 0,520     | 0,070                             | 1,063     | 0,144                             | 3,212     | 0,434                             |
| <b>B<br/>(ug/g)</b>  | 7,2                              | 51,387    | 3,700                             | 34,801    | 2,506                             | 33,452    | 2,409                             |
| <b>Ba<br/>(ug/g)</b> | 8,3                              | 13,468    | 1,118                             | 17,985    | 1,493                             | 59,802    | 4,964                             |
| <b>Be<br/>(ug/g)</b> |                                  | 0,025     |                                   | 0,020     |                                   | 0,181     |                                   |
| <b>Cd<br/>(ug/g)</b> | 9,6                              | 0,764     | 0,073                             | 0,678     | 0,065                             | 0,587     | 0,056                             |
| <b>Co<br/>(ug/g)</b> | 10,2                             | 0,344     | 0,035                             | 0,277     | 0,028                             | 1,844     | 0,188                             |
| <b>Cr<br/>(ug/g)</b> | 13,1                             | 2,451     | 0,321                             | 1,856     | 0,243                             | 14,371    | 1,883                             |
| <b>Cu<br/>(ug/g)</b> | 5,9                              | 14,807    | 0,874                             | 10,499    | 0,619                             | 17,636    | 1,041                             |
| <b>Fe<br/>(ug/g)</b> | 7,4                              | 632,299   | 46,790                            | 397,322   | 29,402                            | 3140,617  | 232,406                           |
| <b>Li<br/>(ug/g)</b> | 14,8                             | 0,632     | 0,094                             | 0,457     | 0,068                             | 2,956     | 0,437                             |
| <b>Mn<br/>(ug/g)</b> | 10,5                             | 73,329    | 7,700                             | 38,856    | 4,080                             | 121,880   | 12,797                            |
| <b>Mo<br/>(ug/g)</b> | 7,6                              | 1,703     | 0,129                             | 0,799     | 0,061                             | 1,501     | 0,114                             |
| <b>Na<br/>(ug/g)</b> | 12,4                             | 7578,760  | 939,766                           | 7270,089  | 901,491                           | 5623,884  | 697,362                           |
| <b>Ni<br/>(ug/g)</b> | 14,7                             | 2,432     | 0,357                             | 2,176     | 0,320                             | 9,416     | 1,384                             |
| <b>Pb<br/>(ug/g)</b> | 13,2                             | 0,777     | 0,103                             | 0,932     | 0,123                             | 6,900     | 0,911                             |
| <b>Sb<br/>(ug/g)</b> | 3,9                              | 1,192     | 0,047                             | 12,181    | 0,475                             | 91,500    | 3,569                             |
| <b>Se<br/>(ug/g)</b> | 13,7                             | 0,300     | 0,041                             | 0,193     | 0,026                             | 0,556     | 0,076                             |
| <b>Si<br/>(ug/g)</b> | 4,6                              | 683,449   | 31,439                            | 813,824   | 37,436                            | 3372,125  | 155,118                           |
| <b>Sn<br/>(ug/g)</b> | 4,5                              | 3,027     | 0,136                             | 1,269     | 0,057                             | 1,629     | 0,073                             |
| <b>Ti<br/>(ug/g)</b> | 5,4                              | 13,923    | 0,752                             | 10,475    | 0,566                             | 69,532    | 3,755                             |
| <b>V<br/>(ug/g)</b>  | 10,1                             | 2,255     | 0,228                             | 2,392     | 0,242                             | 15,775    | 1,593                             |
| <b>Zn<br/>(ug/g)</b> | 7,9                              | 88,220    | 6,969                             | 37,559    | 2,967                             | 154,124   | 12,176                            |

