T.C.
ÇANAKKALE ONSEKİZ MART ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

TOPRAK BİLİMİ VE BİTKİ BESLEME ANABİLİM DALI

# SERPANTİN TOPRAKLARINDA AĞIR METALLERİN SÜRDÜRÜLEBİLİR KULLANIM AÇISINDAN JEOKİMYASAL ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ

DOKTORA TEZİ

ERDEM TEMEL

Tez Danışmanı
PROF. DR. ALİ SUNGUR

ÇANAKKALE – 2024

T.C.
ÇANAKKALE ONSEKİZ MART ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

TOPRAK BİLİMİ VE BİTKİ BESLEME ANABİLİM DALI

# SERPANTİN TOPRAKLARINDA AĞIR METALLERİN SÜRDÜRÜLEBİLİR KULLANIM AÇISINDAN JEOKİMYASAL ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ

DOKTORA TEZİ

ERDEM TEMEL

Tez Danışmanı
PROF. DR. ALİ SUNGUR

Bu çalışma, Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından desteklenmiştir.
Proje No: 3721

ÇANAKKALE – 2024

**T.C.**

**ÇANAKKALE ONSEKİZ MART ÜNİVERSİTESİ**

**LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

Erdem TEMEL tarafından Prof. Dr. Ali SUNGUR yönetiminde hazırlanan ve **28/08/2024** tarihinde aşağıdaki jüri karşısında sunulan "**Serpantin Topraklarında Ağır Metallerin Sürdürülebilir Kullanım Açısından Jeokimyasal Özelliklerinin Belirlenmesi**" başlıklı çalışma, Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü **Toprak Bilimi ve Bitki Besleme Anabilim Dalı**'nda **DOKTORA TEZİ** olarak oy birliği ile kabul edilmiştir.

| **Jüri Üyeleri** | **İmza** |
|---|---|
| Prof. Dr. Ali SUNGUR (Danışman) | …… |
| Prof. Dr. Hasan ÖZCAN | …… |
| Prof. Dr. Duygu BOYRAZ ERDEM | ……. |
| Doç. Dr. Orhan YÜKSEL | ……. |
| Doç. Dr. Timuçin EVEREST | ……. |

Tez No : 10664302

Tez Savunma Tarihi : 28/08/2024

……

Doç. Dr. Melis ULU DOĞRU

Enstitü Müdürü

../../2024

## ETİK BEYAN

Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Tez Yazım Kuralları'na uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında; tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi, tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu, tez çalışmasında yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi, kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı, bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu, bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi taahhüt ve beyan ederim.

Erdem TEMEL

28/08/2024

## TEŞEKKÜR

Bu tezin gerçekleştirilmesinde, çalışmam boyunca benden bir an olsun yardımlarını esirgemeyen saygı değer danışman hocam sayın Prof. Dr. Ali SUNGUR'a sonsuz saygı ve içten teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmanın her aşamasında yardım ve desteğini esirgemeyen ve Tez İzleme Komitesinde bulunan hocalarım Prof. Dr. Hasan ÖZCAN ve Doç. Dr. Timuçin EVEREST'e sağladıkları katkılar için teşekkür ederim.

Tez çalışmam süresince tüm zorlukları benimle göğüsleyen, hayatımın her evresinde bana destek olan değerli aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Erdem TEMEL

Çanakkale, Ağustos 2024

# ÖZET

## SERPANTİN TOPRAKLARINDA AĞIR METALLERİN SÜRDÜRÜLEBİLİR KULLANIM AÇISINDAN JEOKİMYASAL ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ

Erdem TEMEL
Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Toprak Bilimi ve Bitki Besleme Anabilim Dalı Doktora Tezi
Danışman: Prof. Dr. Ali SUNGUR
28/08/2024, 98

Bu tez çalışması kapsamında Çanakkale ili sınırları içindeki serpantin anamateryali üzerinde oluşmuş doğal alan (tarım yapılmayan) ve tarım topraklarından toplam otuz bir yüzey örneği alınmıştır. Alınan toprak örneklerinin fiziko-kimyasal özellikleri, toplam ağır metal konsantrasyonları ve ardışık ekstraksiyon yöntemi kullanılarak ağır metallerin jeokimyasal fraksiyonları belirlenmiştir. Ağır metallerin ekosistem üzerindeki etkilerini ortaya koymak için çevresel risk indeksleri (RAC, Cf, Er ve RI) hesaplanmıştır. Tarım toprakları için yaygın değerler göz önünde bulundurulduğunda toprakların toplam ağır metal konsantrasyonları ortalamaları Co, Cr, Cu, Ni ve Zn elementleri konsantrasyonlarının uluslararası standart değerlere göre yüksek, Cd ve Pb elementleri konsantrasyonlarının ise bu standart değerlere çok yakın olduğu görülmüştür. Gerçekleştirilen faktör analizi ve hiyerarşik kümeleme analizi de benzer sonuçlar vererek Cd, Co, Cr ve Ni elementlerinin litolojik; Pb ve Zn elementlerinin antropojenik ve litolojik; Cu elementinin ise antropojenik etkilerin daha yoğun olduğu hem litolojik hem de antropojenik etkilerle topraklarda zenginleştiğine işaret etmiştir. Ağır metallerin fraksiyonları incelendiğinde Co, Cr ve Ni'in tüm örneklerde $F_4$ (kalıntı) fraksiyonunda baskın bulunduğu tespit edilmiştir. Risk değerlendirme kodu (RAC) değerleri incelendiğinde, Cd ve Pb orta düzey risk sınıfında bulunmuştur. Ağır metallerin ekolojik risk indekslerine (Er) bakıldığında ise Cd elementi orta risk sınıfına girmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Serpantin, Ağır Metal, Ardışık Ekstraksiyon, Risk Değerlendirmesi

## ABSTRACT

### DETERMINATION OF GEOCHEMICAL CHARACTERISTICS OF HEAVY METALS IN SERPENTINE SOILS FOR SUSTAINABLE USE

Erdem TEMEL

Çanakkale Onsekiz Mart University

School of Graduate Studies

Doctoral Dissertation in Soil Science and Plant Nutrition

Advisor: Prof. Dr. Ali SUNGUR

28/08/2024, 98

In this thesis study, a total of thirty-one surface samples were taken from natural (non-agricultural) and agricultural soils formed on serpentine parent material within the borders of Çanakkale province. The physico-chemical properties of the samples and the total heavy metal concentrations were determined, and the geochemical fractions of heavy metals were analyzed using the sequential extraction method. Environmental risk indices (RAC, Cf, Er and RI) were calculated to reveal the effects of heavy metals on the ecosystem. Considering the common values for agricultural soils, it was observed that the average concentrations of Co, Cr, Cu, Ni and Zn elements were higher than the international standard values, while the concentrations of Cd and Pb elements were very close to these standard values. The Factor analysis and hierarchical clustering analysis provided similar results, indicating that Cd, Co, Cr, and Ni are lithological in origin, while Pb and Zn are both anthropogenic and lithological. Additionally, Cu was found to be enriched in soils affected by both lithological and anthropogenic factors, with a higher influence from anthropogenic effects. In the fractions of heavy metals, Co, Cr and Ni were found to be dominant in the $F_4$ (residue) fraction in all samples. According to the risk assessment code (RAC) values, Cd and Pb were found in the medium risk class. According to the ecological risk indices (Er) of heavy metals, Cd was classified as medium risk.



**Keywords:** Serpentine, Heavy Metal, Sequential Extraction, Risk Assessment

# İÇİNDEKİLER

**Sayfa No**


JÜRİ ONAY SAYFASI……... i
ETİK BEYAN…… ii
TEŞEKKÜR…….. iii
ÖZET ……..…….. iv
ABSTRACT …….. v
İÇİNDEKİLER ……..…… vi
SİMGELER ve KISALTMALAR…….....……. viii
TABLOLAR DİZİNİ…….…. ix
ŞEKİLLER DİZİNİ……..……...…….….. xi

BİRİNCİ BÖLÜM
GİRİŞ 1

İKİNCİ BÖLÜM
ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR 4

ÜÇÜNCÜ BÖLÜM
MATERYAL VE YÖNTEM 11

3.1. Çalışma Alanı……... 11
3.2 Örneklerin Alınması ve Analize Hazırlanması…….. 12
3.3 Toprak Örneklerine Ait Fiziko-Kimyasal Analizler…….. 19
3.3.1. Toprak tekstür tayini …….. 19
3.3.2. Toprak reaksiyonu (pH) ve Elektriksel iletkenlik (EC) tayini ……. 20
3.3.3. Organik madde tayini…….. 20
3.3.4. Kireç ($CaCO_3$) tayini....…….. 21
3.4. Kayaç, Toprak ve Bitki Örneklerinin Toplam Ağır Metal Analizleri…… 22
3.5. Toprakta Ağır Metal Fraksiyonlarının Belirlenmesi ……. 23
3.6. Ağır Metal Ekstraksiyonları İçin Doğruluk Testi (Validasyon)……. 24

3.7. Analizlerde Kullanılan Cihazlar…… 25
3.8. Ağır Metallerin Çevresel Risk Değerlendirmesi…… 26

DÖRDÜNCÜ BÖLÜM
ARAŞTIRMA BULGULARI 29

4.1. Toprak örneklerinin fiziko-kimyasal özellikleri…….…….....…….…..... 29
4.2. Ağır Metal Analizlerinin Validasyonu……... 31
4.3. Kayaç, Toprak ve Bitki Örneklerinin Toplam Ağır Metal İçerikleri……. 33
4.3. Ağır Metal Kaynakları…… 44
4.4. Toprak Örneklerinde Ağır Metallerin Jeokimyasal Fraksiyonları……. 46
4.4.1. Kadmiyum (Cd)…… 48
4.4.2. Kobaltı (Co)……... 52
4.4.3. Krom (Cr)…….. 55
4.4.4. Bakır (Cu)…….. 59
4.4.5. Nikel (Ni)……... 64
4.4.6. Kurşun (Pb)…… 68
4.4.7. Çinko (Zn)……. 72
4.5. Toprak Özellikleri ile Ağır Metallerin Jeokimyasal Fraksiyonları Arasındaki İlişki……... 75
4.6. Ağır Metallerin Çevresel Risk Değerlendirmesi…… 80

BEŞİNCİ BÖLÜM
SONUÇ VE ÖNERİLER 84

KAYNAKÇA ...……. 87

## SİMGELER VE KISALTMALAR

| | |
|---|---|
| % | Yüzde oran |
| °C | Santigrat derece |
| BCR | The European Community Bureau of Reference (Avrupa Birliği Referans Komisyonu) |
| Cd | Kadmiyum |
| Co | Kobalt |
| Cr | Krom |
| Cu | Elektriksel iletkenlik |
| $F_1$ | Değişebilir ve asitte çözünür (karbonatlara bağlı) fraksiyon |
| $F_2$ | İndirgenebilir fraksiyon (Fe/Mn oksitlere bağlı) |
| $F_3$ | Oksitlenebilir fraksiyon (Organik madde ve sülfitlere bağlı) |
| $F_4$ | Kalıntı fraksiyon (Mineral yapıya bağlı) |
| FAAS | Alevli Atomik Absorpsiyon Spektrometresi |
| Fe | Demir |
| g | Gram |
| kg | Kilogram |
| $m^3$ | Metreküp |
| Mg | Magnezyum |
| mg | Miligram |
| ml | Mililitre |
| Ni | Nikel |
| OM | Organik madde |
| ppm | Milyonda bir |
| Pb | Kurşun |
| pH | Toprak reaksiyonu |
| SRM | Strandart Referans Madde |
| Zn | Çinko |
| µg | Mikrogram |

## TABLOLAR DİZİNİ


| Tablo No | Tablo Adı | Sayfa No |
|---|---|---|
| **Tablo 1** | Toprak örneklerine ait bilgiler | 13 |
| **Tablo 2** | BCR ardışık ekstraksiyon yöntemi | 24 |
| **Tablo 3** | Analizlerde kullanılan alet ve ekipmanlar | 25 |
| **Tablo 4** | Doğal alanlardan alınan toprak örneklerine ait fiziko-kimyasal özellikler | 29 |
| **Tablo 5** | Tarım arazilerinden alınan topraklara ait fiziko-kimyasal özellikler | 30 |
| **Tablo 6** | ERM - CC141 ve SRM - 1573a sertifikalı referans maddelerin sertifika değerleri ve çalışmada bulunan değerler (µg/g) ve %geri kazanımlar, n=3 | 32 |
| **Tablo 7** | BCR - 701 sertifikalı referans maddelesinin sertifika değerleri ve çalışmada bulunan değerler (µg/g) ve %geri kazanımlar, n=3 | 33 |
| **Tablo 8** | Kayaç örneklerinin toplam ağır metal konsantrasyonları (µg/g) | 34 |
| **Tablo 9** | Doğal alanlardan alınan toprakların toplam ağır metal konsantrasyonları (µg/g) | 35 |
| **Tablo 10** | Tarım topraklarına ait toplam ağır metal konsantrasyonları (µg/g) | 37 |
| **Tablo 11** | Bitki Yapraklarında Eser Elementlerin Genelleştirilmiş Konsantrasyonları (µg/g) | 40 |
| **Tablo 12** | Bitki örneklerine ait toplam ağır metal konsantrasyonları (µg/g) | 41 |
| **Tablo 13** | Bitki çeşidine göre toplam ağır metal konsantrasyonları (µg/g) | 42 |
| **Tablo 14** | Toplam ağır metallere ait faktör analizi sonuçları | 44 |
| **Tablo 15** | Ağır metallerin fraksiyonlardaki sıralamaları | 46 |
| **Tablo 16** | Doğal alan topraklarının Cd elementine ait jeokimyasal fraksiyonlar konsantrasyonları (µg/g) | 48 |
| **Tablo 17** | Tarım topraklarının Cd elementine ait jeokimyasal fraksiyonlar konsantrasyonları (µg/g) | 50 |

| | | |
|---|---|---|
| **Tablo 18** | Doğal alan topraklarının Co elementine ait jeokimyasal fraksiyonlar konsantrasyonları (µg/g) | 52 |
| **Tablo 19** | Tarım topraklarının Co elementine ait jeokimyasal fraksiyonlar konsantrasyonları (µg/g) | 54 |
| **Tablo 20** | Doğal alan topraklarının Cr elementine ait jeokimyasal fraksiyonlar konsantrasyonları (µg/g) | 56 |
| **Tablo 21** | Tarım topraklarının Cr elementine ait jeokimyasal fraksiyonlar konsantrasyonları (µg/g) | 58 |
| **Tablo 22** | Doğal alan topraklarının Cu elementine ait jeokimyasal fraksiyonlar konsantrasyonları (µg/g) | 60 |
| **Tablo 23** | Tarım topraklarının Cu elementine ait jeokimyasal fraksiyonlar konsantrasyonları (µg/g) | 62 |
| **Tablo 24** | Doğal alan topraklarının Ni elementine ait jeokimyasal fraksiyonlar konsantrasyonları (µg/g) | 64 |
| **Tablo 25** | Tarım topraklarının Ni elementine ait jeokimyasal fraksiyonlar konsantrasyonları (µg/g) | 66 |
| **Tablo 26** | Doğal alan topraklarının Pb elementine ait jeokimyasal fraksiyonlar konsantrasyonları (µg/g) | 68 |
| **Tablo 27** | Tarım topraklarının Pb elementine ait jeokimyasal fraksiyonlar konsantrasyonları (µg/g) | 70 |
| **Tablo 28** | Doğal alan topraklarının Zn elementine ait jeokimyasal fraksiyonlar konsantrasyonları (µg/g) | 72 |
| **Tablo 29** | Tarım topraklarının Zn elementine ait jeokimyasal fraksiyonlar konsantrasyonları (µg/g) | 74 |
| **Tablo 30** | Doğal alan topraklarının fiziko-kimyasal özellikleri ile ağır metallerin fraksiyonlarının korelasyonu | 76 |
| **Tablo 31** | Tarım topraklarının fiziko-kimyasal özellikleri ile ağır metallerin fraksiyonlarının korelasyonu | 79 |
| **Tablo 32** | Ağır metallere ait RAC, Cf ve Er değerleri ve sınıfları | 81 |
| **Tablo 33** | Bitki örneklerine ait BAF değerleri ve sınıfları | 82 |

# ŞEKİLLER DİZİNİ


| Şekil No | Şekil Adı | Sayfa No |
|---|---|---|
| **Şekil 1** | Çalışma alanı | 12 |
| **Şekil 2** | Çalışma alanı jeolojisi ve örnekleme noktaları | 14 |
| **Şekil 3** | Örnekleme noktalarına (T1, T2, T3, T4, T5, T6, DA2 ve DA3) ait Google Earh görüntüleri | 15 |
| **Şekil 4** | Örnekleme noktalarına (T7, T9, T10 ve DA3) ait Google Earth görüntüleri | 15 |
| **Şekil 5** | Örnekleme noktalarına (T11, T12, T21 ve DA3) ait Google Earth görüntüleri. | 16 |
| **Şekil 6** | Örnekleme noktalarına (T13, T14, T22 ve DA6) ait Google Earth görüntüleri | 16 |
| **Şekil 7** | Örnekleme noktalarına (T15,T16, T17 ve DA7) ait Google Earth görüntüleri | 16 |
| **Şekil 8** | Örnekleme noktasına (T18) ait Google Earth görüntüleri | 17 |
| **Şekil 9** | Örnekleme noktasına (T19) ait Google Earth görüntüleri | 17 |
| **Şekil 10** | Örnekleme noktasına (T20) ait Google Earth görüntüleri | 18 |
| **Şekil 11** | Örnekleme noktalarına (T23 ve T24) ait Google Earth görüntüleri | 18 |
| **Şekil 12** | Toplam ağır metallere ait hiyerarşik kümeleme dendogramı | 45 |
| **Şekil 13** | Ağır metallerin jeokimyasal fraksiyonlar ve oransal dağılımları (µg/g) | 47 |
| **Şekil 14** | Doğal alan topraklarının Cd elementine ait ağır metal fraksiyonları ve yüzde dağılımları | 49 |
| **Şekil 15** | Tarım topraklarının Cd elementine ait ağır metal fraksiyonları ve yüzde dağılımları | 51 |
| **Şekil 16** | Doğal alan topraklarının Co elementine ait ağır metal fraksiyonları ve yüzde dağılımları | 53 |
| **Şekil 17** | Tarım topraklarının Co elementine ait ağır metal fraksiyonları ve yüzde dağılımları | 55 |

| | | |
|---|---|---|
| **Şekil 18** | Doğal alan topraklarının Cr elementine ait ağır metal fraksiyonları ve yüzde dağılımları | 57 |
| **Şekil 19** | Tarım topraklarının Cr elementine ait ağır metal fraksiyonları ve yüzde dağılımları | 59 |
| **Şekil 20** | Doğal alan topraklarının Cu elementine ait ağır metal fraksiyonları ve yüzde dağılımları | 61 |
| **Şekil 21** | Tarım topraklarının Cu elementine ait ağır metal fraksiyonları ve yüzde dağılımları | 63 |
| **Şekil 22** | Doğal alan topraklarının Ni elementine ait ağır metal fraksiyonları ve yüzde dağılımları | 65 |
| **Şekil 23** | Tarım topraklarının Ni elementine ait ağır metal fraksiyonları ve yüzde dağılımları. | 67 |
| **Şekil 24** | Doğal alan topraklarının Pb elementine ait ağır metal fraksiyonları ve yüzde dağılımları | 69 |
| **Şekil 25** | Tarım topraklarının Pb elementine ait ağır metal fraksiyonları ve yüzde dağılımları | 71 |
| **Şekil 26** | Doğal alanlardan alınan toprakların Zn elementine ait ağır metal fraksiyonları ve yüzde dağılımları | 73 |
| **Şekil 27** | Tarım topraklarının Zn elementine ait ağır metal fraksiyonları ve yüzde dağılımları | 75 |

# BİRİNCİ BÖLÜM
# GİRİŞ

Topraklar; üzerinde ve içinde biyosferi barındıran, atmosfer, litosfer ve hidrosfer bileşenlerini içeren dinamik ve doğal varlıktır. Bu doğal varlıklar bitkilerin, organizmaların, suyun ve havanın etkisi altında kayaçların çeşitli ayrışma ürünleri ve organik maddelerin karışımından oluşan karmaşık doğal kütlelerdir. Bitki büyüme ortamına ek olarak, topraklar su, karbon, azot ve diğer elementlerin biyojeokimyasal döngüsünde etkin bir rol oynar. Bu şekilde okyanuslara, deniz ve karasal biyosfere yardımcı olurlar, atmosfer ve hidrosferdeki kimyasal bileşimi etkilerler.

Toprak oluşumu, kayaların ayrışması başlayan bir süreçtir. Toprağın üzerinde oluştuğu ana materyalin veya kayacın bileşimi, toprağın mineralojik, fiziksel ve kimyasal özellikleri ile elementel bileşimini etkilemektedir (Sungur vd., 2023; Eren vd., 2021). Ultramafik kayaçların üzerinde oluşan topraklar, kimyasal ve mineral bileşimleri bakımından ana kayanın bileşiminden oldukça etkilenmektedirler. Ultramafik kayaçlar üzerinde oluşan topraklar genellikle Co, Cr, Ni ile zenginleşmiştir (Pavlova ve Karadjova, 2013; Shah vd., 2014). Ofiyolit kayaçların metamorfize olması ile oluşan serpantinler üzerinde oluşan topraklar biyolojik sistemlere olumsuz etki yaratacak kadar yüksek miktarlarda ağır metal içerdiklerinden dolayı doğal metal kirliliğinin nedenlerinden olabilmektedir. Bu topraklardan çevredeki alanlara ve yeraltı sularına salınan yüksek metal konsantrasyonlarının ekolojik, tarımsal ve insan sağlığıyla ilişkili olumsuz sonuçlar meydana getirebileceği bildirilmiştir (Vithanage vd., 2014). Yapılan birçok çalışma bitkilerin ağır metalleri bünyelerine alabildikleri ve/veya bünyelerinde biriktirebildikleri yönündedir. Ekilebilir topraklarda ağır metallerin birikmesi ile topraktan bitkilere, bitkilerden hayvanlara ve insanlara potansiyel geçişleri nedeniyle önemlidir (Karanlık vd., 2011). Bu nedenle üzerinde tarımsal üretim yapılan serpantin üzerinde oluşmuş toprakların metal konsantrasyonlarının detaylı bir şekilde incelenmesi son derece önemlidir.

Ağır metaller, ayrışma, erozyon, yıkanma ve diğer jeolojik çevresel süreçler ile ekosisteme salınabilen ve ciddi tehlikelere neden olabilecek kalıcı kirleticilerdir (Tashakor vd., 2014). Ağır metaller toprak sistemine doğal ortamlarda kayaçların ayrışması sonucu ulaşmaktadır. Ağır metallerin toprakta birikmesi, toprak verimliliği ve ekosistemi üzerinde olumsuz etkilere neden olabilmektedir. Özellikle kimyasal ayrışma, ana materyallerin altere

olmasına ve elementlerin minerallerden toprak çözeltisine geçmesine neden olmaktadır. Ağır metaller toprak tarafından adsorpsiyon ve çökeltme mekanizmaları ile hareketsiz hale getirilerek tutulabildiği gibi farklı biyolojik ve kimyasal mekanizmalarla toprak çözeltisinde hareketli hale geçebilirler. Bu mobil hale gelen ağır metaller içme suyu kaynaklarının veya göl, deniz gibi sulu ortamların kirlenmesine neden olabilmektedir (Pagnanelli, vd., 2004; Kelepertzis, 2014; Botsou vd., 2016; Sungur, 2016).

Toprakların ağır metal seviyelerinin izlenmesi ve kaynaklarının bilinmesi, çevre ve insan sağlığı üzerindeki etkilerinden dolayı önemlidir (Soylak ve Türkoğlu, 1999; Soylak vd., 2001; Oze vd., 2008). Ağır metaller toprağa ulaştığında, bir dizi fiziksel, kimyasal ve biyolojik süreçler (adsorpsiyon, çözünme, kompleksleşme ve biyota-biyokütle tarafından alım) vasıtasıyla farklı jeokimyasal formlara dönüşmektedir (Kraemer ve Hering, 2004). Yani toprak anamateryaline bağlı olarak farklı fraksiyonlarda bulunan ağır metaller değişik kimyasal form ve/veya bağlanma durumlarında bulunabilirler (Sungur vd., 2014). Dolayısıyla, toprakta ağır metallerin toksisitesi ve biyoyararlılığı yalnızca ağır metallerin toplam konsantrasyonuna değil, aynı zamanda jeokimyasal formlarına da bağlıdır. Bu durumda metallerin çözünebilir veya hareketli miktarlarının farklı ekstraksiyon yöntemleriyle belirlenmesi daha fazla önem taşımaya başlamıştır. Metal hareketliliğinin, metal-toprak etkileşimine bağlı olması nedeniyle, metalleri farklı jeokimyasal formlardan seçici olarak ayırmak için ardışık ekstraksiyon prosedürleri geliştirilmiştir (Usero vd., 1998; Du Laing, 2011). Bu prosedürlerin tümü, bir toprak numunesinin artan ekstrakte etme gücü ile karakterize edilen kimyasal çözeltilerle reaksiyona sokulması prensibine dayanmaktadır. Ardışık ekstraksiyonlar ile ağır metallerin bağlanma şekillerinin tanımlanması, jeokimyasal süreçlerin anlaşılmasına ve biyo-yararlılığın belirlenmesine yardımcı olur. Birçok ardışık ekstraksiyon yöntemi kullanılmakla birlikte, elde edilen sonuçların karşılaştırılabilir olması maksadıyla Avrupa Birliği Referans Madde Komisyonu (BCR- the Eurpoean Community Bureau of Reference) tarafından bir ardışık ekstraksiyon yöntemi geliştirilmiştir (Sungur, 2016).