**Ek 5-Tablo 6.5:** Voltaj uygulaması yapılmayan soya fasulyesi (*Glycine max*) bitki kısımlarına ait element konsantrasyon değerleri

|                      | <b>BELİRSİZLİK<br/>ORANI (%)</b> | <b>2A</b> | <b>2A -<br/>BELİRSİZLİK<br/>±</b> | <b>2B</b> | <b>2B -<br/>BELİRSİZLİK<br/>±</b> | <b>2C</b> | <b>2C -<br/>BELİRSİZLİK<br/>±</b> |
|----------------------|----------------------------------|-----------|-----------------------------------|-----------|-----------------------------------|-----------|-----------------------------------|
| <b>Ag<br/>(ug/g)</b> | 21,4                             | 0,071     | 0,015                             | 0,028     | 0,006                             | 0,034     | 0,007                             |
| <b>Al<br/>(ug/g)</b> | 7,5                              | 483,702   | 36,278                            | 364,762   | 27,357                            | 3907,746  | 293,081                           |
| <b>As<br/>(ug/g)</b> | 13,5                             | 0,486     | 0,066                             | 0,573     | 0,077                             | 1,083     | 0,146                             |
| <b>B<br/>(ug/g)</b>  | 7,2                              | 95,320    | 6,863                             | 26,488    | 1,907                             | 23,531    | 1,694                             |
| <b>Ba<br/>(ug/g)</b> | 8,3                              | 19,676    | 1,633                             | 14,479    | 1,202                             | 28,635    | 2,377                             |
| <b>Be<br/>(ug/g)</b> |                                  | 0,022     |                                   | 0,018     |                                   | 0,151     |                                   |
| <b>Cd<br/>(ug/g)</b> | 9,6                              | 0,066     | 0,006                             | 0,095     | 0,009                             | 0,311     | 0,030                             |
| <b>Co<br/>(ug/g)</b> | 10,2                             | 0,373     | 0,038                             | 0,212     | 0,022                             | 1,290     | 0,132                             |
| <b>Cr<br/>(ug/g)</b> | 13,1                             | 2,040     | 0,267                             | 1,249     | 0,164                             | 14,016    | 1,836                             |
| <b>Cu<br/>(ug/g)</b> | 5,9                              | 10,074    | 0,594                             | 7,830     | 0,462                             | 11,488    | 0,678                             |
| <b>Fe<br/>(ug/g)</b> | 7,4                              | 451,211   | 33,390                            | 272,528   | 20,167                            | 2760,813  | 204,300                           |
| <b>Li<br/>(ug/g)</b> | 14,8                             | 0,460     | 0,068                             | 0,638     | 0,094                             | 2,984     | 0,442                             |
| <b>Mn<br/>(ug/g)</b> | 10,5                             | 182,118   | 19,122                            | 27,859    | 2,925                             | 71,566    | 7,514                             |
| <b>Mo<br/>(ug/g)</b> | 7,6                              | 3,634     | 0,276                             | 7,151     | 0,543                             | 9,280     | 0,705                             |
| <b>Na<br/>(ug/g)</b> | 12,4                             | 459,174   | 56,938                            | 10552,580 | 1308,520                          | 7507,834  | 930,971                           |
| <b>Ni<br/>(ug/g)</b> | 14,7                             | 6,132     | 0,901                             | 6,022     | 0,885                             | 7,814     | 1,149                             |
| <b>Pb<br/>(ug/g)</b> | 13,2                             | 0,611     | 0,081                             | 0,607     | 0,080                             | 2,763     | 0,365                             |
| <b>Sb<br/>(ug/g)</b> | 3,9                              | 1,268     | 0,049                             | 10,005    | 0,390                             | 32,087    | 1,251                             |
| <b>Se<br/>(ug/g)</b> | 13,7                             | 0,179     | 0,025                             | 0,149     | 0,020                             | 0,474     | 0,065                             |