Serpantin üzerinde oluşan toprakların tarımsal kullanımları ve sürdürülebilirlikleri bu alanların özelliklerinin çok iyi bilinmesine bağlıdır. Bu kapsamda toprakların fiziksel ve kimyasal özellikleri ile ağır metal konsantrasyonlarının belirlenmesi ve jeokimyasal fraksiyonlama ağır metal mobilitesi ve taşınması hakkında vereceği bilgiler sürdürülebilir toprak yönetmi ve tarımsal kullanımı açısından çok önemli olacaktır. Biga yarımadasında

farklı lokasyonlarda serpantin üzerinde oluşmuş topraklar bulunmaktadır. Bu çalışma ile Çanakkale'de tarımsal amaçla kullanılan serpantin üzerinde oluşmuş toprakların sürdürülebilirlik açısından ağır metal konsantrasyonları ve bunların çevrresel risklerinin değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda toprakların toplam ağır metal konsantrasyonları belirlenmiştir. Bunun yanında ağır metallerin hareketliliği, biyoyararlanımı ve toksisitesini belirlemek amacıyla BCR ardışık esktraksiyon yöntemi kullanılmıştır. Ayrıca risk değerlendirme indeksleri ile ağır metallerin çevresel riskleri belirlenmiştir.

# İKİNCİ BÖLÜM
# ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Serpantinit terimi, ağırlıkça <%45 silika ($SiO_2$) içeren magmatik veya metamorfik kayaçları ifade etmektedir. Serpantin bakımından zengin kayaç, yılan derisine benzeyen farklı tonlarda çizgili zeytin yeşili-gri bir renge sahip olduğundan, bu isim Latince 'yılan' anlamına gelen *"serpens"* kelimesinden türemiştir (Best, 2013).

Serpantinitler, yakınsak kıta kenarları boyunca ultramafik kayaçların düşük sıcaklıkta (300-600 $^oC$) hidrotermal alterasyonu sonucu oluşan aslen metamorfik kayaçlardır (Tashakor vd., 2011; Vithanage vd., 2019). Yeraltı suları da hidratlaşmada rol oynayabilir. Bölgesel metamorfizmaya maruz kalmış alanlardaki peridotitler genellikle serpantinleşmiş olarak bulunmaktadır. Serpantinitler ile ilgili yapılan detaylı incelenmeler onların kesin olarak peridotitlerin ayrışması sonucunda meydana geldiklerini göstermektedir. Bu durum 1-Serpantinleşme olayı ultrabazik (ultramafik) masiflerin maruz kaldığı tektonik hareketler ve mekanik deformasyonların şiddetiyle doğru orantılıdır. Deformasyon ne kadar fazlaysa kayadaki serpantinleşmede o düzeyde fazla olmaktadır. 2-Peridotit masiflerinin kenar zonları iç kısımlarına nazaran hem daha fazla ezilmiş ve hem de daha fazla serpantinleşmiştir. 3-Serpantinitler yan kayaçlar üzerinde herhangi bir kontak metamorfizma meydana getirmemişlerdir. 4- Serpantinleşmiş kütlelerin (ofiyolit dizisi kayaçların) yan kayalarla olan kondakları hep tektoniktir (faylı ya da bindirmeli) (Çoğulu,1976). Serpantinler (yapısal olarak ultramafik kayalar), çakışan levha kenarları boyunca peridotit ve piroksenitlerin başkalaşımı ve batması (kıtasal bir levhanın başka bir kıtasal levha altına girmesi) ile oluşur (Coleman vd Jove, 1992; O'Hanley 1996; Oze vd., 2004; Vithanage, 2014).

Serpantin grubu üyelerinin genel formülü $(Mg,Mn,Fe,Co,Ni)_{3-x}SiO_2O_5(OH)_4$ 'dir. Serpantinitler, antigorit ($(Mg, Fe_2^+)_3Si_2O_5(OH)_4$), krizotil ($Mg_3Si_2O_5(OH)_4$) ve lizardit ($Mg_3Si_2O_5(OH)_4$) gibi bir veya daha fazla serpantin grubu mineraller içermektedir. Bu serpantin grubu mineraller dünyanın mantosundaki olivin ve piroksen gibi demir (Fe) ve magnezyum (Mg) bakımından zengin silikat minerallerinden oluşan peridotit ve piroksenit gibi ultramafik kayaçların metamorfik dönüşümü ile oluşmaktadır (Kumar ve ark 2023). Magnetit ($Fe^{2+}Fe_2^{3+}O_4$), Cr'ca zengin magnetit ($Fe^{2+}(Fe^{3+},Cr_2)_2O_4$) ve kromit ($FeCr_2O_4$)

büyük ölçüde serpantinitler ile ilişkilendirilebilir. Benzer şekilde karışık kompozisyonlu mineraller içeren talk ($Mg_3Si0_4O_{10}(OH)_2$), klorit ($(Mg,Fe)_5Al[(OH)_8AlSi_3O_{10}]$), tremolit ($[Ca_2][Mg_5][(OH)_2Si_8O_{22}]$) ve brusit ($Mg(OH)_2$) serpantinlerle ilişkilendirilmektedir (Vithanage vd., 2014).

Ayrışma ve pedojenik süreçler, fiziksel veya kimyasal özelliklerinden bağımsız olarak serpantinden ve diğer ultramafik kayaçlardan meydana gelen herhangi bir toprağı tanımlamak için kullanılan genel bir terim olan "serpantin topraklar" terimini ortaya çıkarmaktadır. (Oze, 2003; Shah, 2013; Vithanage, 2014). Serpantin toprakların geniş coğrafi oluşumu ve dağılımı nedeniyle, ayrışma süreçleri, değişen iklim koşulları ve anamateryalin doğasının yanı sıra topografya, bitki örtüsü, zaman ve tektonik aktivite gibi diğer faktörler nedeniyle bölgeden bölgeye farklılık göstermektedir (Kanellopoulos vd., 2015).

Dünya yüzeyinin %1' inden daha az bölümünü kaplayan ultramafik kayaçlar (Özdeniz vd., 2017), dünyaya geniş çapta ve düzensiz olarak dağılmış olup her kıtada bulunmaktadır (Brady vd., 2005). Jeolojik konumu itibariyle Türkiye, yığışım karmaşıklarının ve ofiyolitik kayaç topluluklarının kenet kuşakları ve kıta üzerlerinde yaygın olarak gözlemlendiği bir yerdir. Türkiye'de yer alan ofiyolitik kayaçları Kuzey Anadolu ofiyolit kuşağı, Toros ofiyolit kuşağı ve Arap kıtası önü ofiyolit kuşağı olmak üzere üç farklı coğrafik bölgeye ayrılmıştır (Alkan, 2019). Ülkemizin genel kayaç çeşitlerini göz önünde bulundurduğumuzda, bunların yaklaşık %20'sinin mafik ve ultramafik kayaçlardan oluştuğu ve bu kayaçların büyük çoğunluğunun serpantinleştiği bildirilmiştir (Kara, 2019). Türkiye'nin birçok yerinde ultramafik kayaçların ve toprakların ortaya çıktığı önemli alanlar bulunmaktadır. Dikkate değer alanlar arasında; kuzeybatının merkez kısmı (Kütahya ve Balıkesir illeri), Antalya-Marmaris (Antalya ve Muğla illeri) arasında, güney-batı Amanos Dağları (Hatay ve Adana illeri), Doğu Toroslar (Mersin'in kuzey ve kuzey doğusu), Aladağ masifi (Niğde ve Adana illeri), Adana ve Erzincan yakınlarında yüzlerce kilometre boyunca genellikle kuzey-doğu yönünde uzanan bir bantta çok sayıda alan bulunmaktadır. Diğer önemli yüzeyler arasında Ankara ve Çanakkale ilindeki daha küçük alanlar bulunmaktadır (Reeves ve Adıgüzel, 2004).

İklimden kaynaklanan farklılıklara rağmen ultramafik kayalardan oluşan toprakların kimyasal ve mineral bileşimleri ana kaya mineralojisinden güçlü bir şekilde etkilenmektedir

(Kierczak vd., 2021). Serpantin topraklarının fiziksel koşulları da birçok bitki için elverişsiz olabilmektedir. Serpantin çıkıntıları genellikle dik ve nispeten kayalıktır, bu da onları erozyona karşı özellikle savunmasız hale getirmektedir. Bu durum sığ toprakların oluşmasına neden olmaktadır. Serpantin topraklardaki silt ve kil içeriği genellikle minimum düzeydedir (Brady vd., 2005). Serpantin toprakları karakteristik özellikleri; N, P, K gibi bitki besin elementlerinin düşük konsantrasyonları, Cr, Ni ve Co başta olmak üzere biyolojik olarak toksik elementlerin yüksek konsantrasyonları, 1> Ca/ Mg oranı, yetersiz katyon değişim kapasitesi, taşlı ve derin olmayan toprak profili nedeniyle düşük su tutma kapasitesi, serpantin topraklarına özgü endemik bitkilerin bulunmasıdır (Oze vd., 2008). Ayrıca serpantin toprakları genelde seyrek bitki örtüsü nedeniyle erozyon eğilimi göstermektedir (Aziz vd., 2015).

Ağır metaller, yüksek atom ağırlığına ve sudan en az 5 kat daha fazla yoğunluğa sahip doğal olarak oluşan elementlerdir (Ismanto vd., 2023; Nnaji vd., 2023; Koller ve Saleh, 2018). Ağırlığın ve toksisitenin birbiriyle ilişkili olduğundan yola çıkıldığında, ağır metaller aynı zamanda arsenik gibi düşük düzeyde maruz kalındığında toksisiteye neden olabilen metaloidleri de içermektedir. Ağır metaller, çeşitli çevresel alanlarda eser konsantrasyonlarda bulunmaları nedeniyle eser elementler olarak da kabul edilmektedir (Tchounwou vd., 2012). Tüm topraklar aşağı yukarı periyodik tablodaki tüm ağır metal(loid)leri içerir, ancak konsantrasyonlar büyük ölçüde değişmektedir. Bu metaller, ana materyalin aşınması yoluyla, doğal olarak ve ayrıca madencilik, eritme ve diğer endüstriyel işlemler gibi çeşitli insan faaliyetlerinden ortaya çıkarlar (Chen vd., 2015). Ağır metaller ve metaloidler çevrede kalıcıdır, biyolojik olarak parçalanamaz, bozunmaz ve bu nedenle toksik seviyelere kolayca ulaşabilmektedirler. Ultramafik kayaçların kimyasal olarak ayrışması sonucu açığa çıkan ağır metaller (başta Cr, Co ve Ni olmak üzere) su ve toprağa karıştığında çevre ve insan sağlığını olumsuz yönde etkileme potansiyeline sahiptir (Kierczak vd., 2007; Vithanage vd., 2014). Yüksek yağış ve erozyon nedeniyle, serpantin toprağı ve sedimentler ana gövdesinden ayrılabilir, sulama sistemleri ile tarım için yaygın olarak kullanılan vadiler ve ovalarda birikebilir (Wei vd., 2018). Ağır metallerin besin zincirine girişi, girdinin miktarına ve kaynağına, bitkilerin alım oranına ve bu bitkilerin hayvanlar tarafından tüketimine bağlıdır (Licina vd., 2010; Almas ve Singh, 2017).

Ultramafik kayaçların kimyasal olarak ayrışması, ultramafik olmayan ana materyalden oluşan topraklara göre yüksek seviyede Cr, Co, ve Ni konsatrasyonu içeren

topraklar meydana getirmektedir (Oze vd., 2004; Cheng vd., 2011; Kelepertzis vd., 2013). Serpantinlerden gelişen topraklar özellikle Cr bakımından yüksektir, bazen 10.000 mg/kg'ın üzerine çıkmaktadır (Becquer vd., 2003). Topraktaki ortalama Cr konsantrasyonu dünya genelinde yaklaşık 84 mg/kg iken serpantin topraklarda 125.000 mg/kg Cr konsantrasyonu gözlemlenmiştir (Hseu ve Lizuka, 2013). Freitas vd., (2004), Portekiz'in kuzey doğusunda, 8000 hektarlık serpantin alanında yaptıkları çalışmada, Cr, Ni'nin yanı sıra önemi miktarda Fe ve Mn tespit etmiştir. Çalışma sonucunda ağır metaller Cr>Ni>Mn>Co sırasını takip etmiştir. Lazaro vd., (2006), tarafından yürütülen çalışmada serpantin, ultrabazik ve diğer toprak türlerinin ağır metal konsantrasyonları belirlenmiş ve serpantin topraklarının Ni, Cr ve Mg konsantrasyonları sırasıyla 4384, 1574 ve 2457 mg/kg tespit edilmiştir. Aynı çalışmada Ca konsantrasyonlarının yetersiz olmadığı ve bitki örtüsünün büyümesi için sınırlayıcı bir faktör olarak görülmediği bildirilmiştir.

Licina vd., (2010), yaptıkları çalışmada, alkalin serpantin toprağının, toprak profilinin en üst 90 cm'sinde sırasıyla 900-1737 mg/kg ve 263-775 mg/kg olmak üzere çok yüksek toplam Ni ve Cr içeriğine sahip olduğunu tespit etmiştir. Aynı çalışmada DTPA ile ekstrakte edilebilir Ni'in alkalin serpantin toprağında en yüksek; DTPA ile ekstrakte edilebilir Cr'un ise arka plan değerlerinin altında olduğunu bulmuştur. Altunbaş (2019), serpantin kayası üzerinde gelişen topraklarda yaptığı çalışma sonucunda iyi ayrışmış serpantin kayalarının yeterli bitki besin maddeleri içerdiği fakat düşük ve/ veya yetersiz ayrışmış serpantinlerin ise bitki besleme kapasitelerinin düşük olduğunu ortaya koymuştur. Bunun yanında toprak tipi, arazi kullanımı ve emisyon kaynaklarına maruz kalma gibi faktörlerin de toprakların ağır metal kirliliğinde önemli rol oynadığını belirtmiştir. Garnier vd., (2006) Brezilya'da ultramafik topraklardaki kromun kaynakları ve potansiyel varlığı, biyoyararlanımı ve toprak biyoçeşitliliği üzerindeki potansiyelini değerlendirmek için yürüttükleri çalışmada 4 profil açmıştır. Toprak örneklerinin toplam Cr konsantrasyonu 5125-17,545; Mn konsantrasyonu 1045-8275; Ni konsantrasyonu ise 2330-6020 mg/kg tespit edilmiştir.

Lombini vd., (1998), İtalya'daki ofiyolitik topraklarda oluşan bitki örtüsünün tanımlanması ve toprak jeokimyasıyla ilişkisini belirlemek için yaptıkları çalışmada aldıkları kayaç örneklerinin ağır metal konsantrasyonlarını tespit etmiştir. Çalışma sonucunda kayaçların ağır metal konsantrasyonları Cr için 2231 mg/kg, Co için 106 mg/kg ve Ni için 2466 mg/kg bulunmuştur. Freitas vd., (2004), Portekiz'in kuzey doğusundaki 8000 hektarlık

serpantinleşmiş bir alanda yaptıkları çalışmada toprakların Ni konsantrasyonunu 102-2342 mg/kg; Cr konsantrasyonunu 200-6822 mg/kg; Co konsantrasyonunu ise 56-174,9 mg/kg arasında tespit etmiştir. Bununla birlikte toprakların Cu, Mn, Pb ve Zn konsantrasyonları sırasıyla 30,85-225,1007-1853,18,5-41,09 ve 63-242 mg/kg olarak değişiklik göstermiştir.

Kierczak vd., (2007), Ilıman iklim altındaki serpantin topraklarında Ni ve Cr dağılımı üzerine mineralojinin ve pedoklimatik varyasyonların etkisi araştırdıkları çalışmalarında toprakların toplam ağır metal konsantrasyonları Cr (2671 mg/kg), Co ( 119 mg/kg), Ni (1329 mg/kg) olarak tespit etmiştir. Ghasemi ve Ghaderian (2009), yaptıkları çalışmada serpantin topraklarının Ni içeriğini, serpantin olmayan topraklara göre 13 kat daha yüksek olduğunu tespit etmiştir.

Miranda vd., (2009), kuzeybatı ispanyada serpantin alanlarında yaptıkları çalışmada toprakların Cr, Ni ve Cu elementlerinin toplam ağır metal ortalamalarını sırasıyla 53,3, 40,8 ve 14,9 mg/kg olarak tespit etmiştir. Ünver vd., (2013), batı Anadolu ve doğu Trakya bölgelerindeki serpantin topraklarının toplam ortalama Co, Cr, Cu, Ni, Pb ve Zn konsantrasyonlarını sırasıyla; 166,0, 631,0, 15,9, 25,7-2680,0, 47,7 ve 164,0 mg/kg tespit etmiştir. Aziz vd., (2015), çeltik tarlası topraklarından Oryza sativa L. farklı kısımlarına (kök ve sürgün) bol miktarda metalin (Ni, Cr, Co, Fe, Al ve Mn) transferi, mevcut ve artık fraksiyonlar olan modifiye metal türleştirme prosedürleri ile araştırılmıştır. Serpantin topraklarının ortalama toplam ağır metal konsantrasyonları sırasıyla 6322 Ni, 4873 Cr, 1005 Co, 239 Cu, 597 Zn bulunmuştur.

Kanellopoulos vd., (2015), toplam 118 tarımsal toprak örneği alarak ağır metal konsantrasyonlarını belirlemiştir. Sonuç olarak toprakların ağır metal konsantrasyonlarının hem Avrupa hem de Yunan topraklarının ortalama değerlerine göre Co (31 mg/kg), Cr (230 mg/kg), Cu (37 mg/kg) ve Ni (330 mg/kg) bakımından daha fazla olduğunu tespit edilmiştir.

Arenas- Lago vd., (2016) serpantinit taş ocağı topraklarının ağır metal konsantrasyonlarını belirlemek için yaptıkları çalışmada Co, Cr ve Ni toplam toprak konsantrasyonu sırasıyla 1472 ila 7132, 1499 ila 4309, 76 ila 373 mg/kg arasında değiştiğini tespit ederek bu sonuçların bildirilen sınır değerleri aştığını bildirmiştir. van der Ent vd., (2017), serpantin toprakları üzerinde yetişen hiperakümülatür bitkilerin Ni akümülasyonu üzerine yaptıkları çalışmada, serpantin topraklarının Ni, Cr, Mn ve Co konsantrasyonlarını sırasıyla 1080-5450, 420-10,980, 1427-7330, 170-690 mg/kg tespit etmiştir.

Özcan vd., (2022), serpantin üzerinde oluşan topraklarda yaptıkları çalışma sonucunda tarım yapılan alanlardaki ağır metal konsantrasyonlarının kontrol topraklarına göre 3-4 kat daha fazla olduğunu tespit etmiştir. Bunun yanında Cr ve Ni konsantrasyonlarının tarımsal üretim açısından limit değerlerin üzerinde bulmuştur. Altunbaş (2023), Türkiye'nin güneybatısındaki serpantin topraklarında yaptığı çalışmada toprakların ortalama ağır metal konsantrasyonlarını Cd için 5,86 mg/kg, Co için 33,97 mg/kg, Cr için109,19 mg/kg, Cu için 46,72 mg/kg, Ni için 235,81 mg/kg, Pb için 39,32 mg/kg ve Zn için 64,56 mg/kg olarak bildirmiştir.

Yapılan araştırmalar topraktaki toplam metal konsantrasyonunun çevresel etkiyi değerlendirmek için yetersiz bir kriter olduğunu göstermektedir. Toplam konsantrasyon tek başına metallerin bulunabilirliği ve potansiyel toksisitesi hakkında genel bilgi sağlamakla beraber toprağın farklı fraksiyonlarındaki metallerin dağılımını ve formlarını, ağır metallerin potansiyel hareketliliği, toksisitesi ve biyoyararlanımı hakkında bilgi vermez. Toprak ana materyaline bağlı olarak farklı fraksiyonlarda bulunan ağır metaller değişik kimyasal form ve/veya bağlanma durumlarında bulunabilirler ( Kaplan ve Yaman, 2009; Güler vd., 2010; Tashahor vd., 2011; Sungur vd., 2014).

Metallerin varlığı kaynağına, ayrışmalarına ve dağılmasına, kil, organik madde, pH, EC gibi biyota ve edafik özellikler için hareketlililklerini kontrol eden toprak bileşenleri arasındaki dağılımlara bağlıdır (Quantin vd., 2008). Rajapaksha vd., (2014) serpantin sedimentlerinde biyoyararlanılabilir Ni ve Mg konsantrasyonlarını sırasıyla 167.6 ve 45.5 mg/kg bulmuştur. Bu nedenle, toprağın farklı fraksiyonlarındaki metallerin dağılımını ve formlarını anlamak, ağır metallerin potansiyel hareketliliği, toksisitesi ve biyoyararlanımı hakkında bilgi edinilmesini sağlamaktadır. Bu amaçla toprakta farklı fraksiyonlarda bağlanmış olan ağır metallerin seçici ekstraksiyonları için ardışık ekstraksiyon yöntemleri geliştirilmiştir. Ardışık ektraksiyon yöntemlerinde birçok farklı çözücü aynı örnek üzerine ardışık olarak uygulanarak her basamakta ayrı çözeltiler elde edilir. Toprakların ağır metal konsantrasyonlarının belirlenmesinde birçok ardışık ekstraksiyon yöntemi kullanılmakla birlikte, elde edilen sonuçların karşılaştırılabilir olması maksadıyla Avrupa Birliği Referans Madde Komisyonu ( BCR- the Eurpoean Community Bureau of Reference) tarafından bir ardışık ekstraksiyon yöntemi geliştirilmiştir ( Tessier vd., 1979; Eren vd., 2021)

Tashakor vd., (2014), serpantin topraklarındaki Co, Cr ve Ni hareketliliğini ardışık ektraksiyon yöntemiyle belirlemek için yaptıkları çalışmada, Cr ve Ni'nin kalıntı fraksiyon ile ilişkili olduğunu tespit etmiştir. Aynı zamanda söz konusu ağır metallerin, genel olarak mobil fraksiyonlarda daha az olduğunu ve bu nedenle temel olarak bu ağır metallerin çevrede bulunmadığını bildirmiştir. Garnier vd., (2013), ultramafik anamateryal üzerinde gelişen ferrosollerdeki Cr(VI) yarayışlılığı üzerine yaptıkları çalışmada, Cr(VI)'ün Fe-oksitler üzerinde tamamen adsorbe edildiğini ortaya koymuştur.

Arenas-Lago vd., (2016), yaptıkları çalışmada kimyasal ardışık ekstraksiyondan sonra, yüksek Co, Cr, Ni ve V içeriğinin toprakların kalıntı fraksiyonu ile ilişkili olduğunu tespit etmiştir. Buna ek olarak, Fe ve Mn oksitler Co fiksasyonu için yüksek kapasiteye sahipken, Cr, Ni ve V esas olarak magnezyum silikatlarla ilişkili olduğunu ortaya koymuştur. Organik madde ve çözünebilir veya kullanılabilir formlarla ilgili fraksiyonlar, toprakların hiçbirinde %2,5'i geçmeyecek şekilde sırasıyla düşük ve çok düşük olduğunu tespit etmiştir. Özcan vd., (2022), serpantin üzerinde oluşmuş topraklarda yaptıkları çalışmada metallerin potansiyel hareketliliğinin Co> Ni> Cr sıralamasını izlediğini tespit etmiştir. Bunun yanında tüm metallerin kalıntı fraksiyonda bulunduğunu belirtmiş ve bu durumun serpantin topraklarının özelliklerini yansıttığını bildirmiştir.

# ÜÇÜNCÜ BÖLÜM
# MATERYAL VE YÖNTEM

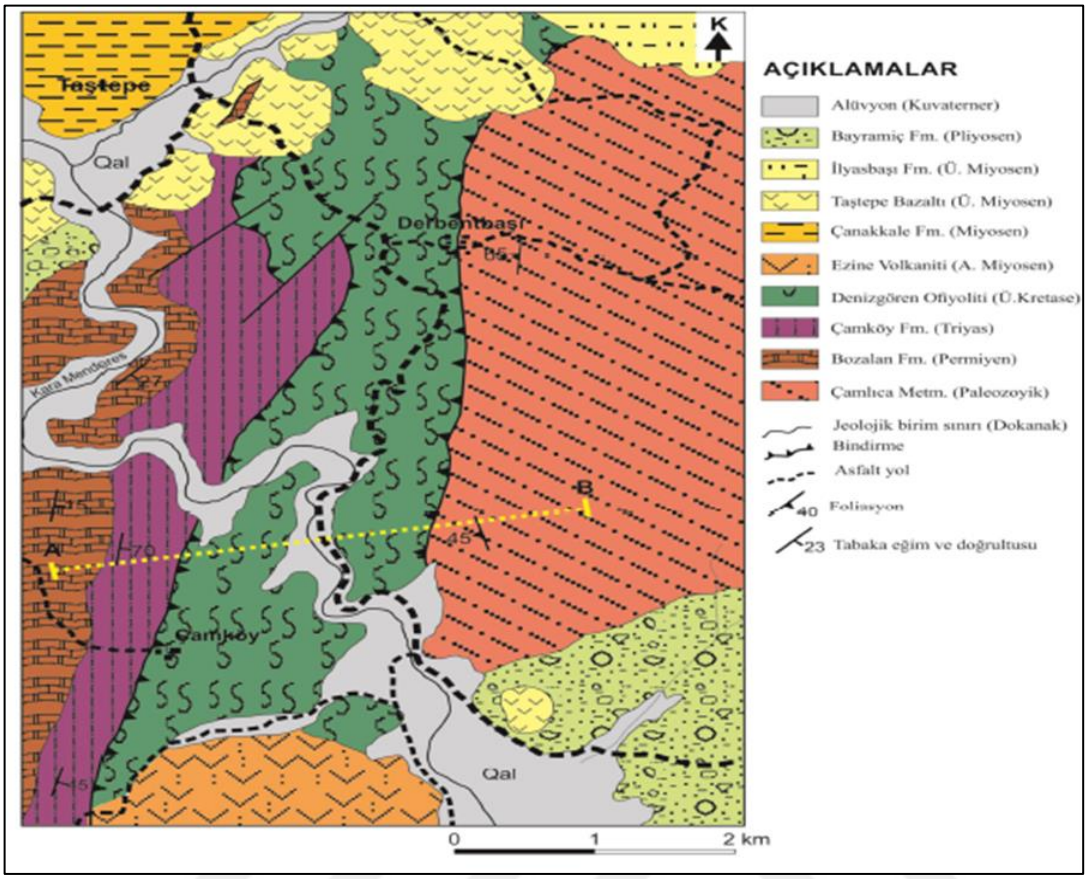
## 3.1 . Çalışma Alanı

Tez çalışması 39° 48′ 18″ - 40 02′ 42″ kuzey enlemleri ile 26° 15′ 18″ - 26 29′ 31″ doğu boylamları arasında gerçekleştirilmiştir. Çalışma, Çanakkale ilinin merkez ilçesinde yer alan, Denizgöründü, Kızılcaören ve Elmacık ile Ezine ilçesine bağlı Gazi mahallesi, Çamköy, Köprübaşı, Derbentbaşı ve Karadağ köylerindeki serpantin kayaçları üzerinde oluşmuş topraklarda gerçekleştirilmiştir.

Çanakkale ili yıllık sıcaklık ortalaması 15,2 °C'dir. En yüksek sıcaklık Temmuz-Ağustos aylarında görülürken; en düşük sıcaklıklar Ocak ve şubat aylarında görülmektedir. Çanakkale ili ortalama yağışlı gün sayısı yıllık 84,2 mm'dir. İlin yıllık toplam yağış miktarı ortalaması 625,3 mm'dir. Bununla birlikte en yüksek yağış miktarı kış ve ilkbahar aylarında düşmektedir ("Meteoroloji Genel Müdürlüğü", 2024).

Biga yarımadasının farklı bölgelerinde serpantinleşmiş ultrabazik kayaların (Çetmi ofiyolitli melanjı, Denizgören ofiyoliti vb.) varlığı bilinmektedir. Bu alanlardan Denizgören ofiyoliti (Okay vd., 1990) çalışma alanı içinde yer almakta olup, çalışmanın temel jeolojik birimini oluşturmaktadır. Denizgören ofiyoliti, başlıca serpantinleşmiş harzburjitlerden oluşmuştur. Birim, Okay vd., (1990) tarafından, Denizgören köyü çevresinde yaygın yüzeylendiği için "Denizgören ofiyoliti" olarak isimlendirilmiştir. Denizgören ofiyoliti, sahada koyu yeşilden siyahımsı yeşile kadar değişik renklere sahip, kaygan yüzeyli ve yoğun çatlaklı, kırılgan serpantinitlerle temsil edilmektedir. Denizgören ofiyolitini oluşturan litolojiler, çalışma alanında "Çamlıca metamorfitleri" ve "Çamköy formasyonu" üzerine tektonik dokanaklıdır.

Çalışma alanında Denizgören ofiyolitinin dağılımını gösteren jeoloji haritası Okay vd., (1990)'dan yenilenerek hazırlanmıştır.




Şekil 1. Çalışma alanı

### 3.2. Örneklerin Alınması ve Analize Hazırlanması

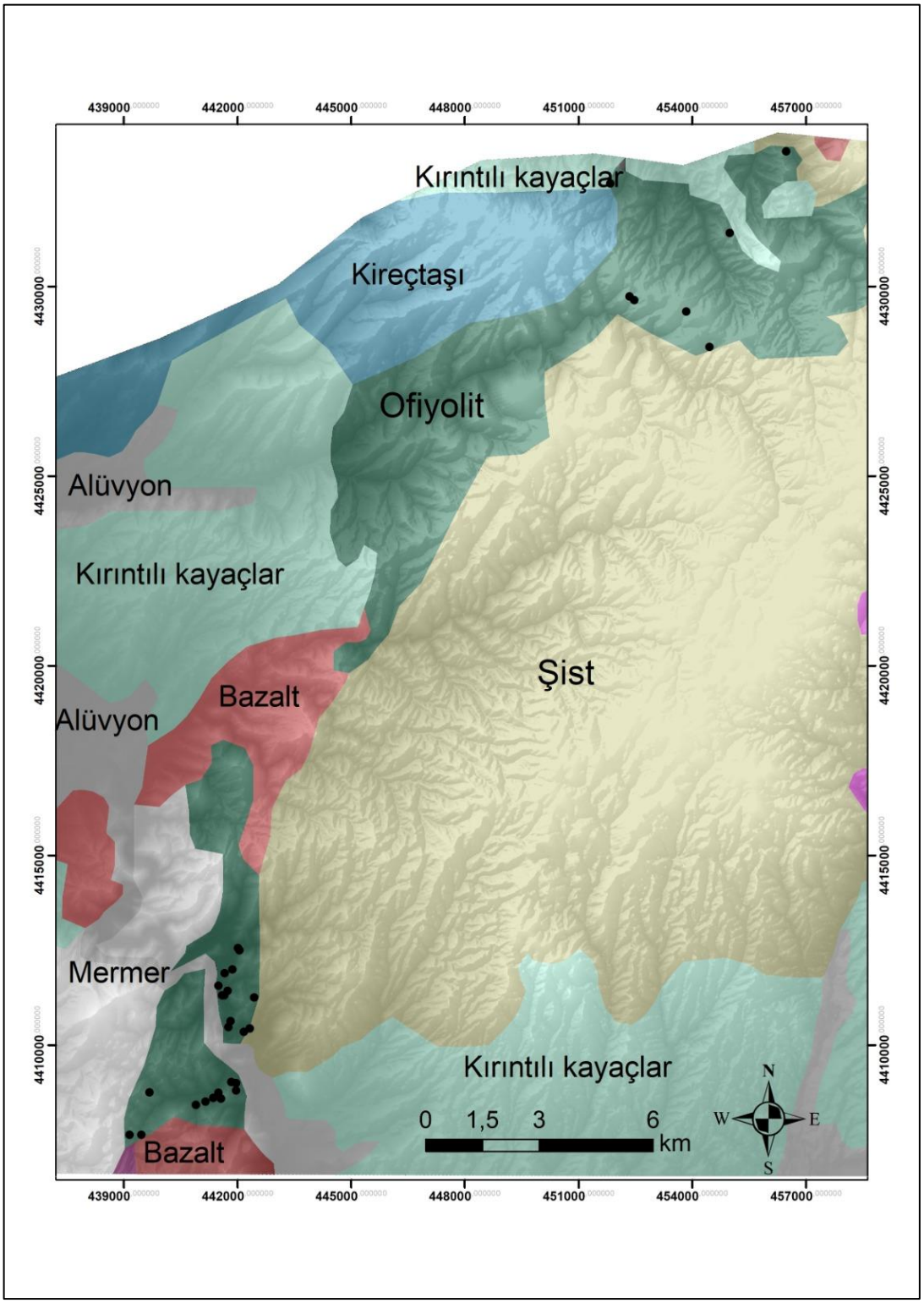
Ön büro çalışması kapsamında yapılan ofis ve takiben gerçekleştirilen ilk arazi çalışmasından sonra örnekleme noktaları belirlenmiştir. Büro çalışması esnasında MTA'ya ait 1/100.000 ölçekli jeoloji haritası kullanılarak arazinin mevcut koşulları, jeolojik yapı ve arazi gözlemlerinde belirlenen arazi kullanım türleri dikkate alınarak örnekleme noktaları belirlenmiştir. Ön büro aşamasından sonra tez çalışması için (23/10/2020, 20/11/2020 ve 27/052021 tarihlerinde) araziye çıkılmış ve örneklemeler yapılmıştır. Çalışma doğrultusunda belirlenen noktalardan 24 adet tarım toprağı (T), 7 doğal alan toprağı (DA) ve 7 adet kayaç örneği alınmıştır (Şekil 2). Bunula birlikte tez çalışması kapsamında tarım yapılan arazilerden bitki örnekleri alınmıştır. Bu kapsamda üzerinde farklı ürünler yetiştirilen 8 araziden buğday, 6 araziden biber, 2 araziden yonca ve 6 araziden zeytin olmak üzere toplam 22 araziden toprak örnekleri ile aynı alandan bitki yaprağı örneklemesi yapılmıştır. Alınan örneklerin enlem ve boylam bilgisi ile rakım verisi Global Positioning System (Garmin marka) aleti kullanılarak kayıt altına alınmıştır. Tez çalışmasının örnek noktalarının bakı

verisi, sayısal yükseklik modeli (DEM) haritasından hesaplanmıştır. Ayrıca parsellere ait kayıt bilgisi Tapu ve Kadastro Genel Müdürlüğüne ait web uygulaması olan "Tapu CBS uygulaması" kullanılarak belirlenmiş ve kaydedilmiştir. Arazi kullanım türlerine (AKT) ait bilgiler ise arazi gözlemleri sonucu belirlenerek kaydedilmiştir. Örnek noktalarına ait bilgiler Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1

Toprak örneklerine ait bilgiler

| Örnek | X | Y | Yükseklik (m) | Eğim (%) | Bakı | Mahalle/Köy | AKT |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **DA1** | 439682 | 4408742 | 113 | 20 | K-G | Çamköy | Orman |
| **DA2** | 441561 | 4408581 | 70 | 16,2 | B-D | Gazi | Orman |
| **DA3** | 441960 | 4408791 | 40 | 7,9 | K-G | Gazi | Funda/maki |
| **DA4** | 442322 | 4410422 | 57 | 28 | G-K | Köprübaşı | Orman |
| **DA5** | 441737 | 4411416 | 64 | 9,8 | K-G | Köprübaşı | Orman |
| **DA6** | 442008 | 4412547 | 51 | 30,1 | KB-GD | Derbantbaşı | Orman |
| **DA7** | 452470 | 4429630 | 357 | 11,6 | GB-KD | Denizgöründü | Orman |
| **T1** | 440904 | 4408407 | 53 | 2,5 | D-B | Çamköy | Buğday |
| **T2** | 441160 | 4408504 | 48 | 1,6 | K-G | Çamköy | Buğday |
| **T3** | 441359 | 4408596 | 47 | 5,2 | KB-GD | Çamköy | Buğday |
| **T4** | 441493 | 4408728 | 49 | 1,1 | KB-GD | Çamköy | Kapya biber |
| **T5** | 441842 | 4409015 | 42 | 2,4 | KD-GB | Gazi | Yonca |
| **T6** | 441962 | 4408987 | 41 | 2,1 | D-B | Gazi | Yonca |
| **T7** | 442166 | 4410340 | 49 | 1,9 | KD-GB | Köprübaşı | Buğday |
| **T8** | 442441 | 4411241 | 91 | 6,3 | KB-GD | Köprübaşı | Zeytin |
| **T9** | 441761 | 4410465 | 48 | 25,3 | GB-KD | Köprübaşı | Kapya biber |
| **T10** | 441818 | 4410620 | 45 | 20,3 | KB-GD | Köprübaşı | Zeytin |
| **T11** | 441592 | 4411304 | 43 | 4 | K-G | Köprübaşı | Kapya biber |
| **T12** | 441656 | 4411301 | 47 | 13,8 | GB-KD | Köprübaşı | Kapya biber |
| **T13** | 441864 | 4411983 | 48 | 22,6 | K-G | Köprübaşı | Buğday |
| **T14** | 442051 | 4412487 | 45 | 24,6 | KB-GD | Derbantbaşı | Buğday |
| **T15** | 453848 | 4429333 | 383 | 5,2 | G-K | Denizgöründü | Buğday |
| **T16** | 454460 | 4428393 | 356 | 17 | G-K | Denizgöründü | Buğday |
| **T17** | 452341 | 4429733 | 354 | 3,5 | GD-KB | Denizgöründü | Buğday |
| **T18** | 454991 | 4431401 | 206 | 24,2 | KD-GB | Elmacık | zeytin |
| **T19** | 456479 | 4433552 | 129 | 15,2 | KD-GB | Elmacık | Zeytin |
| **T20** | 451842 | 4432702 | 157 | 11,4 | D-B | Kızılcaören | Zeytin |
| **T21** | 441495 | 4411558 | 35 | 2,5 | D-B | Köprübaşı | Kapya biber |
| **T22** | 441662 | 4411889 | 40 | 2,2 | G-K | Köprübaşı | Buğday |
| **T23** | 439147 | 4407622 | 150 | 2,1 | D-B | Karadağ | Zeytin |
| **T24** | 439462 | 4407621 | 107 | 0,5 | KB-GD | Karadağ | Kapya biber |




Şekil 2. Çalışma alanı jeolojisi ve örnekleme noktaları.




Şekil 3. Örnekleme noktalarına (T1, T2, T3, T4, T5, T6, DA2 ve DA3) ait Google Earth görüntüleri.




Şekil 4. Örnekleme noktalarına (T7, T9, T10 ve DA3) ait Google Earth görüntüleri.




Şekil 5. Örnekleme noktalarına (T11, T12, T21 ve DA3) ait Google Earth görüntüleri.



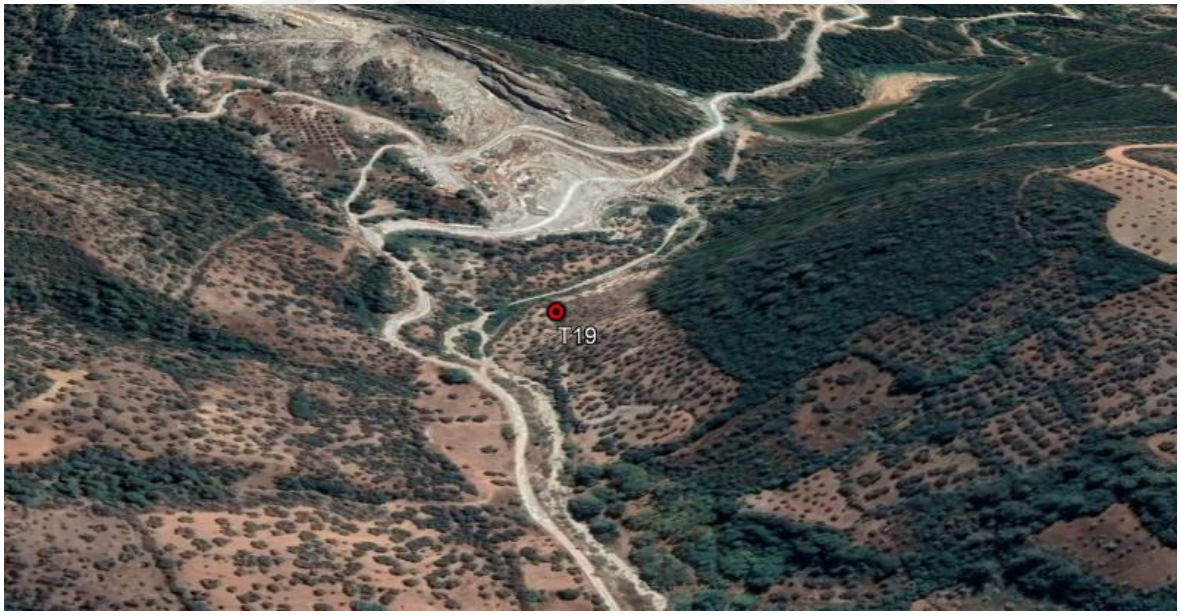

Şekil 6. Örnekleme noktalarına (T13, T14, T22 ve DA6) ait Google Earth görüntüleri.




Şekil 7. Örnekleme noktalarına (T15,T16, T17 ve DA7) ait Google Earth görüntüleri.




Şekil 8. Örnekleme noktasına (T18) ait Google Earth görüntüleri.




Şekil 9. Örnekleme noktasına (T19) ait Google Earth görüntüleri.




Şekil 10. Örnekleme noktasına (T20) ait Google Earth görüntüleri.




Şekil 11. Örnekleme noktalarına (T23 ve T24) ait Google Earth görüntüleri.

Laboratuvara getirilen toprak örnekleri (tarım ve doğal alan toprakları) plastik kaplar içinde oda sıcaklığında kurutulmak üzere dış etkenlerden uzak bir şekilde kurumaya bırakılmıştır. Hava kuru hale gelen toprak örnekleri önce tahta tokmak yardımıyla öğütülmüş ve daha sonra 2 mm'lik elekten geçirilerek analize hazır hale getirilmiştir. Bu toprak örnekleri; tekstür, pH, elektriksel iletkenlik ve kireç analizlerinde kullanılmıştır. Daha sonra 2 mm'lik elekten elenen örneklerden bir miktar alınarak havanda öğütülmüş ve 0,5 mm'lik elekten geçirilerek toprak organik maddesi ve elementel analizler için kullanılmıştır. Araziden alınan kayaç örnekleri laboratuvara getirildikten sonra önce çeneli kırıcı ile küçük parçalara ayrılmış ve silindir öğütücü ile toz haline getirilmiştir.

Bitki örnekleri, üzerindeki toprak, ilaç kalıntısı vb. uzaklaştırmak için saf su ile yıkandıktan sonra kurulanmıştır. Kurulama işleminden sonra 48 saat 65 ºC'de etüvde kurutulmuştur. Sabit ağırlığa gelen bitki örnekleri porselen havan yardımıyla öğütüldükten sonra analize hazır hale getirilmiştir.

### 3.3. Toprak Örneklerine Ait Fiziko-Kimyasal Analizler

Analizlerde kullanılacak olan laboratuvar malzemeleri %10'luk $HNO_3$ çözeltisinde bekletilmiştir. Çözeltiden çıkarılan malzemeler deiyonize suda yıkandıktan sonra etüvde kurutulmuştur ve daha sonra kullanılmıştır. Analize hazır hale gelen toprak örneklerinde tekstür, pH, EC (elektriksel iletkenlik), kireç ($CaCO_3$) ve organik madde analizleri yapılmıştır.

#### 3.3.1. Toprak tekstür tayini

Toprak örneklerinin tekstür tayini, Gee ve Or (2002)'e göre hidrometre yöntemiyle belirlenmiştir. Bu kapsamda 50 gram hava kuru toprak numunesi tartıldıktan sonra üzerine 20 mL %5'lik sodyum hekzametafosfat çözeltisi ve 90 ml saf su eklenmiş; iyice karıştırılan örnek bir gece bekletildikten sonra toprak mikseri ile 7-10 dakika karıştırıldıktan sonra tekstür silindirine aktarılmıştır. Tekstür silindirine aktarılan örneğin hacmi hidrometre ile son hacim 1130 ml olacak şekilde saf su ile tamamlanmıştır. Karıştırma çubuğu ile 20 kere karıştırıldıktan sonra hidrometre ile 40. saniye ve 2. saat okuması yapılmıştır. Analizde, sıcaklık düzeltme faktörü kullanılmıştır. 20 °C'nin üzerindeki her bir derece sıcaklık artışı için hidrometre okumasına 0,36 eklenmiş ve 20 °C'nin üzerindeki her bir derece sıcaklık düşüşü için 0,36 çıkarılmıştır.

Hesaplama aşağıdaki denklemler kullanılarak yapılmıştır.

$$\textbf{\% Kil+ Silt} = \frac{\text{40" Düzeltilmiş Hidrometre Okuması}}{\text{Fırın Kuru Toprak}} \text{ x } 100 \quad (3.1)$$

$$\textbf{\% Kil} = \frac{\text{2.saat Düzeltilmiş Hidrometre Okuması}}{\text{Fırın Kuru Toprak}} \text{ x } 100 \quad (3.2)$$

**% Kum** = 100 - % Kil+ Silt (3.3)

### 3.3.2. Toprak reaksiyonu (pH) ve Elektriksel iletkenlik (EC) tayini

Toprak reaksiyonu (pH), 1:2,5 toprak-su karışımında pH-metre ile ölçülmüştür (Grewelling ve Peech, 1960). 20 g toprak örneği tartılarak üzerine 50 ml saf su eklenmiştir. Toprak örneklerinin toplam tuz içeriği (EC) yine 1:2,5 toprak su karışımında Richards (1954)'e göre EC metre ile belirlenmiştir. Bir gece bekletilen örneklerin pH ve EC ölçümleri süspansiyonun üst kısmındaki berrak sıvı kısımda yapılmıştır.

### 3.3.3. Organik madde tayini

Toprak örneklerinin organik madde içeriği asit ortamında dikromat ile organik maddenin oksidasyonu yoluyla analiz edilmiştir (Smith ve Weldon, 1941). Bu analizde toprak örneklerinin organik madde içeriği, organik karbon üzerinden hesaplanarak elde edilmiştir. Organik madde tayini için, 2 mm'lik elekten geçmiş bir miktar toprak alınarak havanda öğütülmüş ve 0,5 mm'lik elekten elenmiştir. Sonra 1 gram toprak örneği 500 ml'lik erlenmayere tartılmış ve üzerine 10 ml potasyum dikromat çözeltisi eklenmiştir. Örnek hafifçe çalkalanarak toprak örneğinin çözelti ile ıslanması sağlanmıştır. Daha sonra üzerine 20 ml derişik sülfürik asit eklenerek çeker ocakta soğumaya bırakılmıştır. Soğuyan örneklerin üzerine 200 ml saf su ve 25 ml demir sülfat çözeltisi eklenerek potasyum permanganat çözeltisi ile titre edilmiştir. Hesaplama aşağıdaki denklemler kullanılarak yapılmıştır.

$$\textbf{\% Organik Karbon} = \frac{A-B}{T} \text{ x N x } \frac{12}{400} \text{ x } \frac{1}{0,74} \text{ x } 100 \quad (3.4)$$

**A:** Toprak örneği için sarf edilen $KMNO_4$ çözeltisi (ml)

**B:** Tanık için sarf edilen $KMNO_4$ çözeltisi (ml)

**T:** Örnek miktarı (g)

**N:** Titrasyonda kullanılan $KMNO_4$ çözeltisinin kesin normalitesi

**12/400:** Karbonun miliekivalan hesabı için kullanılan katsayı

**1/0,74:** Toprak organik maddesindeki organik karbonun %74'ünün okside olduğu varsayıldığını gösteren katsayı

Organik karbonu belirledikten sonra, organik maddenin %58 karbon içeriği varsayımından yola çıkarak bu değeri Van Bemmelen Faktörü (1,724) ile çarpılarak toprak örneklerinin organik madde içeriği hesaplanmıştır.

**% OM=** %O.C x 1,724 (3.5)

### 3.3.4. Kireç ($CaCO_3$) tayini

Toprak örneklerinin kireç tayini Scheibler kalsimetresi ile $CO_2$ hacminin ölçülmesi esasına göre hesaplanmıştır (Schlicting ve Blume, 1966). Kireç tayini için 1 gram toprak örneği tartılarak erlenmayere aktarılmıştır. Asit tüpüne 4-5 ml %10'luk HCl çözeltisinden konularak erlenmayer içine yerleştirilmiştir. Daha sonra erlenmayerin ağzı kalsimetrenin tıpası ile kapatılmıştır. İçinde toprak örneği ve asit tüpü olan erlenmayerin tüpün içindeki asidin toprak örneği ile reaksiyona girmesi sağlanmıştır. Kalsimetrenin U borusundaki su seviyesinin sabitlenene kadar bu işlem devam ettirilmiş ve su seviyesi sabitlendikten sonra çekül yardımıyla U borusundaki seviyeler eşitlenmiştir. Bu işlemden sonra $CO_2$ miktarı $cm^3$ olarak ölçülmüştür. Analiz anındaki sıcaklık ve hava basıncı hesaplamada kullanılmak üzere not edilmiştir. Hesaplama aşağıdaki denklemler kullanılarak yapılmıştır.

$$\%CaCO_3 = \frac{V \times 0{,}004464}{A} \times 100 \quad (3.6)$$

**V:** Normal şartlarda dönüştürülmüş $CO_2$ hacmi ($cm^3$)

**A:** Örnek miktarı (g)

**100:** % değere ulaşmak için

**0,004464:** Normal şartlarda altında 1 $cm^3$ $CO_2$ hacmine karşılık gelen $CaCO_3$ miktarı

$$\mathbf{V}= \frac{273 \text{ x } Vo \text{ x } (P-p)}{(273+t)\text{x } 760} \quad (3.7)$$

**$V_o$:** Kalsimetrede okunan $CO_2$ hacmi ($cm^3$)

**P:** Barometre ile ölçülen ortamın hava basıncı (mm Hg)

**p:** Ölçüm yapılan sıcaklıktaki su buhar basıncı

**273:** Sıcaklık düzeltmesinde, Kelvin'e çevirmek için kullanılan katsayı

**760:** Basınç düzeltmesinde mm Hg için kullanılan katsayı

**t:** Analizin yapıldığı andaki ortam sıcaklığı (°C)

### 3.4. Kayaç, Toprak ve Bitki Örneklerinin Toplam Ağır Metal Analizleri

Kayaç ve toprak örneklerinin toplam ağır metal içerikleri kral suyu (*Aqua regia;* $HNO_3$: HCl karışımı; 1:3) yaş yakma yöntemi kullanılarak belirlenmiştir (Tuzen vd., 2004). Bunun için 0,5 mm'lik elekten elenmiş olan toprak örneklerinden 1 g tartılarak üzerine 20 ml kral suyu asit karışımı eklenmiş ve yakma işlemi gerçekleştirilmiştir. Yakılan örnekler, 0,45 µm'lik filtreden geçirilerek son hacim 50 ml'ye saf su ile tamamlanmıştır.

Bitki örneklerinin toplam ağır metal içeriklerini belirlemek için 1 g tartılan bitki örnekleri üzerine 12 ml $HNO_3$ ve 6 ml $H_2O_2$ karışımı eklenmiştir. Bu karışım neredeyse kuruluğa kadar ısıtılmıştır. Bu prosedür tekrarlandıktan sonra yakılan örnekler 0,45 µm'lik filtreden geçirilerek son hacim 25 ml'ye saf su ile tamamlanmıştır. Elde edilen ekstraktlardaki metal konsantrasyonları alevli atomik absorpsiyon spektroskopisi (FAAS) ile belirlenmiştir.