| <b>Si<br/>(ug/g)</b> | 4,6                              | 568,899   | 26,169                            | 728,436   | 33,508                            | 1037,103  | 47,707                            |
| <b>Sn<br/>(ug/g)</b> | 4,5                              | 1,012     | 0,046                             | 0,322     | 0,014                             | 0,380     | 0,017                             |
| <b>Ti<br/>(ug/g)</b> | 5,4                              | 10,323    | 0,557                             | 8,961     | 0,484                             | 65,591    | 3,542                             |
| <b>V<br/>(ug/g)</b>  | 10,1                             | 1,933     | 0,195                             | 2,230     | 0,225                             | 8,543     | 0,863                             |
| <b>Zn<br/>(ug/g)</b> | 7,9                              | 32,162    | 2,541                             | 18,713    | 1,478                             | 17,668    | 1,396                             |

**Ek 6-Tablo 6.6:** Değişken kutuplu voltaj uygulaması yapılan soya fasulyesi (*Glycine max*) bitki kısımlarına ait element konsantrasyon değerleri

|                      | <b>BELİRSİZLİK<br/>ORANI (%)</b> | <b>4A</b> | <b>4A -<br/>BELİRSİZLİK<br/>±</b> | <b>4B</b> | <b>4B -<br/>BELİRSİZLİK<br/>±</b> | <b>4C</b> | <b>4C -<br/>BELİRSİZLİK<br/>±</b> |
|----------------------|----------------------------------|-----------|-----------------------------------|-----------|-----------------------------------|-----------|-----------------------------------|
| <b>Ag<br/>(ug/g)</b> | 21,4                             | 0,028     | 0,006                             | 0,017     | 0,004                             | 0,027     | 0,006                             |
| <b>Al<br/>(ug/g)</b> | 7,5                              | 157,987   | 11,849                            | 289,614   | 21,721                            | 3097,176  | 232,288                           |
| <b>As<br/>(ug/g)</b> | 13,5                             | 0,651     | 0,088                             | 0,596     | 0,080                             | 1,195     | 0,161                             |
| <b>B<br/>(ug/g)</b>  | 7,2                              | 104,365   | 7,514                             | 38,380    | 2,763                             | 32,130    | 2,313                             |
| <b>Ba<br/>(ug/g)</b> | 8,3                              | 22,614    | 1,877                             | 28,905    | 2,399                             | 34,887    | 2,896                             |
| <b>Be<br/>(ug/g)</b> |                                  | 0,014     |                                   | 0,053     |                                   | 0,158     |                                   |
| <b>Cd<br/>(ug/g)</b> | 9,6                              | 0,042     | 0,004                             | 0,077     | 0,007                             | 0,240     | 0,023                             |
| <b>Co<br/>(ug/g)</b> | 10,2                             | 0,473     | 0,048                             | 0,440     | 0,045                             | 1,479     | 0,151                             |
| <b>Cr<br/>(ug/g)</b> | 13,1                             | 2,471     | 0,324                             | 2,111     | 0,277                             | 19,751    | 2,587                             |
| <b>Cu<br/>(ug/g)</b> | 5,9                              | 13,636    | 0,805                             | 11,434    | 0,675                             | 15,375    | 0,907                             |
| <b>Fe<br/>(ug/g)</b> | 7,4                              | 265,759   | 19,666                            | 195,328   | 14,454                            | 2103,943  | 155,692                           |
| <b>Li<br/>(ug/g)</b> | 14,8                             | 0,146     | 0,022                             | 0,536     | 0,079                             | 2,290     | 0,339                             |
| <b>Mn<br/>(ug/g)</b> | 10,5                             | 144,521   | 15,175                            | 71,652    | 7,523                             | 89,264    | 9,373                             |
| <b>Mo<br/>(ug/g)</b> | 7,6                              | 7,214     | 0,548                             | 11,394    | 0,866                             | 12,958    | 0,985                             |
| <b>Na<br/>(ug/g)</b> | 12,4                             | 252,194   | 31,272                            | 1390,034  | 172,364                           | 4946,762  | 613,399                           |
| <b>Ni<br/>(ug/g)</b> | 14,7                             | 12,116    | 1,781                             | 12,865    | 1,891                             | 12,997    | 1,911                             |
| <b>Pb<br/>(ug/g)</b> | 13,2                             | 0,499     | 0,066                             | 0,614     | 0,081                             | 3,161     | 0,417                             |
| <b>Sb<br/>(ug/g)</b> | 3,9                              | 1,314     | 0,051                             | 8,340     | 0,325                             | 28,503    | 1,112                             |
| <b>Se<br/>(ug/g)</b> | 13,7                             | 0,806     | 0,110                             | 0,530     | 0,073                             | 0,823     | 0,113                             |
| <b>Si<br/>(ug/g)</b> | 4,6                              | 558,308   | 25,682                            | 656,903   | 30,218                            | 991,802   | 45,623                            |
| <b>Sn<br/>(ug/g)</b> | 4,5                              | 3,507     | 0,158                             | 1,601     | 0,072                             | 0,659     | 0,030                             |
| <b>Ti<br/>(ug/g)</b> | 5,4                              | 6,672     | 0,360                             | 6,740     | 0,364                             | 49,190    | 2,656                             |
| <b>V<br/>(ug/g)</b>  | 10,1                             | 1,644     | 0,166                             | 1,841     | 0,186                             | 9,175     | 0,927                             |
| <b>Zn<br/>(ug/g)</b> | 7,9                              | 43,665    | 3,450                             | 31,394    | 2,480                             | 27,689    | 2,187                             |

**Ek 7-Tablo 6.7:** Değişken kutuplu voltaj uygulaması yapılan soya fasulyesi (*Glycine max*) bitki kısımlarına ait element konsantrasyon değerleri

|                      | <b>BELİRSİZLİK<br/>ORANI (%)</b> | <b>6A</b> | <b>6A -<br/>BELİRSİZLİK<br/>±</b> | <b>6B</b> | <b>6B -<br/>BELİRSİZLİK<br/>±</b> | <b>6C</b> | <b>6C -<br/>BELİRSİZLİK<br/>±</b> |
|----------------------|----------------------------------|-----------|-----------------------------------|-----------|-----------------------------------|-----------|-----------------------------------|
| <b>Ag<br/>(ug/g)</b> | 21,4                             | 0,037     | 0,008                             | 0,024     | 0,005                             | 0,080     | 0,017                             |
| <b>Al<br/>(ug/g)</b> | 7,5                              | 357,651   | 26,824                            | 607,778   | 45,583                            | 9865,376  | 739,903                           |
| <b>As<br/>(ug/g)</b> | 13,5                             | 0,698     | 0,094                             | 0,733     | 0,099                             | 2,515     | 0,340                             |
| <b>B<br/>(ug/g)</b>  | 7,2                              | 88,666    | 6,384                             | 44,990    | 3,239                             | 28,664    | 2,064                             |
| <b>Ba<br/>(ug/g)</b> | 8,3                              | 21,105    | 1,752                             | 21,112    | 1,752                             | 59,044    | 4,901                             |
| <b>Be<br/>(ug/g)</b> |                                  | 0,019     |                                   | 0,042     |                                   | 0,448     |                                   |
| <b>Cd<br/>(ug/g)</b> | 9,6                              | 0,043     | 0,004                             | 0,084     | 0,008                             | 0,410     | 0,039                             |
| <b>Co<br/>(ug/g)</b> | 10,2                             | 0,532     | 0,054                             | 0,602     | 0,061                             | 3,846     | 0,392                             |
| <b>Cr<br/>(ug/g)</b> | 13,1                             | 1,998     | 0,262                             | 2,522     | 0,330                             | 36,808    | 4,822                             |