### 3.5. Toprakta Ağır Metal Fraksiyonlarının Belirlenmesi

Toprak örneklerinin ağır metal fraksiyonlarını belirlemek için Tessier vd., (1979) tarafından oluşturulan ve Avrupa Standart, Ölçüm ve Test Programı Komisyonu (the Standarts, Measurements and Testing Programme of European Comission) tarafından geliştirilen BCR (the Eurpean Community Bureau of Reference) dört basamaklı ardışık ekstraksiyon yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntem sonucunda elde edilen dört fraksiyon sırasıyla; değişebilir ve asitte çözünür fraksiyon ($F_1$, karbonatlara bağlı), indirgenebilir fraksiyon ($F_2$, Fe/Mn oksitlere bağlı), oksitlenebilir fraksiyon ($F_3$, organik madde ve sülfitlere bağlı) ve kalıntı fraksiyondur ($F_4$, mineral yapıya bağlı). BCR ardışık ekstraksiyon yönteminde her bir fraksiyon eldesi için uygulanan işlemlerin detayları aşağıda verilmiştir:

**$F_1$ Fraksiyonu:** Toprak örnekleri 1 gram tartılarak 50 ml'lik santrifüj tüplerine aktarılmıştır. Tüm toprak örneklerinin üzerine 40 ml 0,11 M $CH_3COOH$ (asetik asit) çözeltisinden eklenmiştir. Daha sonra bu örnekler otomatik çalkalayıcı ile 200 rpm'de 16 saat, oda sıcaklığında çalkalanmıştır. Çalkalama işleminden sonra örnekler 20 dakika 4000 rpm'de santrifüjlenmiştir. Santrifüj işlemi sonrasında üstte kalan sıvı kısım Watman-42 filtre kağıdı ile süzülerek analiz işlemi için muhafaza edilmiştir. Bir sonraki basamağa geçmeden önce yıkama işlemi için santrifüj tüpünde kalan katı kısım üzerine 20 ml saf su eklenerek santrifüjlenmiş ve sıvı kısım uzaklaştırılmıştır.

**$F_2$ Fraksiyonu:** F1 fraksiyonundan elde edilen santrifüj tüplerindeki katı kısmın üzerine 40 ml 0,5 M $HONH_2.HCl$ (hidroksilamonyum klorür) çözeltisinden eklenmiştir. Bu örnekler yine bir önceki basamaktaki gibi oda sıcaklığında 200 rpm'de 16 saat çalkalanmış ve 20 dakika 4000 rpm'de santrifüjlenmiştir. Bu işlemden sonra sıvı kısım Watman-42 filtre kağıdı ile süzülmüştür. Süzülen kısım analiz için muhafaza edilmiştir. Bir sonraki basamağa geçmeden önce tüm örnekler tekrar yıkama işleminden geçirilmiştir.

**$F_3$ Fraksiyonu:** İkinci basamak sonucunda elde edilen katı kısmın üzerine 10 ml 8,8 M $H_2O_2$ (hidrojen peroksit) çözeltisinden eklenmiştir. Daha sonra örnekler oda sıcaklığında otomatik çalkalayıcı yardımıyla 200 rpm'de 1 saat çalkalanmıştır. Çalkalama işleminden sonra örnekler, sıvı kısım kuruluğa yakın bir seviyeye gelene kadar, 85 °C'de 1-1,5 saat süre bekletilmiştir. Daha sonra bu örnekler soğumaya bırakılmıştır. Örnekler soğuduktan sonra üzerine tekrar 10 ml $H_2O_2$ çözeltisi konularak işlem tekrarlanmıştır. Soğuyan örneklerin üzerine 50 ml 1,0 M $CH_3COONH_4$ (amonyum asetat) çözeltisinden eklenmiştir. Önceki basamaklarda olduğu gibi örnekler 16 saat çalkalanmış ve 20 dakika 4000 rpm'de

santrifüjlenmiştir. Bu işlemden sonra tüpün üstünde kalan sıvı kısım Watman-42 filtre kağıdı ile süzülmüştür. Süzülen kısım analiz için muhafaza edilmiştir. Önceki basamaklarda olduğu gibi bu basamakta da yıkama işlemi yapılarak örnekler son basamak için hazır hale getirilmiştir.

**$F_4$ Fraksiyonu:** Önceki basamaklardan sonra santrifüj tüplerinde kalan toprak örneği 100 ml hacimli beherlere aktarılmıştır. Beherlere aktarılan toprak örnekleri üzerine 20 ml kral suyu (*Aqua regia*) eklenmiştir. Kral suyu eklenen örnekler hot-plate üzerine alınmış ve kademeli olarak sıcaklık artırılarak kuruluğa yakın dereceye gelene kadar ısıtılmıştır. Bu işlemden sonra Watman 42 filtre kağıdı ile süzülen örnekler balon jojelere son hacim 50 ml olacak şekilde saf su ile tamamlanmıştır. Daha sonra örnekler analiz için muhafaza edilmiştir. Elde edilen ekstraktlardaki metal konsantrasyonları alevli atomik absorpsiyon spektroskopisi (FAAS) ile belirlenmiştir.

Tablo 2

BCR ardışık ekstraksiyon yöntemi

| Fraksiyon | Topraktaki Fraksiyon | Ekstrakt maddesi | Çalkalama süresi ve sıcaklık |
|---|---|---|---|
| $F_1$ | Değişebilir fraksiyon (Karbonatlara bağlı) | 40 ml 0.11 M $CH_3COOH$ | Laboratuvar sıcaklığında 16 saat |
| $F_2$ | İndirgenebilir Fraksiyon (Fe-Mn oksitlere bağlı) | 40 ml 0.5 M $HONH_2.HCl$ (pH:1,5) | Laboratuvar sıcaklığında 16 saat |
| $F_3$ | Oksitlenebilir fraksiyon (Organik madde ve sülfitlere bağlı) | 10 ml 8.8 M $H_2O_2$ (pH:2) tekrar 10 ml 8.8 M $H_2O_2$ (pH 2) ve 50 ml 1 M $NH_4OAc$ (pH:2) | Laboratuvar sıcaklığında 1 saat çalkalanır, 1 saat 85 °C ısıtılır ve laboratuvar sıcaklığında 16 saat |
| $F_4$ | Artakalan fraksiyon (Mineral yapıya bağlı) | 15 ml ve ardından 10 ml kral suyu | Kuruluğa yakın ısıtılır ve son hacme tamamlanır. |

### 3.6. Ağır Metal Ekstraksiyonları İçin Doğruluk Testi (Validasyon)

Çalışma kapsamında toprak örnekleri için yapılan toplam ağır metal analizinde doğruluk testi için ERM-CC141 (tınlı toprak) sertifikalı referans madde kullanılmıştır. Analiz sırasında toprak örneklerine uygulanan tüm işlemler bu referans maddeye de

uygulanmış ve elde edilen sonuçlar ile sertifikadaki değerler karşılaştırılmıştır.

Bitki örneklerinin toplam ağır metal analizinde doğruluk testi için SRM-1573a (domates yaprağı) sertifikalı referans maddeler kullanılmıştır. Analiz sırasında referans maddelere de bitki örneklerine uygulanan tüm işlemler uygulanmış ve elde edilen sonuçlar sertifika değerleri ile karşılaştırılmıştır.

Toprak örneklerinin ağır metal fraksiyonlarının belirlenmesi için yapılan BCR ardışık ekstraksiyon analizinde doğruluk testi için BCR-701 (göl sedimenti) sertifikalı referans madde kullanılmıştır. Diğer referans maddeler de olduğu gibi bu referans maddeye de analiz sırasında toprak örneklerine uygulanan tüm işlemler uygulanmış ve elde edilen sonuçlar ile sertifika değerleri karşılaştırılmıştır.

### 3.7. Analizlerde Kullanılan Cihazlar

Tez çalışması kapsamında yapılan toprak ve bitki analizleri Toprak Bilimi ve Bitki Besleme Bölümü, Toprak Bilimi Laboratuvarında yürütülmüştür. Yapılan analizler kapsamında kullanılan alet ve ekipmanlar Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 3

Analizlerde kullanılan alet ve ekipmanlar

| Alet/ Ekipman | Marka | Model |
|---|---|---|
| Saf su cihazı | MES | MP Minipure |
| FAAS | Analitik Jena | NovAA 350 |
| Etüv | NÜVE | FN 500 |
| Hassas Terazi | Precisa | BT 1000C |
| Santrifüj | NÜVE | NF 800R |
| pH - EC metre | HACH | HQ40d |
| Toprak mikseri | Hamilton Beach | - |
| Manyetik karıştırıcı | NÜVE | MK 318 |
| Isıtıcı tabla | MTOPS | HP 330 |
| Yatay çalkalayıcı | Heidolph | Unimax 2010 |
| Otomatik pipetler | BRAND | - |
| Hidrometre | - | ASTM - E100 |

Tez çalışmasında elde edilen bütün ekstraktlardaki ağır metallerin (Cd, Co, Cr, Cu, Ni, Pb ve Zn) konsantrasyonları alevli atomik absorpsiyon spektroskopisi (FAAS) ile belirlenmiştir. Bütün FAAS çalışmalarında oyuk katot lambası ve alev gazı olarak hava-

asetilen kullanılmıştır. Çalışma boyunca FAAS Cd, Co, Cr, Cu, Ni, Pb ve Zn için sırasıyla 0,2, 0,2, 0,2, 1,4, 0,2, 1,4 ve 0,5 nm yarık genişlikleri kullanılmıştır. Ayrıca Cd, Co, Cr, Cu, Ni, Pb ve Zn elementleri için sırasıyla 228,8, 240,7, 357,9, 324,8, 232,0, 283,3 ve 213,9 nm dalga boylarında ölçümler yapılmıştır.

### 3.8. Ağır Metallerin Çevresel Risk Değerlendirmesi

Çalışma sonucunda toprak örneklerinde bulunan ağır metallerin potansiyel ekolojik risklerini belirlemek amacıyla Risk Değerlendirme Kodu (RAC), Kontaminasyon Faktörü (Cf), Ekolojik Risk İndeksi (Er) ve Potansiyel Ekolojik Risk İndeksi (RI) uygulanmıştır. RAC asitte çözünen fraksiyon olarak tanımlanmakta olup ağır metallerin çevresel riskinin daha güvenilir bir şekilde değerlendirilmesi için kullanılmaktadır (Singh vd., 2005; Bo vd., 2015) ve aşağıdaki formülle hesaplanmıştır:

$$\textbf{RAC (\%)} = (F_1/\ \Sigma F) \times 100 \qquad (3.8)$$

**$F_1$ =** F1 fraksiyon konsantrasyonu
**$\Sigma F$ =** Fraksiyonlar toplamı ($F_1+F_2+F_3+F_4$)

Risk Değerlendirme Kodu'na (RAC) göre, RAC < %1 çevre için risk oluşturmaz; %1 <RAC < %10 ise düşük risk; %11 < RAC < %30 ise orta risk; %31< RAC< %50 ise yüksek risk ve RAC< %50 ise aşırı risk sınıfına girmektedir (Jain, 2004; Sungur vd., 2023).

Kontaminasyon Faktörü (Cf) ağır metaller için nispi alıkonma sürelerinin tahmin edilmesinde kullanılmaktadır (Bo vd., 2015). Cf değerinin yüksek olması, daha düşük tutunma süresini ve çevre için yüksek risk seviyelerini göstermektedir. Kontaminasyon faktörü aşağıdaki formülle hesaplanmıştır:

$$\textbf{Cf} = C_i/C_n \qquad (3.9)$$

**$C_i$:** Mobil fraksiyon konsantrasyonu ($F_1+F_2+F_3$),
**$C_n$:** İmmobil fraksiyon konsantrasyonu (F4)

Kontaminasyon Faktörü'ne (Cf) göre, Cf< 1 ise temiz; 1<Cf<3 ise düşük kirlilik; 3< Cf <6 ise orta; 6< Cf < 9 ise önemli ve Cf >9 ise aşırı kirlenmeyi göstermektedir (Jamali vd., 2007; Sungur vd., 2023).

Ekolojik Risk İndeksi (Er), toprakta biriken her bir metalin potansiyel ekolojik riskini ortaya koymaktadır (Amini vd., 2024) ve aşağıdaki formül yardımıyla hesaplanmıştır:

$$\mathbf{Er} = Tr \times Cf \quad (3.10)$$

**Tr:** Bireysel ağır metalin toksik faktörü

**Cf:** Kontaminasyon faktörü

Her bir metal için potansiyel ekolojik indeksin hesaplanmasında kullanılan Tr değerleri şunlardır: Cd: 30, Co: 5, Cr: 2, Cu: 5, Ni: 5, Pb: 5 ve Zn: 1 (Kowalska vd., 2018). Ekolojik Risk İndeksi (Er), $Er < 40$ ise düşük; $40 \leq Er \leq 80$ ise orta risk; $80 \leq Er \leq 160$ ise önemli; $160 \leq Er \leq 320$ ise yüksek ve $Er \geq 320$ ise çok yüksek şeklinden sınıflandırılmaktadır (Devi ve Saroha., 2014; Alexakis, 2016).

Potansiyel ekolojik risk indeksi (RI), topraklardaki ağır metal konsantrasyonlarının neden olduğu ekolojik risk derecesinin değerlendirilmesi için kullanılan önemli ve geçerli bir indekstir (Devi ve Saroha, 2014). RI her bir metalin toplamını ifade etmektedir. Potansiyel ekolojik risk indeksi aşağıdaki formülle hesaplanmıştır:

$$\mathbf{RI} = \Sigma (Er) \quad (3.11)$$

**Σ (Er):** Metallerin potansiyel ekolojik risk indeksinin toplamı

Risk İndeksi (RI) dört grupta sınıflandırılmıştır. Bunlar; $RI < 50$ ise düşük risk; $100 > RI \geq 50$ ise orta risk; $200 > RI \geq 100$ ise önemli risk ve $RI \geq 200$ ise yüksek risk grubuna girmektedir (Devi ve Saroha, 2014).

Tez çalışması kapsamında alınan bitki örneklerinin fitoremidasyon potansiyellerini tespit etmek amacıyla Biyolojik Biriktirme Faktörü (BAF) uygulanmıştır. BAF, bitki organlarındaki metal konsantrasyonlarının topraktaki metal konsantrasyonuna oranı ile hesaplanmaktadır (Hussain vd., 2022). BAF değeri aşağıdaki formül ile hesaplanmaktadır:

$$\mathbf{BAF} = C_b / C_t \quad (3.12)$$

**$C_b$**: Bitki dokularındaki ağır metal konsantrasyonu

**$C_t$:** Topraktaki ağır metal konsantrasyonu

BAF değeri üç grupta sınıflandırılmıştır. BAF < 1 ise biriktirici değil; BAF = 1 ise bir etki yoktur ve BAF > 1 ise bitki biriktiricidir.

# DÖRDÜNCÜ BÖLÜM
# ARAŞTIRMA BULGULARI

## 4.1. Toprak örneklerinin fiziko-kimyasal özellikleri

Çalışma kapsamında doğal alan (DA) ve tarım (T) topraklarından alınan örneklerine ait pH, EC (µS/cm), kireç (%), organik madde (%) ve kum, kil, silt oranları Tablo 4 ve Tablo 5'te verilmiştir. Tablo 4 incelendiğinde, doğal alanlardan alınan toprakların pH değerleri 6,93 - 7,61 olarak tespit edilmiştir. Doğal alan topraklarının ortalama pH değeri 7,22 bulunmuştur. Soil Survey (2017)'e göre, bir adet örnek (DA1) hafif alkali sınıfta yer alırken diğer kontrol toprakları nötr sınıfta yer almıştır. Bu sonuçlar önceki çalışmalar ile uyumludur. Doğal alanlardan alınan toprakların EC değeri en düşük 144 µS/cm olurken en yüksek 606 µS/cm olmuştur. Örneklerin ortalama EC değeri 315,71 µS/cm dir. Analiz sonucuna göre kontrol topraklarının tuzluluk sorununun olmadığı görülmüştür (Soil Survey, 2017).

Tablo 4

Doğal alanlardan alınan toprak örneklerine ait fiziko-kimyasal özellikler

| Örnek | pH | EC (µS/cm) | %$CaCO_3$ | %OM | %Kil | %Silt | %Kum | Tekstür Sınıfı |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **DA1** | 7,61 | 144,0 | 0,00 | 3,70 | 24,66 | 20,62 | 54,72 | SCL |
| **DA2** | 7,16 | 272,0 | 0,07 | 5,15 | 14,33 | 30,87 | 54,80 | SL |
| **DA3** | 7,31 | 158,0 | 0,07 | 3,89 | 16,40 | 28,85 | 54,75 | SL |
| **DA4** | 6,93 | 451,0 | 0,00 | 16,64 | 14,57 | 20,94 | 64,49 | SL |
| **DA5** | 7,11 | 240,0 | 0,07 | 5,52 | 20,52 | 22,66 | 56,82 | SCL |
| **DA6** | 7,38 | 339,0 | 0,28 | 13,53 | 14,40 | 22,75 | 62,85 | SL |
| **DA7** | 7,05 | 606,0 | 0,00 | 18,38 | 31,97 | 25,65 | 42,38 | CL |
| **En düşük** | 6,93 | 144,00 | 0,00 | 3,70 | 14,33 | 20,62 | 42,38 | |
| **En yüksek** | 7,61 | 606,00 | 0,28 | 18,38 | 31,97 | 30,87 | 64,49 | |
| **Ortalama** | 7,22 | 315,71 | 0,07 | 9,54 | 19,55 | 24,62 | 55,83 | |
| **Standart Sapma** | 0,23 | 165,89 | 0,10 | 6,40 | 6,71 | 3,98 | 7,18 | |

C: Kil, L: Tın, S: Kum

Tablo 4'e göre toprakların %$CaCO_3$ içerikleri en düşük %0,00 en yüksek ise %0,28 bulunmuştur. Elde edilen sonuçlar Hızalan ve Ünal (1966)'a göre sınıflandırıldığında örneklerin tümü kireçsiz/az kireçli sınıfında yer almaktadır. Doğal alanlardan alınan toprakların % organik madde (OM) içeriği ortalama %9,54 ± 6,40 olarak tespit edilmiştir. Ulgen ve Yurtseven (1995) e göre tablo 4'te iki adet örneğin (DA1 ve DA3) iyi; beş örneğin

(DA2, DA4, DA5, DA6 ve DA7) ise yüksek organik madde içeriğine sahip olarak tanımlanmaktadır. Doğal alanlardan alınan toprak örnekleri (bir tanesi hariç) orman örtüsü altındadır. Örnekleme noktalarındaki bitki örtüsü ve yoğunluğu göz önünde bulundurulduğunda örneklerin organik madde miktarının yüksek olması beklenen bir sonuçtur.

Tablo 5

Tarım arazilerinden alınan topraklara ait fiziko-kimyasal özellikler

| Örnek | pH | EC (µS/cm) | %$CaCO_3$ | %OM | %Kil | %Silt | %Kum | Tekstür Sınıfı |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **T1** | 7,42 | 163,5 | 0,3 | 1,53 | 17,65 | 17,16 | 65,19 | SL |
| **T2** | 7,21 | 270,0 | 1,1 | 2,63 | 19,93 | 25,66 | 54,42 | SCL |
| **T3** | 7,26 | 302,0 | 0,3 | 2,73 | 19,80 | 25,49 | 54,72 | SCL |
| **T4** | 7,40 | 354,0 | 0,4 | 2,25 | 28,48 | 19,60 | 51,91 | SCL |
| **T5** | 7,48 | 237,0 | 0,8 | 1,16 | 28,25 | 36,06 | 35,68 | CL |
| **T6** | 7,42 | 242,0 | 1,4 | 1,13 | 26,39 | 13,32 | 60,29 | SCL |
| **T7** | 7,41 | 995,0 | 1,0 | 2,73 | 30,28 | 44,31 | 25,41 | CL |
| **T8** | 7,51 | 354,0 | 0,0 | 3,52 | 28,45 | 27,95 | 43,60 | CL |
| **T9** | 7,42 | 642,0 | 0,3 | 0,75 | 23,87 | 25,44 | 50,69 | SCL |
| **T10** | 7,59 | 178,1 | 0,8 | 1,55 | 14,79 | 19,85 | 65,36 | CL |
| **T11** | 7,40 | 756,0 | 11,1 | 2,10 | 14,72 | 19,76 | 65,52 | CL |
| **T12** | 7,71 | 294,0 | 11,0 | 2,11 | 16,71 | 19,72 | 63,57 | CL |
| **T13** | 7,41 | 272,0 | 0,2 | 3,49 | 30,08 | 14,20 | 55,72 | SCL |
| **T14** | 7,63 | 244,0 | 0,9 | 1,99 | 35,55 | 20,05 | 44,40 | CL |
| **T15** | 7,28 | 129,8 | 0,0 | 2,80 | 26,76 | 30,00 | 43,23 | L |
| **T16** | 7,32 | 91,7 | 0,0 | 1,83 | 23,42 | 26,50 | 50,08 | SCL |
| **T17** | 7,04 | 480,0 | 0,0 | 4,52 | 39,37 | 29,62 | 31,01 | CL |
| **T18** | 7,22 | 207,5 | 0,1 | 3,38 | 33,94 | 28,67 | 37,38 | CL |
| **T19** | 7,20 | 232,0 | 4,6 | 3,49 | 19,31 | 25,23 | 55,46 | SL |
| **T20** | 7,23 | 194,7 | 0,0 | 2,03 | 32,94 | 32,77 | 34,29 | CL |
| **T21** | 7,44 | 636 | 1,0 | 2,17 | 17,32 | 17,16 | 65,53 | SL |
| **T22** | 7,73 | 260 | 0,8 | 1,62 | 23,67 | 25,56 | 50,78 | SCL |
| **T23** | 7,44 | 180,9 | 0,2 | 4,41 | 23,76 | 33,90 | 42,34 | L |
| **T24** | 7,51 | 595 | 0,1 | 4,11 | 17,61 | 31,92 | 50,47 | L |
| **En düşük** | 7,04 | 91,70 | 0,0 | 0,75 | 14,72 | 13,32 | 25,41 | |
| **En yüksek** | 7,73 | 995,00 | 11,1 | 4,52 | 39,37 | 44,31 | 65,53 | |
| **Ortalama** | 7,40 | 346,30 | 1,5 | 2,50 | 24,71 | 25,41 | 49,88 | |
| **Standart Sapma** | 0,17 | 223,87 | 3,1 | 1,04 | 6,89 | 7,41 | 11,61 | |

C: Kil, L: Tın, S: Kum

Tarım arazilerinden alınan örneklerine ait pH değerleri incelendiğinde, en düşük pH değeri 7,04 olurken en yüksek değerin 7,73 olduğu tespit edilmiştir. Toprak örneklerinin pH

ortalama değeri 7,40 olmuştur. Toprak örneklerine ait pH değerleri Soil Survey (2017)'e göre değerlendirildiğinde 7 adet örneğin pH değeri nört; 17 adet örneğin pH değerinin ise hafif alkalin olduğu tespit edilmiştir. Tarım topraklarının EC değerleri 91,7 - 995,0 µS/cm arasında değişiklik gösterirken ortalama EC değeri 346,3 µS/cm olarak tespit edilmiştir (Tablo 5). Toprak örneklerine ait EC değerleri Soil Survey (2017)'e göre değerlendirildiğinde, tüm örneklerin tuzsuz olduğu belirlenmiştir. Toprak örneklerinin kireç ($CaCO_3$) içerikleri %0 - 11,10 olup örneklerin ortalama kireç içeriği %1,52 bulunmuştur. Toprak örneklerinin kireç içerikleri Hızalan ve Ünal (1966)'a göre sınıflandırıldığında, 17 adet örneğin az kireçli, 5 örneğin kireçli, 2 adet örneğin ise orta kireçli olduğu görülmüştür. Özellikle T11 ve 12 nolu örneklerde litolojiye uygun olmayan kireç içerikleri çevrede bulunan Akçansa çimento sanayi için çıkarılan kireçtaşı ocağında rüzgar yönüne bağlı olarak taşınan toz halindeki kireçten kaynaklanmaktadır. Örneklerin EC ve kireç içerikleri değerlendirildiğinde elde edilen sonuçların tarımsal açıdan tuzluluk ya da kireçlilik açısından bir problemi olmadığı tespit edilmiştir.

Toprak örneklerinin organik madde (OM) içeriği incelendiğinde, en düşük %0,75 olurken, en yüksek değer %4,52 olmuştur. Toprak örneklerinin ortalama OM içerikleri %2,50 olarak tespit edilmiştir (Tablo 5). Toprakların organik madde içerikleri Ulgen ve Yurtsever (1995)'e göre değerlendirildiğinde bir adet toprak örneğinin (T9) çok az organik madde içeriğine sahip olduğu görülmüştür. Yedi adet toprak örneğinin (T1, T5, T6, T10, T14, T16 ve T22) az; dokuz adet toprak örneğinin (T2, T3, T4, T7, T11, T12, T15, T20, T21) ise orta organik madde içeriğine sahip tespit edilmiştir. Dört adet tarım toprağı örneği (T8, T13, T18 ve T19) iyi organik madde içeriğine sahip olduğu bulunurken, üç adet örneğin (T17, T23 ve T24) yüksek organik madde içeriğine sahip olduğu bulunmuştur. Örnekleme noktaları ve organik madde içerikleri dikkate alındığında örneklerin organik maddesinin yüksek olmasının bu lokasyonlarda uygulanan ahır gübresinden kaynaklandığı düşünülmüştür.

### 4.2. Ağır Metal Analizlerinin Validasyonu

Tez çalışması kapsamında yapılan ağır metal analizlerinin doğruluğunu test etmek amacıyla standart referans maddeler kullanılmıştır. Bu amaçla ERM - CC141 (tınlı toprak), SRM - 1573a (domates yaprağı) ve BRC - 701 (göl sedimenti) standart referans maddeleri kullanılmıştır. Toprak ve bitki örneklerinin doğruluk testlerinde kullanılan standart referans maddelerin sertifika değerleri, çalışmada elde edilen sonuçlar ve %geri kazanımlar Tablo

6’da verilmiştir. Toprak örneklerinin toplam ağır metal konsantrasyonlarını belirlemek için yapılan yaş yakma yönteminin doğruluğunu test etmek için kullanılan ERM - CC141 standart referans maddesinin geri dönüşümleri %108,0 ile %90,3 arasında tespit edilmiştir. Bununla birlikte bitki örnekleri için kullanılan standart referans madde SRM - 1573a’nın geri dönüşümleri %32,6 ile 108,8 arasında bulunmuştur. Her iki analiz için elde edilen sonuçlar sertifika değerleri ile uyumlu bulunmuştur.