| <b>Cu<br/>(ug/g)</b> | 5,9                              | 13,983    | 0,825                             | 13,729    | 0,810                             | 28,270    | 1,668                             |
| <b>Fe<br/>(ug/g)</b> | 7,4                              | 377,859   | 27,962                            | 440,021   | 32,562                            | 6937,602  | 513,383                           |
| <b>Li<br/>(ug/g)</b> | 14,8                             | 0,669     | 0,099                             | 1,109     | 0,164                             | 6,794     | 1,006                             |
| <b>Mn<br/>(ug/g)</b> | 10,5                             | 173,437   | 18,211                            | 66,076    | 6,938                             | 204,020   | 21,422                            |
| <b>Mo<br/>(ug/g)</b> | 7,6                              | 3,417     | 0,260                             | 12,272    | 0,933                             | 6,700     | 0,509                             |
| <b>Na<br/>(ug/g)</b> | 12,4                             | 4412,873  | 547,196                           | 29771,062 | 3691,612                          | 6098,022  | 756,155                           |
| <b>Ni<br/>(ug/g)</b> | 14,7                             | 13,529    | 1,989                             | 13,803    | 2,029                             | 18,574    | 2,730                             |
| <b>Pb<br/>(ug/g)</b> | 13,2                             | 0,786     | 0,104                             | 0,703     | 0,093                             | 7,286     | 0,962                             |
| <b>Sb<br/>(ug/g)</b> | 3,9                              | 6,251     | 0,244                             | 5,307     | 0,207                             | 65,947    | 2,572                             |
| <b>Se<br/>(ug/g)</b> | 13,7                             | 0,468     | 0,064                             | 0,692     | 0,095                             | 1,037     | 0,142                             |
| <b>Si<br/>(ug/g)</b> | 4,6                              | 634,683   | 29,195                            | 909,560   | 41,840                            | 1194,552  | 54,949                            |
| <b>Sn<br/>(ug/g)</b> | 4,5                              | 3,174     | 0,143                             | 1,780     | 0,080                             | 1,568     | 0,071                             |
| <b>Ti<br/>(ug/g)</b> | 5,4                              | 11,263    | 0,608                             | 14,443    | 0,780                             | 138,315   | 7,469                             |
| <b>V<br/>(ug/g)</b>  | 10,1                             | 1,916     | 0,194                             | 2,739     | 0,277                             | 21,550    | 2,177                             |
| <b>Zn<br/>(ug/g)</b> | 7,9                              | 59,418    | 4,694                             | 42,460    | 3,354                             | 41,175    | 3,253                             |

**Ek 8-Tablo 6.8:** Voltaj uygulaması yapılmayan Kanola (*Brassica napus*) bitki kısımlarına ait element konsantrasyon değerleri

|                      | <b>BELİRSİZLİK<br/>ORANI (%)</b> | <b>7A</b> | <b>7A-<br/>BELİRSİZLİK<br/>±</b> | <b>7B</b> | <b>7B -<br/>BELİRSİZLİK<br/>±</b> | <b>7C</b> | <b>7C -<br/>BELİRSİZLİK<br/>±</b> |
|----------------------|----------------------------------|-----------|----------------------------------|-----------|-----------------------------------|-----------|-----------------------------------|
| <b>Ag<br/>(ug/g)</b> | 21,4                             | 0,036     | 0,008                            | 0,031     | 0,007                             | 0,054     | 0,012                             |
| <b>Al<br/>(ug/g)</b> | 7,5                              | 1052,001  | 78,900                           | 357,148   | 26,786                            | 6985,464  | 523,910                           |
| <b>As<br/>(ug/g)</b> | 13,5                             | 0,852     | 0,115                            | 0,750     | 0,101                             | 2,220     | 0,300                             |
| <b>B<br/>(ug/g)</b>  | 7,2                              | 85,983    | 6,191                            | 50,415    | 3,630                             | 67,270    | 4,843                             |
| <b>Ba<br/>(ug/g)</b> | 8,3                              | 32,533    | 2,700                            | 30,929    | 2,567                             | 75,750    | 6,287                             |
| <b>Be<br/>(ug/g)</b> |                                  | 0,042     |                                  | 0,019     |                                   | 0,260     |                                   |
| <b>Cd<br/>(ug/g)</b> | 9,6                              | 0,395     | 0,038                            | 0,250     | 0,024                             | 0,495     | 0,048                             |
| <b>Co<br/>(ug/g)</b> | 10,2                             | 0,742     | 0,076                            | 0,297     | 0,030                             | 2,914     | 0,297                             |
| <b>Cr<br/>(ug/g)</b> | 13,1                             | 4,935     | 0,646                            | 2,071     | 0,271                             | 23,290    | 3,051                             |
| <b>Cu<br/>(ug/g)</b> | 5,9                              | 9,642     | 0,569                            | 5,006     | 0,295                             | 24,951    | 1,472                             |
| <b>Fe<br/>(ug/g)</b> | 7,4                              | 822,769   | 60,885                           | 285,057   | 21,094                            | 4873,379  | 360,630                           |
| <b>Li<br/>(ug/g)</b> | 14,8                             | 1,122     | 0,166                            | 0,430     | 0,064                             | 4,710     | 0,697                             |
| <b>Mn<br/>(ug/g)</b> | 10,5                             | 117,867   | 12,376                           | 36,368    | 3,819                             | 275,509   | 28,928                            |
| <b>Mo<br/>(ug/g)</b> | 7,6                              | 2,944     | 0,224                            | 2,286     | 0,174                             | 2,430     | 0,185                             |
| <b>Na<br/>(ug/g)</b> | 12,4                             | 16252,748 | 2015,341                         | 28877,438 | 3580,802                          | 8014,966  | 993,856                           |
| <b>Ni<br/>(ug/g)</b> | 14,7                             | 3,578     | 0,526                            | 2,382     | 0,350                             | 13,240    | 1,946                             |
| <b>Pb<br/>(ug/g)</b> | 13,2                             | 1,088     | 0,144                            | 0,455     | 0,060                             | 4,195     | 0,554                             |
| <b>Sb<br/>(ug/g)</b> | 3,9                              | 2,779     | 0,108                            | 1,281     | 0,050                             | 12,541    | 0,489                             |
| <b>Se<br/>(ug/g)</b> | 13,7                             | 0,204     | 0,028                            | 0,177     | 0,024                             | 0,220     | 0,030                             |
| <b>Si<br/>(ug/g)</b> | 4,6                              | 1076,447  | 49,517                           | 801,688   | 36,878                            | 960,415   | 44,179                            |
| <b>Sn<br/>(ug/g)</b> | 4,5                              | 1,000     | 0,045                            | 0,478     | 0,022                             | 1,479     | 0,067                             |
| <b>Ti<br/>(ug/g)</b> | 5,4                              | 24,448    | 1,320                            | 13,166    | 0,711                             | 82,249    | 4,441                             |
| <b>V<br/>(ug/g)</b>  | 10,1                             | 3,165     | 0,320                            | 2,412     | 0,244                             | 13,482    | 1,362                             |
| <b>Zn<br/>(ug/g)</b> | 7,9                              | 34,030    | 2,688                            | 35,837    | 2,831                             | 77,301    | 6,107                             |

**Ek 9-Tablo 6.9:** Blank, deiyonize su ve nehir sularına ait element konsantrasyon değerleri

|          | BLK - 1 | BLK - 2 | DI SU   | NHR 1      | NHR 2      | N - 1       | N - 2       |
|----------|---------|---------|---------|------------|------------|-------------|-------------|
| Ag (ppb) | 0,361   | 0,301   | 0,005   | 0,071      | 0,019      | 0,056       | 0,061       |
| Al (ppb) | 7,807   | 35,611  | -5,167  | 2932,745   | 636,496    | 3106,435    | 5159,215    |