Tablo 6

ERM - CC141 ve SRM - 1573a sertifikalı referans maddelerin sertifika değerleri ve çalışmada bulunan değerler (µg/g) ve %geri kazanımlar, n=3

| **Metaller** | **ERM - CC141 (Tınlı toprak)** | | | **SRM - 1573a (Domates yaprağı)** | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | **Sertifika değeri** | **Belirlenen değer** | **%Geri kazanım** | **Sertifika değeri** | **Belirlenen değer** | **%Geri kazanım** |
| **Cd** | 0,25 ± 0,04 | 0,27 ± 0,06 | 108,0 | 1,52 ± 0,04 | 1,6 ± 0,12 | 105,3 |
| **Co** | 7,9 ± 0,9 | 8,17 ± 0,8 | 103,4 | 0,57 ± 0,02 | 0,62 ± 0,08 | 108,8 |
| **Cr** | 31,0 ± 4,0 | 30,91 ± 4,2 | 99,7 | 1,99 ± 0,06 | 2,14 ± 0,14 | 107,5 |
| **Cu** | 12,4 ± 0,9 | 11,2 ± 1,2 | 90,3 | 4,70 ± 0,14 | 4,45 ± 0,36 | 94,7 |
| **Ni** | 21,9 ± 1,6 | 23,01 ± 2,4 | 105,1 | 1,59 ± 0,07 | 1,65 ± 0,10 | 103,8 |
| **Pb** | 32,2 ± 1,4 | 34,23 ± 3,1 | 106,3 | - | - | - |
| **Zn** | 50,0 ± 4,0 | 51,17 ± 4,8 | 102,3 | 30,9 ± 0,7 | 28,6 ± 2,2 | 92,6 |

Toprakların jeokimyasal fraksiyonlarını belirlemek için kullanılan BCR ardışık ekstraksiyon yönteminin doğruluğunu test etmek için sertifikalı referans madde BCR - 701 (göl sedimenti) kullanılmıştır. Kullanılan referans maddeye ait sertifika değerleri, çalışmada elde edilen sonuçlar ve geri kazanımları Tablo 7’de sunulmuştur. Analiz sonucu elde edilen sonuçlar sertifika değeriyle karşılaştırıldığında asitte çözünebilir ($F_1$) fraksiyonunun geri kazanımı %90,3 ile 106,0 arasında tespit edilmiştir. İndirgenebilir fraksiyon ($F_2$) için geri kazanımı %93,7 - 105,3 olarak bulunmuştur. Oksitlenebilir fraksiyon ($F_3$) için ise geri kazanımı ise en düşük %88,9 en yüksek ise 109,1 tespit edilmiştir. Elde edilen bu sonuçlar sertifika değerleri ve literatür ile uyumlu bulunmuştur.

Tablo 7

BCR - 701 sertifikalı referans maddelesinin sertifika değerleri ve çalışmada bulunan değerler (µg/g) ve %geri kazanımlar, n=3

| Fraksiyon | Metaller | Sertifika değeri | Belirlenen değer | %Geri kazanım |
|---|---|---|---|---|
| Asitte çözünebilir (F1) | Cd | 7,34 ± 0,35 | 7,18 ± 0,43 | 97,8 |
| | Cr | 2,26 ± 0,16 | 2,08 ± 0,27 | 92,0 |
| | Cu | 49,3 ± 1,7 | 48,67 ± 3,8 | 98,7 |
| | Ni | 15,4 ± 0,9 | 16,33 ± 1,5 | 106,0 |
| | Pb | 3,18 ± 0,21 | 2,87 ± 0,32 | 90,3 |
| | Zn | 205 ± 6 | 208,7 ± 7,12 | 101,8 |
| İndirgenebilir (F2) | Cd | 3,77 ± 0,28 | 3,59 ± 0,41 | 95,2 |
| | Cr | 45,7 ± 2,0 | 42,82 ± 3,56 | 93,7 |
| | Cu | 124 ± 3 | 125,3 ± 7,2 | 101,0 |
| | Ni | 26,6 ± 1,3 | 28,02 ± 2,04 | 105,3 |
| | Pb | 126 ± 3 | 121,65 ± 8,18 | 96,5 |
| | Zn | 114 ± 5 | 110,49 ± 6,24 | 96,9 |
| Oksitlenebilir (F3) | Cd | 0,27 ± 0,06 | 0,24 ± 0,09 | 88,9 |
| | Cr | 143 ± 7 | 135,0 ± 9,1 | 94,4 |
| | Cu | 55,2 ± 4,0 | 52,29 ± 5,3 | 94,7 |
| | Ni | 15,3 ± 0,9 | 16,29 ± 1,14 | 106,5 |
| | Pb | 9,30 ± 2,0 | 10,02 ± 1,68 | 107,7 |
| | Zn | 45,7 ± 4,0 | 49,84 ± 5,08 | 109,1 |

### 4.3. Kayaç, Toprak ve Bitki Örneklerinin Toplam Ağır Metal İçerikleri

Tez çalışması kapsamında serpantin alanlarından alınan kayaç örneklerine ait toplam ağır metal konsantrasyonları Tablo 8'de verilmiştir. Ayrıca alınan kayaç örnekleri ultramafik kayaçlarla (Alloway, 2012) ve yerkabuğu ortalamaları (Kabata-Pendias, 2011) ile karşılaştırılmıştır (Tablo 8).

Çalışma kapsamında alınan kayaç örneklerinin Cd konsantrasyonları en düşük 0,75 µg/g olurken, en yüksek 0,94 µg/g olmuştur. Örneklerin ortalama Cd konsantrasyonu 0,86 ± 0,07 µg/g olarak tespit edilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde (Tablo 8) kayaç örneklerinin ortalama Cd konsantrasyonu ultramafik kayaçlar ve yerkabuğu için bildirilen değerlerin üzerinde olduğu görülmektedir. Kayaç örneklerinin Co konsantrasyonu 62,76 µg/g ile 145,14 µg/g arasında değişmekte olup ortalama 110,35 ± 27,57 µg/g olmuştur. Tablo 6 incelendiğinde, kayaç örneklerinin ortalama Co konsantrasyonu yerkabuğu ortalamasından

yüksek bulunmuştur. Bu sonuçlar Alloway (2012)'de ultramafik kayaçlar için bildirilen değerler ile uyumlu bulunmuştur.

Tablo 8

Kayaç örneklerinin toplam ağır metal konsantrasyonları (µg/g)

| Kayaç | Cd | Co | Cr | Cu | Ni | Pb | Zn |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **K 1** | 0,94 | 118,50 | 2017,50 | 17,29 | 2008,00 | 32,55 | 59,75 |
| **K 2** | 0,88 | 119,64 | 1616,50 | 16,14 | 2050,40 | 22,48 | 34,33 |
| **K 3** | 0,89 | 145,14 | 1618,50 | 18,90 | 2122,40 | 25,29 | 36,00 |
| **K 4** | 0,93 | 121,32 | 1603,50 | 17,27 | 2159,20 | 42,79 | 59,50 |
| **K 5** | 0,84 | 83,94 | 1747,00 | 14,42 | 1584,80 | 20,76 | 26,60 |
| **K 6** | 0,75 | 121,14 | 1532,50 | 8,71 | 2157,60 | 22,35 | 23,98 |
| **K 7** | 0,77 | 62,76 | 1591,00 | 36,78 | 1064,48 | 14,65 | 41,83 |
| **En düşük** | 0,75 | 62,76 | 1532,50 | 8,71 | 1064,48 | 14,65 | 23,98 |
| **En yüksek** | 0,94 | 145,14 | 2017,50 | 36,78 | 2159,20 | 42,79 | 59,75 |
| **Ortalama** | 0,86 | 110,35 | 1675,21 | 18,50 | 1878,13 | 25,84 | 40,28 |
| **Standart sapma** | 0,07 | 27,57 | 164,10 | 8,71 | 410,57 | 9,19 | 14,48 |
| **Ultramafik kayaçlar**[a] | 0,05 | 110 | 2300 | 40 | 2000 | 0,05 | 60 |
| **Yerkabuğu ortalaması**[b] | 0,1 | 10 | 100 | 55 | 20 | 15 | 70 |

a: Alloway (2012) b: Kabata-Pendias (2011)

Kayaç örneklerinin Cr konsantrasyonları en düşük 1532,50 µg/g; en yüksek ise 2017,50 µg/g bulunmuştur. Bununla birlikte kayaç örneklerinin ortalama Cr konsantrasyonu 1675,21 ± 164,10 µg/g olarak tespit edilmiştir. Bu değerler yer kabuğu ortalamasından oldukça yüksek olmasında rağmen Alloway (2012) tarafından bildirilen değerin altında olduğu görülmektedir. Kayaç örneklerinin Cu konsantrasyonları 8,71 - 36,78 µg/g arasında değişmektedir. Örneklerin ortalama Cu konsantrasyonu 18,50 ± 8,71 µg/g olmuştur. Elde edilen bu sonuç yerkabuğu ortalaması ve ultrmafik kayaçlar için bildirilen değerlerin altında bulunmuştur (Tablo 8).

Kayaç örneklerinin Ni konsantrasyonları 1064,48 µg/g ile 2159,20 µg/g arasında değişmekte olup, örneklerin ortalama Ni konsantrasyonu 1878,13 ± 410,57 µg/g olarak tespit edilmiştir. Kayaç örneklerinin (K5 ve K7 örnekleri hariç) Ni konsantrasyonları ortalaması ultramafik kayaçlar için bildirilen değerlerin üzerinde tespit edilmiştir. Bununla birlikte örneklerin ortalama konsantrasyonu yerkabuğu ortalamasından oldukça yüksek tespit edilmiştir. Kayaç örneklerinin Pb konsantrasyonlarının 14,65 µg/g ile 42,79 µg/g arasında değiştiği; bununla birlikte örneklerin ortalama Pb konsantrasyonunun 25,84 ± 9,19 µg/g olduğu görülmektedir (Tablo 8). Bu sonuçların ultramafik kayaçlar ve yerkabuğu ortalaması

için bildirilen değerlerden yüksek olduğu tespit edilmiştir. Kayaç örneklerinin Zn konsantrasyonları en düşük 23,98 µg/g olurken en yüksek 59,75 µg/g olmuştur. Örneklerin ortalama Zn konsantrasyonu 40,28 ± 14,48 µg/g olmuştur. Çalışmada elde edilen bu değer Alloway (2012) ve Kabata-Pendias (2011)'de bildirilen ultramafik kayaçlar ve yerkabuğu ortalaması değerlerinden düşük bulunmuştur.

Tez çalışması kapsamında doğal alanlardan (orman ve maki) alınan toprak örneklerinin toplam ağır metal konsantrasyonları Tablo 9'da verilmiştir. Elde edilen değerler dünya ortalaması ve yer kabuğu değerleri ile kıyaslanmıştır (Kabata-Pendias, 2011).

Tablo 9

Doğal alanlardan alınan toprakların toplam ağır metal konsantrasyonları (µg/g)

| Doğal Alan Toprağı | Cd | Co | Cr | Cu | Ni | Pb | Zn |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **DA 1** | 0,88 | 129,60 | 1430,10 | 18,76 | 1727,20 | 23,65 | 63,64 |
| **DA 2** | 0,89 | 92,40 | 768,15 | 20,99 | 1560,00 | 25,52 | 52,95 |
| **DA 3** | 0,85 | 86,35 | 896,85 | 19,65 | 1486,40 | 26,93 | 54,30 |
| **DA 4** | 0,78 | 91,10 | 874,80 | 20,67 | 1536,80 | 39,55 | 61,60 |
| **DA 5** | 0,86 | 100,80 | 851,15 | 29,11 | 1038,40 | 37,87 | 59,40 |
| **DA 6** | 0,70 | 87,80 | 1115,30 | 24,48 | 1274,40 | 36,10 | 82,01 |
| **DA 7** | 0,72 | 76,05 | 1185,95 | 21,24 | 1300,80 | 27,69 | 59,13 |
| **En küçük** | 0,70 | 76,05 | 768,15 | 18,76 | 1038,40 | 23,65 | 52,95 |
| **En büyük** | 0,89 | 129,60 | 1430,10 | 29,11 | 1727,20 | 39,55 | 82,01 |
| **Ortalama** | 0,81 | 94,87 | 1017,47 | 22,13 | 1417,71 | 31,04 | 61,86 |
| **Standart sapma** | 0,07 | 15,76 | 218,09 | 2,86 | 211,46 | 6,07 | 8,94 |
| **Dünya ortalaması**[a] | 0,41 | 11,3 | 59,5 | 38,9 | 29 | 27 | 70 |
| **Yerkabuğu ortalaması**[a] | 0,1 | 10 | 100 | 55 | 20 | 15 | 70 |

a: Dünya toprakları ortalaması ve yerkabuğu ortalama değerleri, Kabata-Pendias (2011)

Doğal alanlardan alınan topraklara ait toplam Cd konsantrasyonları 0,70 µg/g ile 0,84 µg/g arasında değişmekte olup, örneklerin ortalama Cd konsantrasyonu 0,81 ± 0,07 µg/g olarak tespit edilmiştir. Elde edilen bu sonuçlar dünya toprak ortalaması ve yerkabuğu ortalama değerlerinden yüksek bulunmuştur. Tablo 9 incelendiğinde, doğal alan topraklarının toplam Co konsantrasyonları en düşük 76,05 µg/g olurken; en yüksek 129,60 µg/g olarak bulunmuştur. Örneklerin ortalama toplam Co konsantrasyonu 94,87 ± 15,76 µg/g olarak tespit edilmiştir. Bu sonuçlar Kabata-Pendias (2011)'de bildirilen dünya toprak ortalaması ve yerkabuğu ortalama değerlerinden yüksek bulunmuştur. Doğal alanlardan alınan topraklara ait Cr konsantrasyonları 768,15 - 1430,10 µg/g; ortalama toplam Cr konsantrasyonu ise 1017,47 ± 218,09 µg/g olarak bulunmuştur. Örneklerin toplam Cr

konsantrasyonları dikkate alındığında elde edilen bu sonuçların dünya toprak ortalaması ve yerkabuğu ortalamasından yüksek olduğu tespit edilmiştir. Serpantin toprakların yüksek Co ve Cr konsantrasyonları ile karakterize edilği önceki çalışmalarda bildirilmiştir (Garnier vd., 2006; Kierczak vd., 2007; Hseu ve Lizuka, 2013; Kanellopoulos vd., 2015). Çalışmada elde edilen yüksek Co ve Cr konsantrasyonları beklenen bir sonuçtur.

Doğal alan topraklarının toplam Cu konsantrasyonları 18,76 µg/g ile 29,11 µg/g arasında değişmektedir. Örneklerin ortalama toplam Cu konsantrasyonu 22,13 ± 3,29 µg/g olarak tespit edilmiştir. Dünya ortalaması ve yerkabuğu ortalaması ile karşılaştırıldığında toprak örneklerinin Cu konsantrasyonları düşük bulunmuştur (Tablo 9). Tablo 9'a göre elde edilen bu sonuçlar dünya toprak ortalaması ve yerkabuğu ortalamasından düşük bulunmuştur. Tablo 9 incelendiğinde doğal alanlardan alınan toprak örneklerinin toplam Ni konsantrasyonları en düşük 1038,40 µg/g, en yüksek 1727,20 µg/g olduğu görülmektedir. Toprak örneklerinin ortalama toplam Ni konsantrasyonu 1417,71 ± 211,46 µg/g'dır. Çalışma sonucu elde edilen sonuçlar dünya toprak ortalaması ve yerkabuğu ortalamasından yüksektir. Elde edilen bu sonuç Ni elementinin serpantin toprakların jeolojisini yansıttığını göstermektedir.

Örneklerin toplam Pb konsantrasyonları 23,65 - 36,95 µg/g bulunmuştur. Bununla birlikte ortalama toplam Pb konsantrasyonu 31,04 ± 6,07 µg/g olarak tespit edilmiştir. Örneklerin toplam Zn konsantrasyonları 52,95 - 82,01 µg/g olurken ortalama toplam Zn konsantrasyonu 61,86 ± 8,94 µg/g olmuştur. Elde edilen sonuçlar Kabata-Pendias (2011) tarafından bildirilen dünya toprak ortalaması ve yerkabuğu ortalaması ile karşılaştırıldığında, Pb'nin yüksek; Zn elementinin ise düşük olduğu belirlenmiştir.

Serpantinler üzerinde oluşmuş tarım alanlarından alınan toprak örneklerine ait toplam ağır metal konsantrasyonları Tablo 10'da sunulmuştur. Tarım alanlarından alınan toprak örnekleri tarım toprakları için genel yaygın değerler (Alloway, 2012) ve tarım toprakları için izin verilen maksimum konsantrasyonlar (Kabata-Pendias, 2011) ile karşılaştırılmıştır (Tablo 8).

Tablo 10

Tarım topraklarına ait toplam ağır metal konsantrasyonları (μg/g)

| Örnek | Cd | Co | Cr | Cu | Ni | Pb | Zn |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **T1** | 0,84 | 47,58 | 543,66 | 28,94 | 508,72 | 27,75 | 56,16 |
| **T2** | 1,10 | 72,60 | 871,00 | 27,49 | 905,60 | 26,94 | 61,05 |
| **T3** | 1,02 | 74,30 | 745,55 | 27,46 | 1020,80 | 27,31 | 53,21 |
| **T4** | 0,90 | 44,81 | 517,17 | 43,44 | 439,92 | 41,35 | 74,03 |
| **T5** | 0,86 | 20,57 | 465,62 | 36,83 | 125,36 | 39,05 | 66,61 |
| **T6** | 0,84 | 23,12 | 456,60 | 35,18 | 147,36 | 49,60 | 62,81 |
| **T7** | 0,85 | 38,17 | 483,05 | 51,76 | 239,76 | 37,64 | 103,95 |
| **T8** | 1,11 | 93,95 | 1764,75 | 29,70 | 842,64 | 23,06 | 66,77 |
| **T9** | 0,40 | 20,09 | 466,08 | 39,24 | 151,47 | 28,31 | 70,13 |
| **T10** | 0,39 | 16,44 | 424,67 | 30,51 | 128,65 | 26,74 | 55,02 |
| **T11** | 0,85 | 33,11 | 567,97 | 33,66 | 280,40 | 20,51 | 70,90 |
| **T12** | 0,83 | 29,00 | 506,87 | 31,54 | 242,40 | 19,21 | 64,21 |
| **T13** | 1,16 | 117,30 | 1940,90 | 28,45 | 1352,80 | 25,66 | 67,16 |
| **T14** | 1,09 | 60,20 | 720,20 | 37,89 | 675,20 | 36,31 | 82,56 |
| **T15** | 1,01 | 207,25 | 2895,75 | 29,51 | 1815,20 | 27,63 | 65,34 |
| **T16** | 0,82 | 22,23 | 769,35 | 58,87 | 217,84 | 13,75 | 59,15 |
| **T17** | 1,39 | 193,15 | 1671,80 | 35,27 | 2948,80 | 26,88 | 62,21 |
| **T18** | 0,83 | 86,60 | 1304,55 | 39,46 | 1081,60 | 30,48 | 69,80 |
| **T19** | 0,77 | 41,63 | 858,55 | 53,82 | 355,04 | 24,85 | 57,53 |
| **T20** | 1,20 | 93,56 | 1510,60 | 36,61 | 2037,60 | 23,58 | 64,24 |
| **T21** | 0,79 | 12,58 | 760,41 | 31,76 | 722,88 | 27,26 | 63,75 |
| **T22** | 0,77 | 28,35 | 792,05 | 38,23 | 1008,72 | 39,60 | 77,00 |
| **T23** | 1,18 | 99,60 | 1226,45 | 23,24 | 1728,80 | 31,14 | 68,64 |
| **T24** | 0,87 | 56,80 | 821,70 | 30,40 | 1252,80 | 33,30 | 67,32 |
| **En düşük** | 0,39 | 12,58 | 424,67 | 23,24 | 125,36 | 13,75 | 53,21 |
| **En yüksek** | 1,39 | 207,25 | 2895,75 | 58,87 | 2948,80 | 49,60 | 103,95 |
| **Ortalama** | 0,91 | 63,87 | 961,89 | 35,93 | 842,93 | 29,49 | 67,06 |
| **Standart Sapma** | 0,22 | 50,51 | 598,12 | 8,64 | 710,44 | 7,79 | 10,21 |
| **Tarım Toprakları[a]** | 0,2-1,0 | 10 | 70-100 | 20-30 | 50 | 10-30 | 50 |
| **MAC[b]** | 1-5 | 20-50 | 50-200 | 60-150 | 20-60 | 20-300 | 100-300 |

a:Tarım toprakları için genel yaygın değerler (Alloway,1990), b: Tarım toprakları için izin verilen maksimum konsantrasyonlar (MAC), Kabata-Pendias (2011),

Tablo 10 incelendiğinde tarım topraklarının toplam Cd konsantrasyonları 0,39 - 1,39 μg/g aralığında ve ortalama 0,91 ± 0,22 μg/g olduğu tespit edilmiştir. Tarım topraklarının Cd içeriklerinin doğal alanlara göre az da olsa yüksek, tarım toprakları için genel yaygın değere yakın olduğu görülmüştür (Tablo 9, Tablo 10). Ayrıca elde edilen Cd değerlerinin izin verilebilir maksimum değeri aşmadığı Tablo 10'da görülmüştür. Ancak bazı noktalarda Cd'nin 1,0 μg/g'ın üzerine çıktığı tespit edilmiştir (Tablo 10). Tüm sonuçlar

değerlendirildiğinde, tarımsal faaliyetler sonucu bir miktar Cd'un ortama dahil olduğu kanısına varılmıştır.

Tarım topraklarının toplam Co konsantrasyonu 12,58 µg/g - 207,25 µg/g arasında tespit edilmiştir. Örneklerin ortalama toplam Co konsantrasyonu 63,87 ± 50,51 µg/g olmuştur. Tarım topraklarının ortalama Co konsantrasyonları kayaç örnekleri ve doğal alanlardan alınan toprak örneklerinden daha düşük bulunmuştur. Örneklerin ortalama Co konsantrasyonları tarım toprakları için genel yaygın değerlerden ve MAC değerinden daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Serpantin üzerinde oluşmuş toprakların Cr ve Ni ile Co değerlerininde oldukça yüksek olduğu birçok çalışmada rapor edilmiş (Miranda, 2009; Ho vd., 2013; Alexander, 2014) olup çalışmada elde edilen yüksek Co konsantrasyonları beklenen bir sonuçtur. Örnek noktaları dikkate alındığında bütün örneklerin tarım toprakları için yaygın değerlerin üzerinde olduğu ancak bazı örnek noktalarının MAC üst değeri olan 50 µg/g'ı geçmediği görülmüştür.

Tarım topraklarının toplam Cr konsantrasyonları en düşük 424,67 µg/g olurken en yüksek 2895,75 µg/g olmuştur. Ortalama toplam Cr konsantrasyonu 961,89 ± 598,12 µg/g bulunmuştur. Tarım topraklarının Cr içerikleri tarım toprakları için genel yaygın değerin ve izin verilebilir maksimum konsantrasyonların üzerinde olduğu tespit edilmiştir (Tablo 10). Bu sonuç çalışma alanı topraklarının serpantin topraklar olduğu için beklenen bir sonuçtur. Diğer taraftan tarım alanlarının ortalama Cr içeriklerinin, doğal alanlardan alınan toprak örnekleri ve kayaç örneklerinin ortalamarından daha düşük olduğu görülmüş ancak T15 numaralı örneğin hem kayaç hem de doğal alanlardan alınan toprak örneklerinden daha yüksek olduğu görülmüştür (Şekil 7). Bu sonucun örnekleme noktasının morfolojik olarak etek düzünde konumlanması ve yüksek arazilerden eğimin etkisiyle taşınan çeşitli malzemenin bu alanda birikmesiyle ilişkili olabileceği kanısına varılmıştır.

Tarım topraklarının toplam Cu konsantrasyonu 23,24 µg/g ile 58,87 µg/g değişiklik göstermiştir. Örneklerin ortalama toplam Cu konsantrasyonu 35,93 ± 8,64 µg/g olmuştur. Tarım topraklarının ortalama Cu içerikleri kayaç örnekleri ve doğal alanlardan alınan toprak örneklerinden yüksek tespit edilmiştir (Tablo 8, Tablo 9 ve Tablo 10). Örneklerin Cu konsantrasyonlarının tarım toprakları için genel yaygın değerlerden yüksek olduğu ancak tarım toprakları için maksimum izin verilen konsantrasyonları aşmadığı görülmüştür (Tablo 10). Gerek kayaç gerek doğal alanlardan alınan topraklardan ve gerekse tarım toprakları için

yaygın olan değerlerden daha yüksek olması Cu'nun tarım topraklarında zenginleştiğini işaret etmektedir. Bu durumun tarımsal faaliyetlerden kaynaklandığı düşünülmüştür.

Tarım topraklarının toplam Ni konsantrasyonları 125,36 - 2948,80 µg/g aralığında ve ortalama Ni konsantrasyonu 842,93 ± 710,44 µg/g olarak bulunmuştur. Örneklerin ortalama Ni konsantrasyonları değerlendirildiğinde beklendiği gibi kayaç ve doğal alanlardan alınan örneklere göre daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Tüm örneklerin Ni konsantrasyonları tarım toprakları için genel yaygın değerlerden ve izin verilen maksimum konsantrasyonlardan daha yüksek olduğu görülmüştür. Bu durumun serpantin kayaç ve toprakların içerdiği yüksek Ni'den kaynaklandığı açık bir şekilde anlaşılmıştır. Ancak kayaç ve doğal alanlardan alınan toprak örneklerine göre tarım topraklarının Ni içeriklerinin daha geniş bir aralığa sahip olduğu ve bu durumun bazı noktalarda morfolojiye bağlı olarak birikim sergilediği bazı noktalarda ise tarımsal faaliyetlere bağlı olarak yıkanma ve Ni'in bitki tarafından alınması ile ilgili olduğu düşünülmüştür.