| As (ppb) | 2,841   | 2,320   | 0,016   | 13,357     | 12,063     | 12,374      | 12,847      |
| B (ppb)  | 2,088   | 2,120   | -0,274  | 750,218    | 769,389    | 772,859     | 776,166     |
| Ba (ppb) | 0,169   | 0,331   | -0,023  | 133,668    | 98,139     | 137,445     | 169,145     |
| Be (ppb) | 0,031   | 0,015   | 0,003   | 0,234      | 0,076      | 0,250       | 0,297       |
| Cd (ppb) | 0,039   | 0,065   | 0,000   | 0,104      | 0,097      | 0,130       | 0,165       |
| Co (ppb) | 0,046   | 0,062   | 0,004   | 1,782      | 1,470      | 2,135       | 2,698       |
| Cr (ppb) | 1,280   | 1,946   | 0,012   | 33,973     | 24,092     | 34,852      | 61,107      |
| Cu (ppb) | 7,766   | 1,006   | 0,103   | 42,721     | 54,200     | 42,806      | 54,156      |
| Fe (ppb) | 39,977  | 160,571 | 1,117   | 239,241    | 244,860    | 226,100     | 1709,164    |
| Li (ppb) | 0,161   | 0,112   | 0,014   | 26,471     | 26,608     | 26,827      | 28,933      |
| Mn (ppb) | 1,023   | 0,744   | 0,071   | 383,347    | 130,690    | 403,601     | 364,243     |
| Mo (ppb) | 2,852   | 1,476   | 0,059   | 2,759      | 2,748      | 2,311       | 2,248       |
| Na (ppb) | 160,214 | 124,783 | 160,399 | 947236,500 | 943822,034 | 1123940,558 | 1045666,966 |
| Ni (ppb) | 2,948   | 3,050   | 0,071   | 26,713     | 18,617     | 30,174      | 34,472      |
| Pb (ppb) | 1,266   | 0,790   | -0,012  | 2,332      | 1,328      | 2,860       | 5,654       |
| Sb (ppb) | 0,802   | 0,591   | 0,002   | 31,120     | 30,357     | 29,529      | 26,959      |
| Se (ppb) | 0,036   | -0,247  | 0,047   | 2,296      | 1,604      | 0,505       | 1,814       |
| Si (ppb) | 184,630 | 349,401 | 9,929   | 14611,595  | 11030,383  | 15877,127   | 16937,286   |
| Sn (ppb) | 5,805   | 2,307   | -0,016  | 3,391      | 2,842      | 1,850       | 7,710       |
| Ti (ppb) | 1,177   | 3,847   | -0,007  | 6,309      | 5,181      | 5,405       | 25,606      |
| V (ppb)  | 11,827  | 11,121  | 0,035   | 15,117     | 14,089     | 13,733      | 20,546      |
| Zn (ppb) | 10,498  | 4,653   | 3,307   | 136,583    | 65,386     | 139,299     | 135,914     |

**Ek 10-Tablo 6.10:** Sabit kutuplu voltaj uygulanan saksıların voltmetre ölçümlerine ait değerler

| SABİT KUTUPLU VOLTAJ UYGULANAN SAKSILARIN VOLTMETRE ÖLÇÜMLERİ      |            |       |       |            |       |       |            |       |       |            |       |       |            |       |       |            |       |       |
|--------------------------------------------------------------------|------------|-------|-------|------------|-------|-------|------------|-------|-------|------------|-------|-------|------------|-------|-------|------------|-------|-------|
|                                                                    | 22.11.2020 |       |       | 23.11.2020 |       |       | 24.11.2020 |       |       | 25.11.2020 |       |       | 26.11.2020 |       |       | 27.11.2020 |       |       |
|                                                                    | 7:00       | 8:00  | 9:00  | 10:00      | 11:00 | 12:00 | 13:00      | 14:00 | 15:00 | 16:00      | 17:00 | 18:00 | 19:00      | 20:00 | 21:00 | 22:00      | 23:00 | 0:00  |
| <b>3 no'lu Aspir Bitkisi<br/>- Sabit Kutuplu<br/>Voltaj</b>        |            |       |       |            |       |       |            |       |       |            |       |       |            |       |       |            |       |       |
| 1 - Sağ ve sol elektrodlar                                         | 1,18       | 19,70 | 19,76 | 19,80      | 17,00 | 1,51  | 1,27       | 1,04  | 1,09  | 13,70      | 13,00 | 18,30 | 5,53       | 1,62  | 1,32  | 1,27       | 1,02  | 19,08 |
| 2- Negatif ve sol orta elektrodlar                                 | 0,68       | 4,40  | 3,83  | 3,52       | 2,15  | 0,78  | 0,78       | 0,74  | 0,70  | 4,90       | 3,26  | 2,00  | 1,83       | 0,78  | 0,70  | 0,57       | 0,63  | 6,27  |
| 3- Negatif ve sağ orta elektrodlar                                 | 0,69       | 9,45  | 7,81  | 7,45       | 5,60  | 0,79  | 0,69       | 0,66  | 0,63  | 9,52       | 6,60  | 6,00  | 3,04       | 0,80  | 0,68  | 0,55       | 0,56  | 12,22 |
| <b>4 no'lu Soya<br/>Fasulyesi Bitkisi<br/>Sabit Kutuplu Voltaj</b> |            |       |       |            |       |       |            |       |       |            |       |       |            |       |       |            |       |       |
| 1 - Sağ ve sol elektrodlar                                         | 1,18       | 19,59 | 19,63 | 19,78      | 19,57 | 1,51  | 1,26       | 1,13  | 0,89  | 19,00      | 18,48 | 18,60 | 19,54      | 2,00  | 1,25  | 1,14       | 1,04  | 18,55 |
| 2- Negatif ve sol orta elektrodlar                                 | 0,66       | 4,20  | 4,46  | 3,10       | 3,07  | 0,45  | 0,45       | 0,45  | 0,45  | 3,26       | 3,80  | 2,30  | 4,46       | 0,89  | 0,22  | 0,24       | 0,29  | 4,35  |
| 3- Negatif ve sağ orta elektrodlar                                 | 0,36       | 13,14 | 13,70 | 9,77       | 9,36  | 0,75  | 0,69       | 0,68  | 0,67  | 13,38      | 12,20 | 7,00  | 15,04      | 1,62  | 0,58  | 0,53       | 0,52  | 15,70 |

**Ek 11-Tablo 6.11:** Değişken kutuplu voltaj uygulanan saksıların voltmetre ölçümlerine ait değerler

|                                                                           | DEĞİŞKEN KUTUPLU VOLTAJ UYGULANAN SAKSILARIN VOLTMETRE ÖLÇÜMLERİ |       |       |            |       |       |            |        |       |            |       |       |            |       |        |            |       |       |
|---------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|-------|-------|------------|-------|-------|------------|--------|-------|------------|-------|-------|------------|-------|--------|------------|-------|-------|
|                                                                           | 22.11.2020                                                       |       |       | 23.11.2020 |       |       | 24.11.2020 |        |       | 25.11.2020 |       |       | 26.11.2020 |       |        | 27.11.2020 |       |       |
|                                                                           | 7:00                                                             | 8:00  | 9:00  | 10:00      | 11:00 | 12:00 | 13:00      | 14:00  | 15:00 | 16:00      | 17:00 | 18:00 | 19:00      | 20:00 | 21:00  | 22:00      | 23:00 | 0:00  |
| <b>5 no'lu Aspir Bitkisi<br/>Sabit Kutuplu Voltaj</b>                     |                                                                  |       |       |            |       |       |            |        |       |            |       |       |            |       |        |            |       |       |
| 1 - Sağ ve sol elektrodlar                                                | 1,40                                                             | 19,70 | 19,65 | 1,59       | 0,86  | 0,76  | -19,39     | -19,38 | -0,92 | 19,20      | 18,97 | 1,30  | 0,93       | 0,82  | -19,25 | -18,34     | -1,05 | 18,80 |
| 2- Negatif ve sol orta elektrodlar                                        | 0,69                                                             | 7,38  | 8,40  | 0,80       | 0,40  | 0,36  | -7,39      | -6,66  | -0,57 | 7,08       | 7,29  | 0,60  | 0,42       | 0,36  | -6,76  | -5,69      | -0,53 | 6,21  |
| 3- Negatif ve sağ orta elektrodlar                                        | 0,67                                                             | 12,30 | 13,25 | 0,92       | 0,51  | 0,46  | -13,05     | -11,50 | -0,45 | 12,57      | 12,74 | 0,70  | 0,46       | 0,40  | -13,08 | -18,34     | -0,49 | 11,41 |
| <b>6 no'lu Soya<br/>Fasulyesi Bitkisi<br/>Değişken Kutuplu<br/>Voltaj</b> |                                                                  |       |       |            |       |       |            |        |       |            |       |       |            |       |        |            |       |       |
| 1 - Sağ ve sol elektrodlar                                                | 1,32                                                             | 19,78 | 19,74 | 1,54       | 0,86  | 0,76  | -19,66     | -19,68 | -0,96 | 19,54      | 19,84 | 1,20  | 0,92       | 0,81  | -19,64 | -19,52     | -1,07 | 19,56 |
| 2- Negatif ve sol orta elektrodlar                                        | 0,64                                                             | 5,19  | 6,78  | 0,77       | 0,39  | 0,36  | -5,30      | -4,54  | -0,51 | 4,26       | 5,57  | 0,60  | 0,38       | 0,35  | -6,02  | -4,59      | -0,59 | 4,86  |
| 3- Negatif ve sağ orta elektrodlar                                        | 0,70                                                             | 10,84 | 12,66 | 0,82       | 0,39  | 0,34  | -11,38     | -9,27  | -0,55 | 6,60       | 10,84 | 0,70  | 0,38       | 0,34  | -12,34 | -10,80     | 0,74  | 10,68 |