Tarım topraklarının toplam Pb konsantrasyonlarının 13,75 µg/g ile 49,60 µg/g aralığında ve ortalama 29,49 ± 7,79 µg/g olduğu belirlenmiştir (Tablo 10). Tarım topraklarının ortalama Pb konsantrasyonu kayaç ve doğal alan örneklerine göre daha düşük bulunmuştur. Örneklerin Pb konsantrasyonları ortalaması tarım toprakları için yaygın değerlerin üst sınırına oldukça yakın olduğu ancak tarım toprakları için izin verilen maksimum konsantrasyonu aşmadığı görülmüştür (Tablo 10). Ancak örnek noktalarından bazılarının Pb konsantrasyonunun tarım toprakları için genel yaygın değer üst sınırını aştığı tespit edilmiştir. Bu durumun örnek noktalarının karayoluna yakın olmasından kaynaklandığı kanısına varılmıştır (Şekil 6).

Tarım topraklarının toplam Zn konsantrasyonları en düşük 53,21 µg/g, en yüksek ise 103,95 µg/g bulunmuştur. Örneklerin ortalama toplam Zn konsantrasyonu 67,06 ± 10,21 µg/g olmuştur (Tablo 10). Tarım topraklarının Zn konsantrasyonları Alloway (1990) tarafından bildirilen tarım toprakları için genel yaygın değerlerden yüksek tespit edilirken Kabata- Pendias (2011) tarafından bildirilen tarım toprakları için izin verilen maksimum konsantrasyonlar içinde kalmıştır. Örneklerin Zn konsantrasyonlarının hem kayaç hem de doğal alanlardan alınan toprak örneklerinden yüksek olması Zn'nin tarım topraklarında zenginleştiğine işaret etmektedir. Bu durumun tarımsal faaliyetlerden kaynaklandığı düşünülmüştür.

Ultramafik kayaçların mineral bileşimi ve toprak oluşum süreçlerine bağlı olarak serpantin topraklarının ağır metal konsantrasyonlarının geniş konsantrasyon aralıklarında olduğu ortaya çıkmaktadır. Serpantin topraklar Co, Cr, Mn ve Ni gibi potansiyel olarak toksik metallerin yüksek seviyeleri nedeniyle genellikle ekolojik veya çevresel risk oluşturmaktadır. Diğer kayaçlarla karşılaştırıldığında, ultramafik kayaçlar Co, Cr ve Ni bakımından daha zengindir. Tez çalışması kapsamında elde edilen sonuçlara göre de bu durum gözlemlenmiştir. Tablo 10'a göre toprakların Co konsantrasyonu 63,84 ± 51,60 µg/g, ortalama toplam Cr konsantrasyonu 779,59 ± 702,22 µg/g ve ortalama toplam Ni konsantrasyonu 1080,42 ± 960,68 µg/g olarak tespit edilmiştir. Kierczak ve ark (2021) tüm dünyada yapılmış olan yayınlardaki verileri derledikleri çalışmalarında, analiz edilen 400'den fazla örneğin sadece 5 tanesinin Ni konsantrasyonunun 112 mg/kg'dan düşük olduğu bulunmuştur. Yine aynı çalışmadaki toprak örneklerinin ortalama Ni konsantrasyonunun 1993 mg/kg olduğu belirtilmiştir. Bununla birlikte ortalama Cr konsantrasyonunun 2573 mg/kg; Co konsantrasyonunun ise 118 mg/kg olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca ülkemiz serpantin alanlarında yapılan çalışmalara göre toprakların Co konsantrasyonu 0,8 ile 166 mg/kg, Cr konsantrasyonu 0,147 ile 1895 mg/kg ve Ni konsantrasyonu 6,80 ile 3932 mg/kg arasında değişiklik gösterdiği tespit edilmiştir (Altınözlü vd., 2012; Ünver vd., 2013; Uner vd., 2014; Sağlam, 2017; Taş, 2018, Özbey, 2019; Oğuzhan, 2019, Kılıç, 2019; Kara, 2019; Özcan vd., 2022).

Tez çalışması kapsamında alınan bitki örneklerinin ağır metal konsantrasyonları Tablo 12'de verilmiştir. Ayrıca bitki örnekleri Kabata-Pendias (2011)'de bildirilen bitki yapraklarında ağır metallerin genelleştirilmiş konsantrasyonları ile karşılaştırılmıştır (Tablo 11).

Tablo 11

Bitki Yapraklarında Ağır metallerin Genelleştirilmiş Konsantrasyonları (µg/g)

| Element | Yeterli veya Normal Değer | Aşırı veya Toksik Değer | Tarımsal Ürünlerde Tolere Edilebilir Değer |
|---|---|---|---|
| **Cd** | 0,05 - 0,2 | 5 - 30 | 0,05 - 0,5 |
| **Co** | 0,02 - 1 | 15 - 50 | 5 |
| **Cr** | 0,1 - 0,5 | 5 - 30 | 2 |
| **Cu** | 5 - 30 | 20 - 100 | 5 - 20 |
| **Ni** | 0,1 - 5 | 10 - 100 | 1 - 10 |
| **Pb** | 5 - 10 | 30 - 300 | 0,5 - 10 |
| **Zn** | 27 -150 | 100 - 400 | 50 - 100 |

Tablo 12

Bitki örneklerine ait toplam ağır metal konsantrasyonları (μg/g)

| Örnek No* | Bitki | Cd | Co | Cr | Cu | Ni | Pb | Zn |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **1** | **Buğday** | 0,25 | 0,15 | 0,34 | 3,96 | 3,00 | 0,15 | 12,52 |
| **2** | **Buğday** | 0,26 | 0,12 | 0,88 | 6,08 | 4,52 | 0,12 | 16,05 |
| **3** | **Buğday** | 0,26 | 0,12 | 1,38 | 4,74 | 3,16 | 0,12 | 13,67 |
| **4** | **Kapya biber** | 0,58 | 0,27 | 3,49 | 30,25 | 32,95 | 0,27 | 90,28 |
| **5** | **Yonca** | 0,37 | 0,31 | 1,43 | 11,64 | 8,41 | 0,31 | 39,33 |
| **6** | **Yonca** | 0,31 | 0,20 | 2,30 | 8,93 | 15,43 | 0,20 | 23,75 |
| **7** | **Buğday** | 0,30 | 0,24 | 1,38 | 6,28 | 2,63 | 0,24 | 18,45 |
| **8** | **Zeytin** | 0,25 | 0,12 | 1,20 | 4,92 | 12,35 | 0,12 | 13,29 |
| **9** | **Kapya biber** | 0,60 | 0,29 | 3,33 | 11,87 | 6,77 | 0,29 | 58,23 |
| **10** | **Zeytin** | 0,24 | 0,14 | 1,25 | 5,26 | 6,01 | 0,14 | 13,02 |
| **11** | **Kapya biber** | 0,52 | 0,36 | 5,93 | 11,67 | 12,29 | 0,36 | 58,20 |
| **12** | **Kapya biber** | 0,49 | 0,28 | 3,85 | 6,68 | 10,14 | 0,28 | 55,78 |
| **13** | **Buğday** | 0,29 | 0,16 | 0,49 | 5,09 | 3,55 | 0,16 | 15,17 |
| **15** | **Buğday** | 0,26 | 0,12 | 0,73 | 7,97 | 3,35 | 0,12 | 19,11 |
| **17** | **Buğday** | 0,21 | 0,17 | 0,98 | 5,02 | 5,57 | 0,17 | 16,50 |
| **18** | **Zeytin** | 0,26 | 0,20 | 1,53 | 4,32 | 18,91 | 0,20 | 13,98 |
| **19** | **Zeytin** | 0,23 | 0,17 | 0,84 | 5,89 | 4,65 | 0,17 | 16,08 |
| **20** | **Zeytin** | 0,23 | 0,20 | 1,69 | 12,69 | 22,94 | 0,20 | 10,93 |
| **21** | **Kapya biber** | 0,71 | 0,36 | 4,01 | 6,96 | 8,36 | 0,36 | 55,95 |
| **22** | **Buğday** | 0,26 | 0,17 | 2,67 | 5,12 | 4,56 | 0,17 | 14,75 |
| **23** | **Zeytin** | 0,21 | 0,21 | 2,99 | 4,14 | 20,55 | 0,21 | 12,91 |
| **24** | **Kapya biber** | 0,51 | 0,41 | 3,02 | 10,32 | 27,17 | 0,41 | 59,78 |
| **En düşük** | | 0,21 | 0,12 | 0,34 | 3,96 | 2,63 | 0,12 | 10,93 |
| **En yüksek** | | 0,71 | 0,41 | 5,93 | 30,25 | 32,95 | 0,41 | 90,28 |
| **Ortalama** | | 0,35 | 0,22 | 2,08 | 8,17 | 10,78 | 0,22 | 29,44 |
| **Standart sapma** | | 0,15 | 0,09 | 1,42 | 5,68 | 8,68 | 0,09 | 22,78 |

*Örnek numaraları tarım arazilerinden alınan toprak örneklerini temsil etmektedir.

Yaprak örneklerine ait metallerin ortalama değerleri göz önüne alındığında, genel olarak ortalama Cr ve Ni miktarlarının tolere edilebilir miktarın üst sınırında olduğu görülmüştür. Bu sonuç serpantin üzerinde oluşmuş tarım topraklarında bitkilerin Cr ve Ni bakımından takip edilmesinin önemli olabileceği kanısına varılmıştır. Benzer şekilde Fernandez vd., (1999), İspanya'nın kuzeybatısındaki serpantin topraklarda yetişen bazı tarımsal ürünlerin (örn. şeker pancarı, lahana, mera) yapraklarının, topraklarda EDTA ile ekstrakte edilebilir miktarların düşük ila orta düzeyde olmasına rağmen, sadece önemli miktarda Ni değil, aynı zamanda Cr da biriktirebildiğini tespit etmiştir. Aziz vd., (2015) yaptıkları çalışmada, tarım topraklarındaki ağır metal kirliliğinin çeltik kökleri ve sürgünlerindeki ağır metal konsantrasyonlarını önemli ölçüde artırdığı tespit etmiştir. Susaya

vd., (2010) Filipinlerde yaptıkları çalışmada bitkilerin Ni içeriklerini belirlemişlerdir. Buna göre karpuz, domates ve patlıcanın Ni konsantrasyonlarını sırasıyla; 28,0, 7,00 ve 5,37 mg/kg olarak tespit etmiştir.

Bu çalışmada örneklenen bütün bitki türleri (buğday, kapya biber, yonca ve zeytin) göz önüne alınarak her bir bitki için elde edilen metallerin ortalama konsantrasyonları Tablo 13'te sunulmuştur.

Tablo 13

Bitki çeşidine göre toplam ağır metal konsantrasyonları (µg/g)

| Bitki | Cd | Co | Cr | Cu | Ni | Pb | Zn |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Buğday (n=8)** | 0,26 ± 0,03 | 0,16 ± 0,04 | 0,87 ± 0,73 | 5,53 ± 1,23 | 3,79 ± 0,99 | 0,16 ± 0,04 | 15,78 ± 2,25 |
| **Kapya Biber (n=6)** | 0,57 ± 0,08 | 0,33 ± 0,05 | 3,94 ± 1,04 | 12,96 ± 8,77 | 16,28 ± 10,99 | 0,33 ± 0,05 | 63,03 ± 13,43 |
| **Yonca (n=2)** | 0,34 ± 0,05 | 0,25 ± 0,08 | 1,87 ± 0,62 | 10,29 ± 1,92 | 11,92 ± 4,96 | 0,25 ± 0,08 | 31,54 ± 11,02 |
| **Zeytin (n=6)** | 0,24 ± 0,02 | 0,17 ± 0,04 | 1,58 ± 0,75 | 6,20 ± 3,24 | 14,24 ± 7,75 | 0,17 ± 0,04 | 13,37 ± 1,67 |

Tez çalışması kapsamında alınan bitki örneklerinin ortalama Cd konsantrasyonları göz önüne alındığında kapya biber > yonca > zeytin > buğday sıralamasını izlediği görülmüştür (Tablo 13). Buğday, yonca ve zeytin bitkisinden alınan yaprakların ortalama Cd konsantrasyonu sırasıyla 0,26 ± 0,03, 0,34 ± 0,05 ve 0,24 ± 0,02 µg/g ile bitki yapraklarında tolere edilebilir miktarlar arasında kaldığı belirlenmiştir (Tablo 13). Diğer yandan kapya biber örneklerinin Cd konsantrasyonu 0,57 ± 0,08 µg/g ortalaması ile tolere edilebilir miktarların üzerinde bulunmuştur (Tablo 13).

Bitkilerin ortalama Co konsantrasyonları kapya biber > yonca > zeytin > buğday sıralamasını izlemiştir. Buğday, kapya biber, yonca ve zeytin bitkilerinin Co konsantrasyonları sırasıyla 0,16 ± 0,04, 0,33 ± 0,05, 0,25 ± 0,08 ve 0,17 ± 0,04 µg/g olarak tespit edilmiştir. Bitkilerin Co konsantrasyonları Kabata-Pendias (2011) tarafından bildirilen tarımsal ürünlerde tolere edilebilir miktardan düşük bulunmuştur (Tablo 13).

Bitkilerin ortalama Cr konsantrasyonları kapya biber > yonca > zeytin > buğday sıralamasını izlemiştir. Buğday bitkilerinin ortalama Cr konsantrasyonu 1,11 ± 0,73 µg/g bulunmuştur. Kapya biber bitkilerinin ortalama Cr konsantrasyonu 3,94 ± 1,04 µg/g olarak tespit edilmiştir. Yonca ve zeytin bitkilerinin ortalama Cr konsantrayonları 1,87 ± 0,62 ve 1,58 ± 0,04 µg/g olmuştur. Kapya biber bitkisinin Cr konsantrasyonu tarımsal ürünlerde

tolere edilebilir değerin üstünde bulunurken, buğday, yonca ve zeytin bitkilerininki düşük bulunmuştur (Tablo 13).

Bitki örneklerinin Cu konsantrasyonları kapya biber > yonca > zeytin > buğday olarak sıralanmıştır. Tablo 13 incelendiğinde, buğday, kapya biber, yonca ve zeytin bitkilerinin ortalama Cu konsantrasyonu sırasıyla 5,53 ± 1,23, 12,96 ± 8,77, 10,29 ± 1,92 ve 6,20 ± 3,24 μg/g tespit edilmiştir. Elde edilen bu sonuçların, tüm bitki çeşitleri için, Kabata-Pendias (2011)'de bildirilen tolere ebilebilir konsantrasyonlarını aşmadığı görülmüştür (Tablo 13).

Bitkilerin Ni konsantrasyonları kapya biber > zeytin > yonca > buğday sıralamasını izlemiştir. Buğday bitkilerinden alınan yaprak örneklerinin ortalama Ni konsantrasyonu 3,79± 0,99 μg/g bulunmuştur. Kapya biber, yonca ve zeytin bitkilerinin ortalama Ni konsantrasyonları sırasıyla 16,28 ± 10,99, 11,92 ± 4,96 ve 14,24 ± 7,75 μg/g ile tolere edilebilir konsantrasyonların üstünde tespit edilmiştir (Tablo 13).

Bitkilerin Pb konsantrasyonları kapya biber > yonca > zeytin > buğday sıralamasını izlemiştir. Buğday bitkilerinin ortalama Pb konsantrasyonu 0,16 ± 0,04; kapya biber bitkilerinin ortalama Pb konsantrasyonu 0,33 ± 0,05; yonca bitkilerinin ortalama Pb konsantrasyonu 0,25 ± 0,08 ve zeytin bitkilerinin Pb konsantrasyonu ise 0,17 ± 0,04 μg/g bulunmuştur. Çalışmada elde edilen sonuçlar Pb elementi için tolere edilebilir olan konsantrasyonlardan düşük tespit edilmiştir (Tablo 13).

Bitkilerin Zn konsantrasyonları kapya biber > yonca > buğday > zeytin sıralamasını izlemiştir. Buğday yonca ve zeytin bitkilerine ait ortalama Zn konsantrasyonları 15,78 ± 2,25, 31,54 ± 11,02 μg/g ve 13,37 ± 1,67 μg/g olarak tespit edilmiş olup bu sonuç bitkiler için tolere edilebilir miktarlardan düşük bulunmuştur. Kapya biber bitkisine ait ait ortalama Zn konsantrasyonları 63,03 ± 13,43 μg/g olarak bulunmuş ve bu sonuçlar Kabata-Pendias (2011)'de bildirilen bitkiler için tolere edilebilir değerler aralığında tespit edilmiştir (Tablo 11). Bütün sonuçlar değerlendirildiğinde tüm metaller için kapya biberin diğer bitkilere göre daha yüksek metal içeriğine sahip olduğu görülmüştür. Dolayısıyla kapya biber üretimi yapılan alanların izlenmesi ve daha detaylı çalışmaların yapılması gerektiği düşünülmüştür.

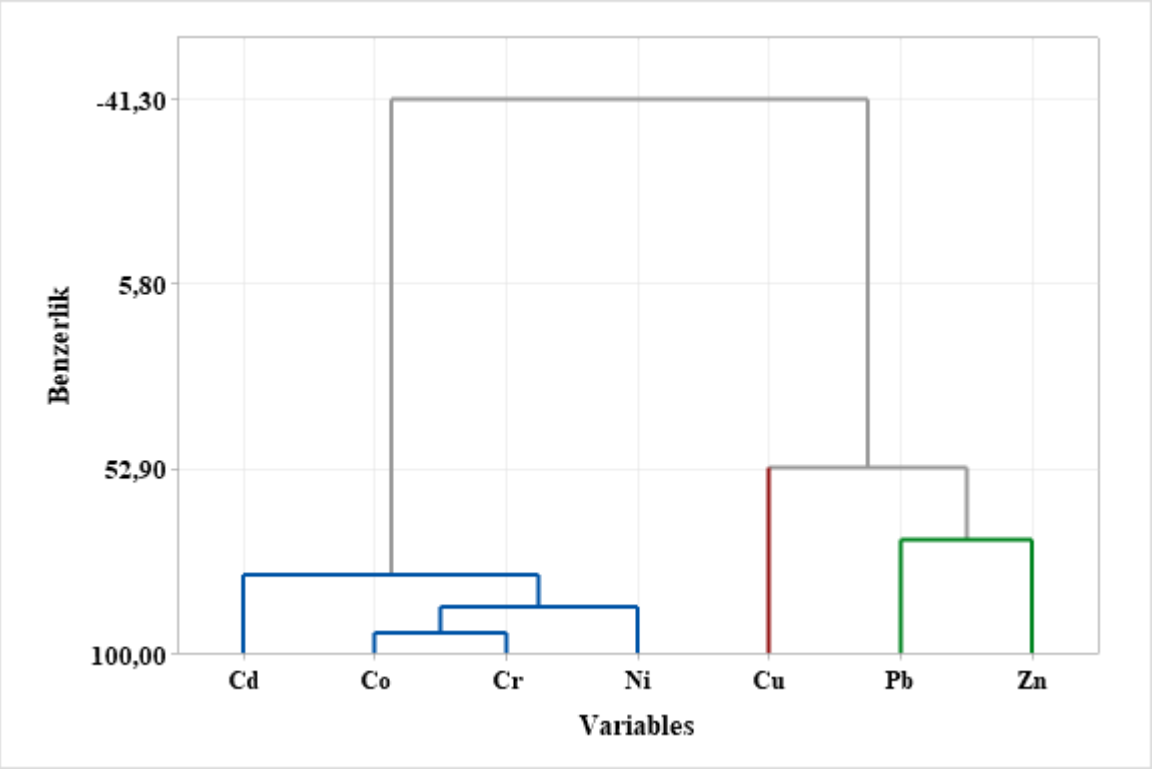
### 4.3. Ağır Metal Kaynakları

Tez çalışması kapsamında ağır metallerin kaynaklarını belirlemek amacıyla hiyerarşik kümeleme analizi ve faktör analizi kullanılmıştır. Faktör analizine göre üç faktör toplam varyansın %84,2'sini açıklamıştır (Tablo 14). Bununla birlikte Cd, Co, Cr ve Ni Faktör 1'i oluşmuştur ve bu toplam varyansın %46,9'unu açıklamıştır. Pb ve Zn Faktör 2'yi oluştururken Cu Faktör 3'ü oluşturmuştur. Faktör 2 toplam varyansın %20,1'ini açıklarken Faktör 3 ise toplam varyansın %17,2'sini oluşturmuştur. Faktör analizi ağır metal kaynakları için 3 kaynak ortaya çıkarmıştır. Aynı şekilde kaynak belirleme için verilere hiyerarşik kümeleme analizi uygulanmış ve yine benzer sonuçlar elde edilmiştir (Şekil 12).

Tablo 14

Toplam ağır metallere ait faktör analizi sonuçları

| | **Faktör 1** | **Faktör 2** | **Faktör 3** | **Ortak Varyans** |
|---|---|---|---|---|
| **%Varyans** | %46,9 | %20,1 | %17,2 | %84,2 |
| **Cd** | 0,838 | 0,088 | -0,084 | 0,716 |
| **Co** | 0,949 | -0,082 | -0,119 | 0,921 |
| **Cr** | 0,881 | -0,199 | -0,044 | 0,817 |
| **Cu** | -0,236 | -0,028 | 0,911 | 0,886 |
| **Ni** | 0,907 | -0,043 | -0,179 | 0,856 |
| **Pb** | -0,147 | 0,905 | -0,160 | 0,866 |
| **Zn** | 0,059 | 0,728 | 0,540 | 0,825 |




Şekil 12. Toplam ağır metallere ait hiyerarşik kümeleme dendogramı

Elde edilen sonuçlar Cd, Co, Cr ve Ni'in benzer davranışlar sergileyerek bir grup; Pb ve Zn'nin bir ve Cu'nun Pb ve Zn ile her ne kadar benzer davranışlar sergilese de biraz farklılaştığı görülmüştür (Şekil 12). Bu durum benzer davranışlara sahip kümelerin farklı kökenleri olduğunu göstermiştir. Faktör analizi ve hiyerarşik kümeleme analizi birbirini desteklemiş ve Cd, Co, Cr ve Ni elementlerinin litolojik etkilerle, Pb ve Zn elementlerinin antroponejik ve litolojik etkilerle; Cu elementinin ise antropojenik kaynakların biraz daha baskın olduğu hem litolojik hem antropojenik etkilerle topraklarda zenginleştiği sonucuna varılmıştır. Pb elementinin litolojinin yanı sıra tarımsal girdiler ve emisyonlarla (özellikle yola yakın lokasyonlarda) ortama dahil olduğu, Zn elementinin litoloji ile tarımsal girdilerin etkisi ile ortamda bulunduğu düşünülmüştür. Diğer yandan Cu elementinin litoloji ile tarımsal girdilerin etkisini taşıdığı anlaşılmış olup özellikle bitki koruma ürünlerinin yoğun kullanımı sonucu biraz daha farklılaştığı sonucuna varılmıştır. Tarımsal üretimde oldukça sık ve yaygın kullanılan bordo bulamacı önemli bir Cu kaynağıdır (Sungur vd., 2023). Girotto vd., (2014) fungal yaprak hastalıklarının önlenmesi ve kontrolü için asma bitkilerinin bakır bazlı fungisitlerle tekrarlı uygulamasının, üst toprakta Cu birikimine yol açtığını bildirmiştir. Nitekim bu durum toprak örneklemesi yapılan tarım dışı alanlarla tarım alanlarından alınan toprak örneklerinin ağır metal analiz sonuçlarının ortalama değerler

üzerinden kıyaslanmasında da net olarak belirlenmektedir. Doğal alanlarda ortalama olarak Co, Cr, Ni ve Pb değerleri daha yüksek, buna karşılık tarım alanlarında ise Cd, Cu ve Zn ortalama değerlerinin daha yüksek olduğu (Tablo 9 ve Tablo 10) görülmektedir. Özellikle mineral gübre ve kullanılan tarımsal ilaç kalalıntılarının etkisiyle Cd, Cu ve Zn değerlerinin tarım alanlarında doğal alanlara göre artış gösterdiği anlaşılmıştır.

### 4.4. Toprak Örneklerinde Ağır Metallerin Jeokimyasal Fraksiyonları

BCR ardışık ektrasiyon yöntemine göre elde edilen ağır metallerin jeokimyasal fraksiyonlarına ait ağır metal konsantrasyonları ortalamaları ve bu ortalamaların fraksiyonlardaki yüzde dağılımları Şekil 13'te verilmiştir. Şekil 13 incelendiğinde her elementin farklı fraksiyonlarda ve farklı yüzde dağılımlara sahip olduğu görülmektedir. Bununla birlikte ağır metallerin her bir fraksiyondaki sıralamaları Tablo 15 'de sunulmuştur.

Tablo 15

Ağır metallerin fraksiyonlardaki sıralamaları

| Ağır Metal | Doğal Alan Toprakları | Tarım Toprakları |
|---|---|---|
| **Cd** | $F_4 > F_2 > F_1 > F_3$ | $F_4 > F_1 > F_2 > F_3$ |
| **Co** | $F_4 > F_2 > F_3 > F_1$ | $F_4 > F_2 > F_3 > F_1$ |
| **Cr** | $F_4 > F_2 > F_3 > F_1$ | $F_4 > F_2 > F_3 > F_1$ |
| **Cu** | $F_4 > F_3 > F_2 > F_1$ | $F_4 > F_2 > F_3 > F_1$ |
| **Ni** | $F_4 > F_2 > F_3 > F_1$ | $F_4 > F_2 > F_3 > F_1$ |
| **Pb** | $F_4 > F_2 > F_3 > F_1$ | $F_4 > F_2 > F_1 > F_3$ |
| **Zn** | $F_4 > F_2 > F_3 > F_1$ | $F_4 > F_2 > F_3 > F_1$ |

Tablo 15'e göre tüm örneklerdeki ağır metallerin farklı konsantrasyonlarda (Şekil 13) olmasına rağmen ağırlıklı olarak $F_4$ fraksiyonunda bulunduğu tespit edilmiştir. Bununla birlikte ikincil olarak, doğal alanlardan alınan topraklarda Cu, tarım topraklarında ise Cd metalleri dışında tüm metallerin $F_2$ (indirgenebilir) fraksiyonunda baskın olduğu belirlenmiştir. Doğal alanlarda Cu metali ikincil olarak $F_3$ fraksiyonunda baskın iken, tarım alanlarında Cd metali ise $F_1$ fraksiyonda baskın olduğu tespit edilmiştir.

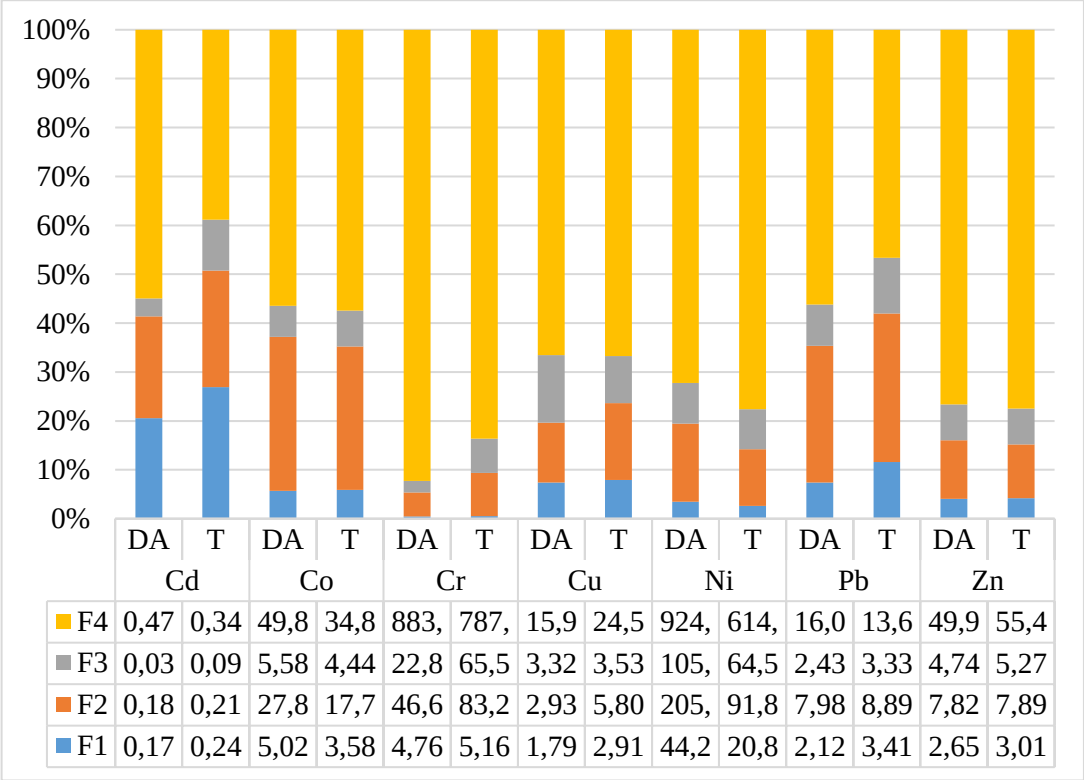
BCR ardışık ekstraksiyon yönteminde ilk üç fraksiyon konsantrasyonları ($F_{1+2+3}$) mobil fraksiyon olarak kabul edilmektedir. Bu kapsamda BCR ardışık ekstraksiyon yöntemiyle elde edilen toprak örneklerine ait mobil fraksiyonların sıralaması aşağıdaki gibidir:

Doğal alan topraklarında metallerin mobilite sıralaması;

Cd (%45,02)> Pb (%43,83)> Co (%43,52)> Cu (%33,46)> Ni (%27,75)> Zn (%23,36)> Cr (%7,75)

Tarım topraklarında metallerin mobilite sıralaması;

Cd (%61,13)> Pb (53,36)> Co (%42,55)> Cu (%33,27)> Zn (22,57)> Ni (%22,39)> Cr (%16,36) şeklinde olmuştur.




| | DA | T | DA | T | DA | T | DA | T | DA | T | DA | T | DA | T |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Cd | | Co | | Cr | | Cu | | Ni | | Pb | | Zn | |
| F4 | 0,47 | 0,34 | 49,8 | 34,8 | 883, | 787, | 15,9 | 24,5 | 924, | 614, | 16,0 | 13,6 | 49,9 | 55,4 |
| F3 | 0,03 | 0,09 | 5,58 | 4,44 | 22,8 | 65,5 | 3,32 | 3,53 | 105, | 64,5 | 2,43 | 3,33 | 4,74 | 5,27 |
| F2 | 0,18 | 0,21 | 27,8 | 17,7 | 46,6 | 83,2 | 2,93 | 5,80 | 205, | 91,8 | 7,98 | 8,89 | 7,82 | 7,89 |
| F1 | 0,17 | 0,24 | 5,02 | 3,58 | 4,76 | 5,16 | 1,79 | 2,91 | 44,2 | 20,8 | 2,12 | 3,41 | 2,65 | 3,01 |

Şekil 13. Ağır metallerin jeokimyasal fraksiyonlar ve oransal dağılımları (µg/g).

Ardışık ekstraksiyon sonucunda tarım topraklarından alınan örneklerde Cd (%61,13) ve Pb (%53,36) elementinin mobil fraksiyonlarının diğer elementlere göre farklılaştığı ve mobil fraksiyonda ($F_{1+2+3}$) yüksek olduğu görülmüştür. Toprakta oldukça hareketli olduğu bilinen Cd elementinin mobil çıkması beklenen bir sonuç olup bu sonuç Cd elementinin çözünürlüğü ve tarımsal girdiler (özellikle fosforlu gübrelerden gelen) ile ilgili olduğu sonucuna varılmıştır. Diğer yandan çok fazla hareketli olmayan Pb elementinin mobil olması ise litolojik kaynakların ayrışması, tarımsal girdiler ve özellikle yola yakın tarım topraklarının emisyonlardan etkilendiği sonucuna varılmıştır. Daha çok immobil

(hareketsiz) fraksiyonda bulunan elementlerin (Co, Cr, Cu, Ni ve Zn) daha çok toprakların mineral yapısına bağlı olduğu anlaşılmıştır. Bununla beraber tarım yapılan alanlarda mikro element olarak bitkiler tarafından Cu ve Zn elementinin kullanılması bu elementlerin hareketli formlardaki doğal alanlara göre bir miktar daha düşük olmalarını açıklamaktadır.

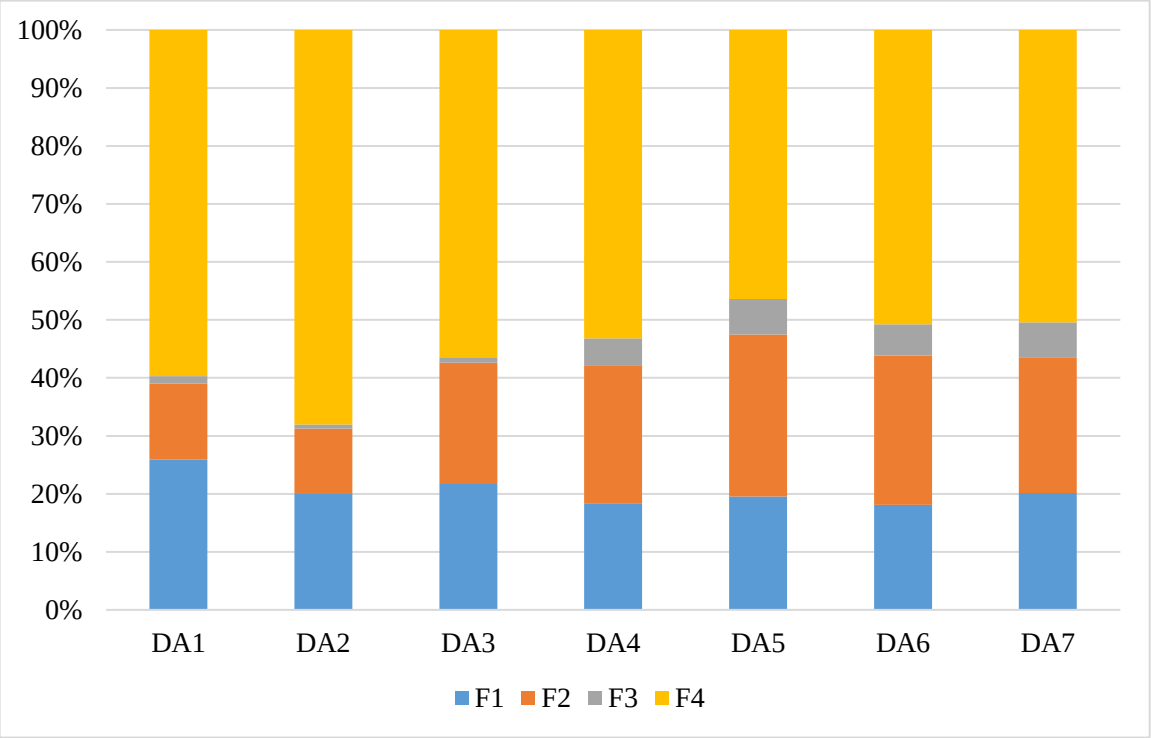
### 4.4.1. Kadmiyum (Cd)

Çalışma kapsamında alınan doğal alanlardan alınan örneklerin Cd elementine ait BCR ardışık ekstraksiyon yöntemi sonucunda elde edilen fraksiyon konsantrasyonları ve bunların yüzdesel dağılımları Tablo 16 ve Şekil 14'te verilmiştir. Örneklerin $F_1$ (değişebilir fraksiyon) fraksiyonundaki konsantrasyonları 0,15 ile 0,22 µg/g arasında değişiklik göstermiştir. Örneklerin $F_1$ fraksiyonundaki ortalama Cd konsantrasyonu 0,17 ± 0,02 µg/g tespit edilmiştir. Cd elementinin $F_2$ fraksiyonundaki konsantrasyonu 0,10 - 0,25 µg/g arasında bulunurken ortalama Cd konsantrasyonu 0,18 ± 0,05 µg/g bulunmuştur. Cd elementine ait $F_3$ ve $F_4$ fraksiyonlarının konsantrasyonları sırasıyla 0,01 - 0,06 ve 0,41- 0,60 µg/g arasında tespit edilmiştir. Doğal alan topraklarının mobil ($F_{1+2+3}$) fraksiyon oranı %45,02 olurken $F_4$ fraksiyonu %54,98 olmuştur.

Tablo 16

Doğal alan topraklarının Cd elementine ait jeokimyasal fraksiyonlar konsantrasyonları (µg/g)

| Örnek | $F_1$ | $F_2$ | $F_3$ | $F_4$ | Mobil ($F_{1+2+3}$) | $\sum F$ ($F_{1+2+3+4}$) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **DA1** | 0,22 | 0,11 | 0,01 | 0,51 | 0,34 | 0,85 |
| **DA2** | 0,17 | 0,10 | 0,01 | 0,60 | 0,28 | 0,87 |
| **DA3** | 0,17 | 0,16 | 0,01 | 0,44 | 0,34 | 0,78 |
| **DA4** | 0,16 | 0,20 | 0,04 | 0,45 | 0,40 | 0,85 |
| **DA5** | 0,18 | 0,25 | 0,06 | 0,42 | 0,49 | 0,91 |
| **DA6** | 0,15 | 0,22 | 0,05 | 0,43 | 0,41 | 0,84 |
| **DA7** | 0,17 | 0,19 | 0,05 | 0,41 | 0,41 | 0,82 |
| **En düşük** | 0,15 | 0,10 | 0,01 | 0,41 | 0,28 | 0,78 |
| **En yüksek** | 0,22 | 0,25 | 0,06 | 0,60 | 0,49 | 0,91 |
| **Ortalama** | 0,17 | 0,18 | 0,03 | 0,47 | 0,38 | 0,85 |
| **Standart sapma** | 0,02 | 0,05 | 0,02 | 0,06 | 0,06 | 0,04 |
| **% Dağılım** | 20,54 | 20,85 | 3,63 | 54,98 | 45,02 | 100,00 |



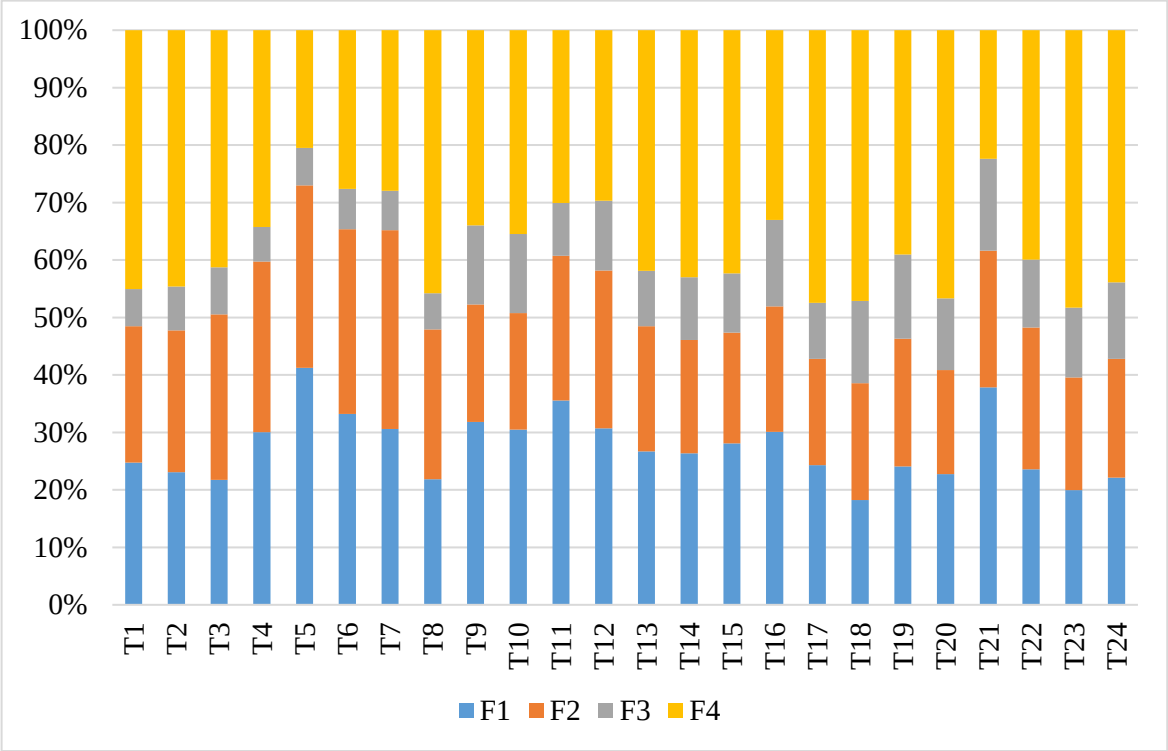

Şekil 14. Doğal alan topraklarının Cd elementine ait ağır metal fraksiyonları ve yüzde dağılımları.

Çalışma kapsamında alınan tarım toprakları örneklerinin Cd elementine ait BCR ardışık ekstraksiyon yöntemi sonucunda elde edilen fraksiyon konsantrasyonları ve bunların yüzdesel dağılımları Tablo 17 ve Şekil 15'te verilmiştir. Tarım topraklarından alınan örneklerin $F_1$ (değişebilir fraksiyon) fraksiyonundaki konsantrasyonları 0,13 ile 0,31 µg/g arasında değişiklik göstermiştir. Örneklerin $F_1$ fraksiyonundaki ortalama Cd konsantrasyonu 0,24± 0,05 µg/g tespit edilmiştir. Bununla birlikte Cd elementinin $F_2$ fraksiyonundaki konsantrasyonu 0,09- 0,32 µg/g,; ortalama Cd konsantrasyonu ise 0,21± 0,05 µg/g bulunmuştur. Cd elementine ait $F_3$ ve $F_4$ fraksiyonlarının konsantrasyonları sırasıyla 0,05- 0,13 µg/g ve 0,15- 0,56 µg/g arasında tespit edilmiştir.

Tablo 17

Tarım topraklarının Cd elementine ait jeokimyasal fraksiyonlar konsantrasyonları (μg/g)

| Örnek | $F_1$ | $F_2$ | $F_3$ | $F_4$ | Mobil ($F_{1+2+3}$) | ∑F ($F_{1+2+3+4}$) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **T1** | 0,22 | 0,21 | 0,06 | 0,41 | 0,49 | 0,90 |
| **T2** | 0,22 | 0,23 | 0,07 | 0,42 | 0,52 | 0,94 |
| **T3** | 0,19 | 0,25 | 0,07 | 0,37 | 0,52 | 0,88 |
| **T4** | 0,26 | 0,25 | 0,05 | 0,29 | 0,56 | 0,86 |
| **T5** | 0,31 | 0,24 | 0,05 | 0,15 | 0,60 | 0,75 |
| **T6** | 0,27 | 0,26 | 0,06 | 0,23 | 0,59 | 0,82 |
| **T7** | 0,28 | 0,32 | 0,06 | 0,25 | 0,66 | 0,91 |
| **T8** | 0,25 | 0,30 | 0,07 | 0,52 | 0,62 | 1,15 |
| **T9** | 0,14 | 0,09 | 0,06 | 0,15 | 0,30 | 0,45 |
| **T10** | 0,13 | 0,09 | 0,06 | 0,15 | 0,27 | 0,43 |
| **T11** | 0,29 | 0,21 | 0,08 | 0,25 | 0,57 | 0,82 |
| **T12** | 0,24 | 0,22 | 0,10 | 0,24 | 0,56 | 0,79 |
| **T13** | 0,29 | 0,23 | 0,10 | 0,45 | 0,62 | 1,07 |
| **T14** | 0,26 | 0,20 | 0,11 | 0,43 | 0,57 | 1,00 |
| **T15** | 0,29 | 0,20 | 0,11 | 0,44 | 0,60 | 1,03 |
| **T16** | 0,23 | 0,16 | 0,11 | 0,25 | 0,50 | 0,75 |
| **T17** | 0,29 | 0,22 | 0,12 | 0,56 | 0,62 | 1,19 |
| **T18** | 0,15 | 0,16 | 0,11 | 0,37 | 0,42 | 0,79 |
| **T19** | 0,21 | 0,19 | 0,13 | 0,33 | 0,52 | 0,86 |
| **T20** | 0,25 | 0,20 | 0,13 | 0,51 | 0,58 | 1,08 |
| **T21** | 0,29 | 0,19 | 0,12 | 0,17 | 0,60 | 0,78 |
| **T22** | 0,18 | 0,19 | 0,09 | 0,31 | 0,47 | 0,77 |
| **T23** | 0,21 | 0,20 | 0,13 | 0,50 | 0,53 | 1,03 |
| **T24** | 0,20 | 0,19 | 0,12 | 0,40 | 0,51 | 0,91 |
| **En düşük** | 0,13 | 0,09 | 0,05 | 0,15 | 0,27 | 0,43 |
| **En yüksek** | 0,31 | 0,32 | 0,13 | 0,56 | 0,66 | 1,19 |
| **Ortalama** | 0,24 | 0,21 | 0,09 | 0,34 | 0,53 | 0,87 |
| **Standart sapma** | 0,05 | 0,05 | 0,03 | 0,12 | 0,09 | 0,18 |
| **% Dağılım** | 26,92 | 23,85 | 10,35 | 38,87 | 61,13 | 100,00 |




Şekil 15. Tarım topraklarının Cd elementine ait ağır metal fraksiyonları ve yüzde dağılımları.

Tarım topraklarının Cd'un mobil ($F_{1+2+3}$) fraksiyon oranı %61,13 iken $F_4$ fraksiyon oranı ise %38,87 olmuştur. Mobil fraksiyonlar arasında %26,92 oran ile en yüksek $F_1$ fraksiyonunda tespit edilmiştir. Bunu %23,85 ile $F_2$ fraksiyonu takip etmiştir (Şekil 15). Genellikle antropojenik kaynaklara atfedilen $F_1$ fraksiyonu, metallerin zayıf bağlı, hareketli ve biyolojik olarak daha kullanılabilir kısımlarını içermektedir (Fernández-Ondoño vd., 2017). Örnek noktaları göz önünde bulundurulduğunda T5, T6, T7, T11, T12, T16 ve T21 numaralı örneklerin (Şekil 3 ve Şekil 5) diğer örneklere kıyasla mobil fraksiyon oranlarının yaklaşık %65-80 arasında değiştiği görülmektedir. Bu örnekleme noktalarında genelde kapya biber tarımı yapılmaktadır (Tablo 1, Şekil 5). Kullanılan girdiler ve farklı amenajmana bağlı olarak tarım alanlarında Cd içerikleri değişkenlik göstermektedir. Daha önce yapılan çalışmalarda ilk iki fraksiyonun ($F_1$ ve $F_2$) daha alınabilir fraksiyonları oluşturduğu bildirilmiştir (Sungur vd.,2016; Gür ve Sungur, 2018). Tablo 11 incelendiğinde $F_1$ ve $F_2$ fraksiyonunun %50,77 ile alınabilir formun yüksek oranlara sahip olduğunu göstermiştir. Ancak Cd elementinin ∑F konsantrasyonu (0,87 ± 18 µg/g) göz önünde bulundurulduğunda tarım toprakları için kullanılan yaygın değerler sınırları içerisinde yer almıştır. Bu durum kısa vadede olmasa dahi uzun vadede izlenmesi gerektiği kanısını oluşturmuştur.

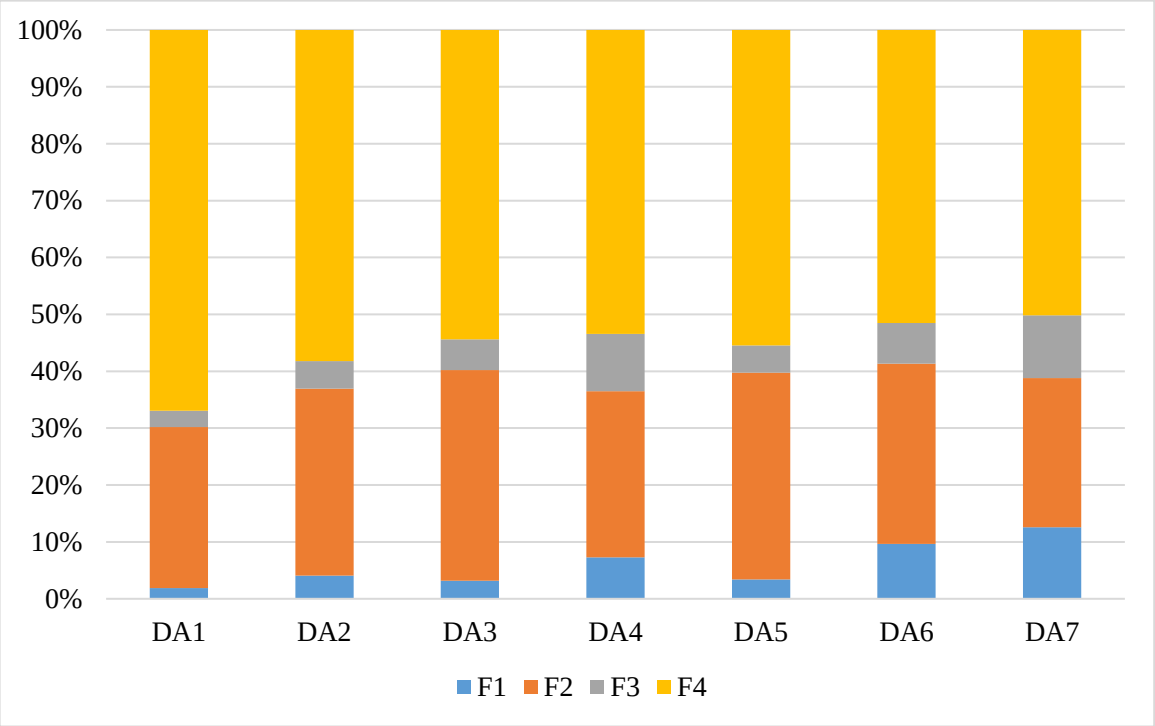
### 4.4.2. Kobalt (Co)

Çalışma kapsamında doğal alanlardan alınan toprak örneklerinin Co elementine ait BCR ardışık ekstraksiyon yöntemi sonucunda elde edilen fraksiyon konsantrasyonları ve bunların oransal dağılımları Tablo 18 ve Şekil 16'de verilmiştir. Doğal alan topraklarında Co'nun $F_1$ fraksiyonu en düşük 2,28 µg/g en yüksek 9,76 µg/g tespit edilmiştir. Örneklerin $F_1$ fraksiyonu ortalaması 5,02 ± 2,76 µg/g olarak bulunmuştur. $F_2$ fraksiyonu incelendiğinde Co konsantrasyonları 20,38 µg/g ile 34,40 µg/g arasında değişiklik göstermiştir. Bununla birlikte örneklerin $F_2$ fraksiyonu konsantrasyonu ortalaması 27,82 ± 4,28 µg/g olarak belirlenmiştir. Örneklerde Co'nun $F_3$ fraksiyonu konsantrasyonu 3,48 ile 8,67 µg/g arasında bulunmuştur. Tablo 7 incelendiğinde, $F_3$ fraksiyonu konsantrasyonları ortalaması 5,58 ± 2,03 µg/g olarak tespit edilmiştir. Bununla birlikte doğal alan topraklarının $F_4$ fraksiyonu konsantrasyonları 38,95 ile 81,25 µg/g aralığında ve ortalaması 49,86 ± 13,25 µg/g olarak tespit edilmiştir. Doğal alanlardan alınan toprak örneklerinin mobil fraksiyonu ($F_{1+2+3}$) dağılımı %43,52 olurken $F_2$ fraksiyonu %31,51 oranı ile öne çıkmaktadır. Bu durumun Co elementinin Mn oksitlere karşı olan afinitesinden kaynaklandığı düşünülmüştür (Tashakor vd.,2011; Abdul Rashid vd., 2023). Diğer yandan Co'ın %56,48 oranı ile $F_4$ fraksiyonunda bulunduğu belirlenmiştir. Genellikle mineral matrikse bağlı olan F4 fraksiyonunun yüksek olmasının ana materyalinden kaynaklanabileceği anlaşılmıştır.

Tablo 18

Doğal alan topraklarının Co elementine ait jeokimyasal fraksiyonlar konsantrasyonları (µg/g)

| Örnek | $F_1$ | $F_2$ | $F_3$ | $F_4$ | Mobil ($F_{1+2+3}$) | ∑F ($F_{1+2+3+4}$) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **DA1** | 2,28 | 34,40 | 3,48 | 81,25 | 40,16 | 121,41 |
| **DA2** | 3,42 | 27,64 | 4,08 | 48,99 | 35,15 | 84,14 |
| **DA3** | 2,48 | 28,92 | 4,17 | 42,47 | 35,58 | 78,04 |
| **DA4** | 6,26 | 25,08 | 8,67 | 45,91 | 40,01 | 85,91 |
| **DA5** | 2,98 | 32,12 | 4,22 | 48,93 | 39,33 | 88,25 |
| **DA6** | 7,97 | 26,20 | 5,92 | 42,55 | 40,09 | 82,64 |
| **DA7** | 9,76 | 20,38 | 8,54 | 38,95 | 38,68 | 77,63 |
| **En düşük** | 2,28 | 20,38 | 3,48 | 38,95 | 35,15 | 77,63 |
| **En yüksek** | 9,76 | 34,40 | 8,67 | 81,25 | 40,16 | 121,41 |
| **Ortalama** | 5,02 | 27,82 | 5,58 | 49,86 | 38,43 | 88,29 |
| **Standart sapma** | 2,76 | 4,28 | 2,03 | 13,25 | 2,00 | 13,99 |
| **% Dağılım** | 5,69 | 31,51 | 6,32 | 56,48 | 43,52 | 100,00 |



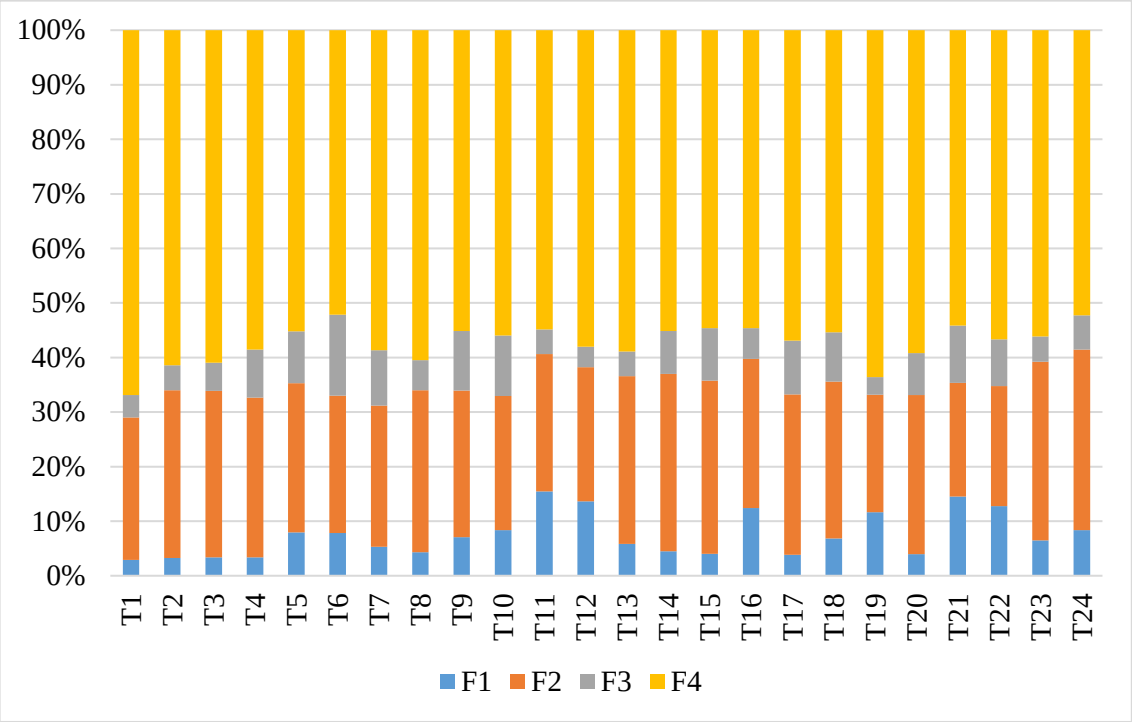

Şekil 16. Doğal alan topraklarının Co elementine ait ağır metal fraksiyonları ve yüzde dağılımları.

Çalışma kapsamında alınan tarım toprakları örneklerinin Co elementine ait BCR ardışık ekstraksiyon yöntemi sonucunda elde edilen fraksiyon konsantrasyonları ve bunların oransal dağılımları Tablo 19 ve Şekil 17'de verilmiştir. Tarım topraklarından alınan örneklerin $F_1$ fraksiyonu konsantrasyonları 1,25 ile 7,38 µg/g arasında değişiklik göstermiştir. Örneklerin $F_1$ fraksiyonu konsantrasyonları ortalaması 3,58 ± 1,90 µg/g olarak belirlenmiştir. Tablo 17 incelendiğinde örneklerin $F_2$ fraksiyonları en düşük 2,98 µg/g en yüksek ise 57,88 µg/g olarak tespit edilmiştir. Bununla birlikte örneklerin $F_2$ fraksiyonu konsantrasyonları ortalaması 17,75 ± 14,27 µg/g olarak belirlenmiştir. Örneklerin $F_2$ ve $F_3$ fraksiyonları sırasıyla 1,17 - 17,61 ve 7,64 - 99,37 µg/g arasında değişiklik göstermiştir. Örneklerin $F_2$ ve $F_3$ fraksiyonları ortalama konsantrasyonları sırasıyla 34,80 ± 25,20 µg/g ve 25,77 ± 19,62 µg/g şeklinde bulunmuştur.

Tablo 19

Tarım topraklarının Co elementine ait jeokimyasal fraksiyonlar konsantrasyonları (μg/g)

| Örnek | $F_1$ | $F_2$ | $F_3$ | $F_4$ | Mobil ($F_{1+2+3}$) | ∑F ($F_{1+2+3+4}$) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **T1** | 1,25 | 11,25 | 1,76 | 28,80 | 14,26 | 43,06 |
| **T2** | 2,11 | 19,76 | 2,92 | 39,48 | 24,78 | 64,26 |
| **T3** | 2,22 | 20,26 | 3,40 | 40,43 | 25,88 | 66,31 |
| **T4** | 1,36 | 11,90 | 3,59 | 23,80 | 16,85 | 40,65 |
| **T5** | 1,78 | 6,14 | 2,14 | 12,37 | 10,05 | 22,42 |
| **T6** | 1,96 | 6,30 | 3,71 | 13,05 | 11,97 | 25,02 |
| **T7** | 1,85 | 9,03 | 3,54 | 20,48 | 14,42 | 34,90 |
| **T8** | 3,53 | 24,34 | 4,53 | 49,55 | 32,40 | 81,95 |
| **T9** | 1,59 | 6,04 | 2,46 | 12,39 | 10,08 | 22,47 |
| **T10** | 1,51 | 4,42 | 2,00 | 10,08 | 7,93 | 18,01 |
| **T11** | 5,47 | 8,89 | 1,60 | 19,39 | 15,95 | 35,34 |
| **T12** | 4,27 | 7,70 | 1,17 | 18,17 | 13,14 | 31,31 |
| **T13** | 6,30 | 33,22 | 4,90 | 63,58 | 44,43 | 108,01 |
| **T14** | 2,59 | 18,75 | 4,50 | 31,80 | 25,85 | 57,65 |
| **T15** | 7,38 | 57,88 | 17,61 | 99,73 | 82,87 | 182,60 |
| **T16** | 2,95 | 6,52 | 1,34 | 13,02 | 10,81 | 23,84 |
| **T17** | 6,70 | 51,26 | 17,20 | 99,21 | 75,16 | 174,37 |
| **T18** | 5,16 | 21,76 | 6,84 | 41,91 | 33,76 | 75,67 |
| **T19** | 4,95 | 9,18 | 1,37 | 27,06 | 15,50 | 42,56 |
| **T20** | 3,98 | 29,54 | 7,74 | 59,90 | 41,26 | 101,16 |
| **T21** | 2,05 | 2,94 | 1,48 | 7,64 | 6,46 | 14,10 |
| **T22** | 3,44 | 5,95 | 2,31 | 15,30 | 11,71 | 27,01 |
| **T23** | 6,51 | 32,84 | 4,65 | 56,25 | 43,99 | 100,24 |
| **T24** | 5,09 | 20,10 | 3,81 | 31,74 | 29,00 | 60,74 |
| **En düşük** | 1,25 | 2,94 | 1,17 | 7,64 | 6,46 | 14,10 |
| **En yüksek** | 7,38 | 57,88 | 17,61 | 99,73 | 82,87 | 182,60 |
| **Ortalama** | 3,58 | 17,75 | 4,44 | 34,80 | 25,77 | 60,57 |
| **Standart sapma** | 1,90 | 14,27 | 4,24 | 25,20 | 19,62 | 44,65 |
| **% Dağılım** | 5,92 | 29,30 | 7,33 | 57,45 | 42,55 | 100,00 |




Şekil 17. Tarım topraklarının Co elementine ait ağır metal fraksiyonları ve yüzde dağılımları.

Şekil 17 incelendiğinde Co elementinin %57,45 oranı ile en fazla $F_4$ fraksiyonunda bulunduğu görülmektedir. Toprakların Co içeriğinin esas olarak ana materyalden kaynaklandığı anlaşılmıştır. Çalışma alanında olduğu gibi ultramafik kayaçlar üzerinde oluşmuş topraklarda Co konsantrasyonunun yüksek olduğu ve 200 mg/kg'a kadar çıkabildiği bildirilmiştir (Kabata-Pendias, 2011). Bunun yanında Co elementi mobil fraksiyonlar arasında en fazla %29,30 ile $F_2$ fraksiyonunda bulunmuştur. Fe-Mn oksitler ve hidroksitler çok sayıda metalin adsorpsiyonunda önemli bir rol oynayabilmektedir. Bu gibi mineral fazlarının metalleri asdorbe ettiği bilinmektedir (Summa vd., 2020; Özcan vd., 2022). Bu sonuçlar çevre koşullarında meydana gelebilecek değişiklikler sonucu $F_2$ fraksiyonunda tutulan Co'nun daha serbest formlara geçerek çevresel risk açısından önemli hale gelebileceğini işaret etmiştir.

### 4.4.3. Krom (Cr)

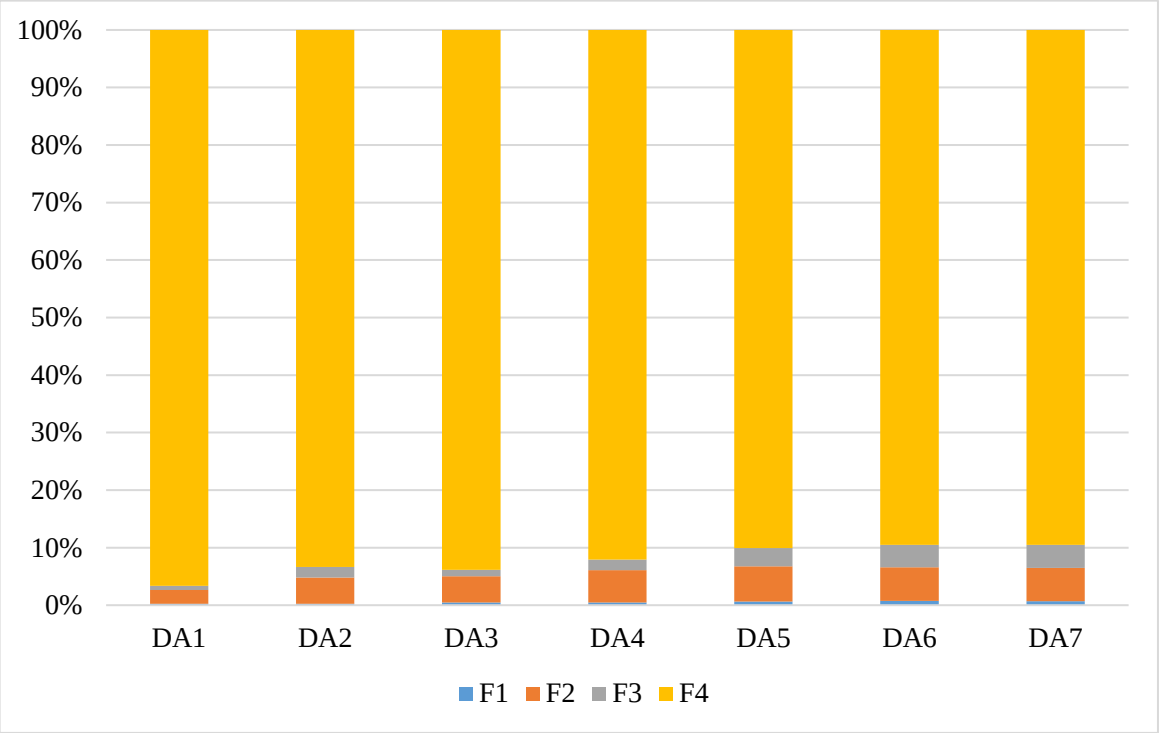
Çalışma kapsamında doğal alanlardan alınan toprak örneklerinin Cr elementine ait BCR ardışık ekstraksiyon yöntemi sonucunda elde edilen fraksiyon konsantrasyonları ve bunların yüzdesel dağılımları Tablo 20 ve Şekil 18'de verilmiştir. Doğal topraklarının $F_1$ fraksiyonu konsantrasyonları 1,78 - 7,92 µg/g arasında değişiklik göstermiştir. $F_1$ fraksiyonu

konsantrasyonu ortalaması 4,76 ± 2,11 µg/g olarak belirlenmiştir. $F_2$ fraksiyonu konsantrasyonları 46,67- 12,09 µg/g arasında değişiklik göstermiştir. Örneklerin $F_2$ fraksiyonu konsantrasyonu ortalaması 46,67 ± 12,09 olarak tespit edilmiştir. Doğal alan topraklarının $F_3$ fraksiyonu konsantrasyonları 8,92 - 45,15 µg/g arasında tespit edilmiştir. Örneklerin $F_3$ fraksiyonu konsantrasyonları ortalama 22,81± 13,75 µg/g bulunmuştur. $F_4$ fraksiyonu konsantrasyonları 691,75 ile 1287,50 µg/g olurken $F_4$ fraksiyonu konsantrasyonları ortalaması 883,32 ± 192,42 µg/g bulunmuştur. Toprak örneklerinin çok büyük çoğunluğu %92,25 ile $F_4$ fraksiyonunda yer almaktadır. Bu durum Cr elementinin çalışma alanının jeolojik özelliklerini yansıttığını açık bir şekilde göstermiştir.

Tablo 20

Doğal alan topraklarının Cr elementine ait jeokimyasal fraksiyonlar konsantrasyonları (µg/g)

| Örnek | $F_1$ | $F_2$ | $F_3$ | $F_4$ | Mobil ($F_{1+2+3}$) | ∑F ($F_{1+2+3+4}$) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **DA1** | 3,21 | 32,13 | 9,21 | 1287,50 | 44,55 | 1332,05 |
| **DA2** | 1,78 | 33,98 | 13,60 | 691,75 | 49,37 | 741,12 |
| **DA3** | 3,81 | 36,21 | 8,92 | 745,75 | 48,94 | 794,69 |
| **DA4** | 3,74 | 46,47 | 15,30 | 758,75 | 65,51 | 824,26 |
| **DA5** | 5,37 | 53,72 | 28,03 | 788,25 | 87,12 | 875,37 |
| **DA6** | 7,50 | 59,33 | 39,46 | 904,75 | 106,29 | 1011,04 |
| **DA7** | 7,92 | 64,86 | 45,15 | 1006,50 | 117,93 | 1124,43 |
| **En düşük** | 1,78 | 32,13 | 8,92 | 691,75 | 44,55 | 741,12 |
| **En yüksek** | 7,92 | 64,86 | 45,15 | 1287,50 | 117,93 | 1332,05 |
| **Ortalama** | 4,76 | 46,67 | 22,81 | 883,32 | 74,24 | 957,57 |
| **Standart sapma** | 2,11 | 12,09 | 13,75 | 192,42 | 27,57 | 195,98 |
| **% Dağılım** | 0,50 | 4,87 | 2,38 | 92,25 | 7,75 | 100,00 |



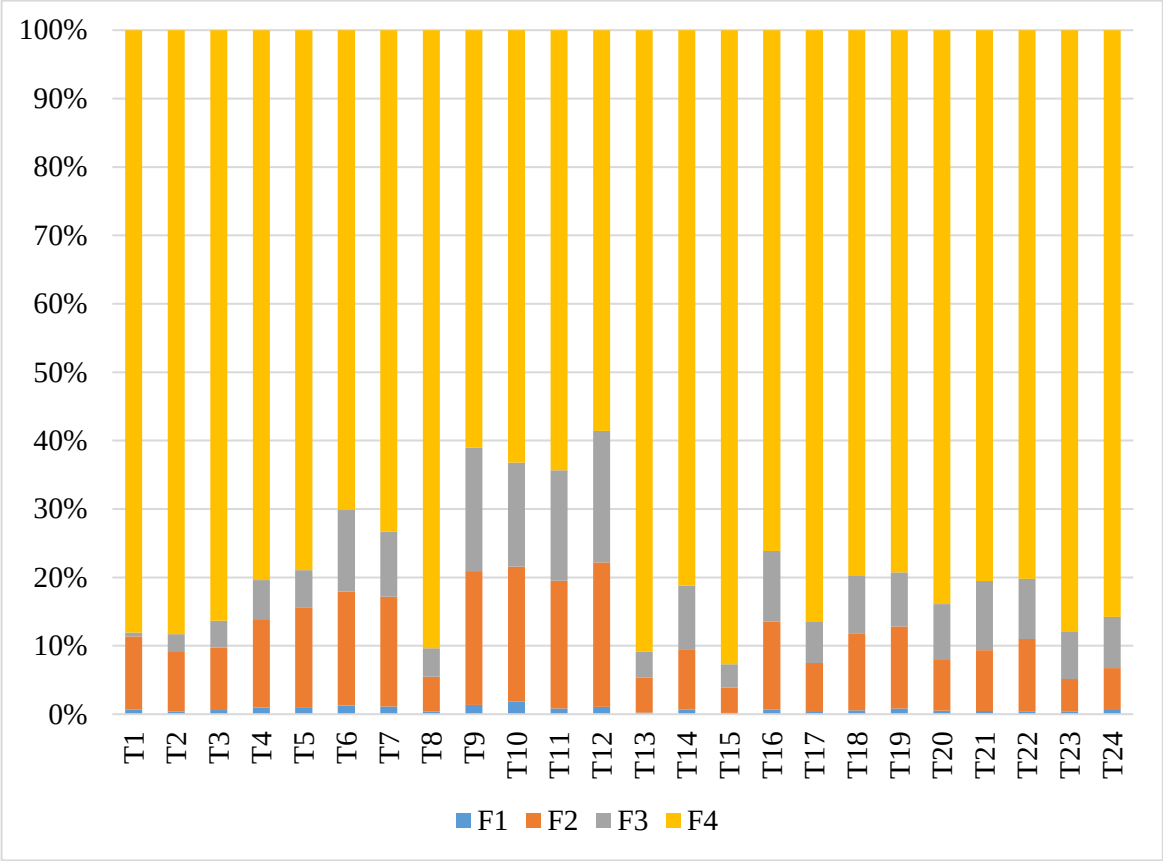

Şekil 18. Doğal alan topraklarının Cr elementine ait ağır metal fraksiyonları ve yüzde dağılımları.

Çalışma kapsamında tarım topraklarından alınan örneklerinin Cr elementine ait BCR ardışık ekstraksiyon yöntemi sonucunda elde edilen fraksiyon konsantrasyonları ve bunların yüzdesel dağılımları Tablo 21 ve Şekil 19'da verilmiştir. Tablo 16 incelendiğinde tarım topraklarının $F_1$ fraksiyonu konsantrasyonları 3,04 - 7,86 µg/g arasında değiştiği görülmüştür. $F_1$ fraksiyonu konsantrasyonu ortalaması 5,16 ± 1,31 µg/g bulunmuştur. $F_2$ fraksiyonu konsantrasyonları 51,35 - 130,60 µg/g arasında değişiklik göstermiş ve ortalama 83,24 ± 23,10 µg/g olarak belirlenmiştir. Doğal alan topraklarının $F_3$ fraksiyonu konsantrasyonları 2,95 - 122,14 µg/g arasında tespit edilmiştir. $F_3$ fraksiyonu konsantrasyonları ortalama 65,54 ± 29,21 µg/g bulunmuştur. Örneklerin $F_4$ fraksiyonu konsantrasyonları 264,09 ile 2844,30 µg/g olurken $F_4$ fraksiyonu konsantrasyonları ortalaması 787,09 ± 613,17 µg/g olarak tespit edilmiştir.

Tablo 21

Tarım topraklarının Cr elementine ait jeokimyasal fraksiyonlar konsantrasyonları (µg/g)

| Örnek | $F_1$ | $F_2$ | $F_3$ | $F_4$ | Mobil ($F_{1+2+3}$) | ∑F ($F_{1+2+3+4}$) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **T1** | 3,72 | 56,16 | 2,95 | 462,75 | 62,83 | 525,58 |
| **T2** | 3,04 | 68,60 | 19,48 | 687,00 | 91,12 | 778,12 |
| **T3** | 4,30 | 63,35 | 27,26 | 600,25 | 94,91 | 695,16 |
| **T4** | 4,58 | 61,20 | 27,13 | 380,70 | 92,91 | 473,61 |
| **T5** | 4,54 | 65,05 | 24,20 | 351,24 | 93,79 | 445,03 |
| **T6** | 5,32 | 69,40 | 49,61 | 292,08 | 124,33 | 416,41 |
| **T7** | 5,10 | 73,90 | 43,58 | 336,90 | 122,58 | 459,48 |
| **T8** | 6,24 | 86,30 | 70,44 | 1527,60 | 162,98 | 1690,58 |
| **T9** | 5,91 | 84,65 | 78,08 | 264,09 | 168,64 | 432,72 |
| **T10** | 7,86 | 85,60 | 66,12 | 273,99 | 159,58 | 433,57 |
| **T11** | 4,34 | 95,40 | 82,75 | 328,88 | 182,49 | 511,37 |
| **T12** | 4,85 | 96,65 | 88,01 | 267,99 | 189,51 | 457,50 |
| **T13** | 4,48 | 105,45 | 77,35 | 1867,80 | 187,28 | 2055,08 |
| **T14** | 4,82 | 61,55 | 65,33 | 568,50 | 131,69 | 700,19 |
| **T15** | 5,06 | 113,85 | 104,85 | 2844,30 | 223,76 | 3068,06 |
| **T16** | 5,07 | 90,08 | 72,67 | 535,20 | 167,82 | 703,02 |
| **T17** | 5,75 | 130,05 | 107,77 | 1566,60 | 243,57 | 1810,17 |
| **T18** | 6,72 | 130,60 | 100,62 | 933,30 | 237,94 | 1171,24 |
| **T19** | 7,09 | 100,19 | 65,72 | 662,31 | 173,00 | 835,31 |
| **T20** | 7,57 | 114,50 | 122,14 | 1273,50 | 244,20 | 1517,70 |
| **T21** | 3,18 | 62,55 | 70,66 | 564,90 | 136,38 | 701,28 |
| **T22** | 3,20 | 78,30 | 65,20 | 594,09 | 146,70 | 740,79 |
| **T23** | 4,39 | 51,35 | 74,82 | 948,00 | 130,56 | 1078,56 |
| **T24** | 6,66 | 53,05 | 66,23 | 758,10 | 125,94 | 884,04 |
| **En düşük** | 3,04 | 51,35 | 2,95 | 264,09 | 62,83 | 416,41 |
| **En yüksek** | 7,86 | 130,60 | 122,14 | 2844,30 | 244,20 | 3068,06 |
| **Ortalama** | 5,16 | 83,24 | 65,54 | 787,09 | 153,94 | 941,02 |
| **Standart sapma** | 1,31 | 23,10 | 29,21 | 613,17 | 49,71 | 641,59 |
| **% Dağılım** | 0,55 | 8,85 | 6,96 | 83,64 | 16,36 | 100,00 |




Şekil 19. Tarım topraklarının Cr elementine ait ağır metal fraksiyonları ve yüzde dağılımları.

Tarım alanından alınan toprak örneklerinin mobil ($F_{1+2+3}$) fraksiyonu oranı %16,36 olmuştur. Örnek noktaları incelendiğinde T9, T10, T11 ve T12 numaralı örneklerin mobil fraksiyon oranlarının diğer örneklerden farklılaştığı görülmektedir. Bu örnek noktalarına ait fiziko-kimyasal analiz sonuçları (Tablo 5) incelendiğinde organik madde içeriği ve kil içeriğinin diğer örnekleme noktalarına göre daha düşük olduğu görülmektedir. Topraklarda metal tutunumunda çok etkin olan organik madde ve kil içeriğinin bu oranların oluşmasında önemli olduğu düşünülmektedir. Ayrıca örnekleme noktalarının morfolojik özellikleri (etek düzü) olmaları üst havza ve yamaçlardan bir miktar taşınan Cr elementinin bu alanlarda sedimente olmasının da etkisi olabilir (Şekil 4 ve Şekil 5). Örneklerin $F_4$ fraksiyonu oranı %83,64 olarak bulunmuştur. Bu durumun ana materyal kaynaklı olduğu anlaşılmıştır.

### 4.4.4. Bakır (Cu)

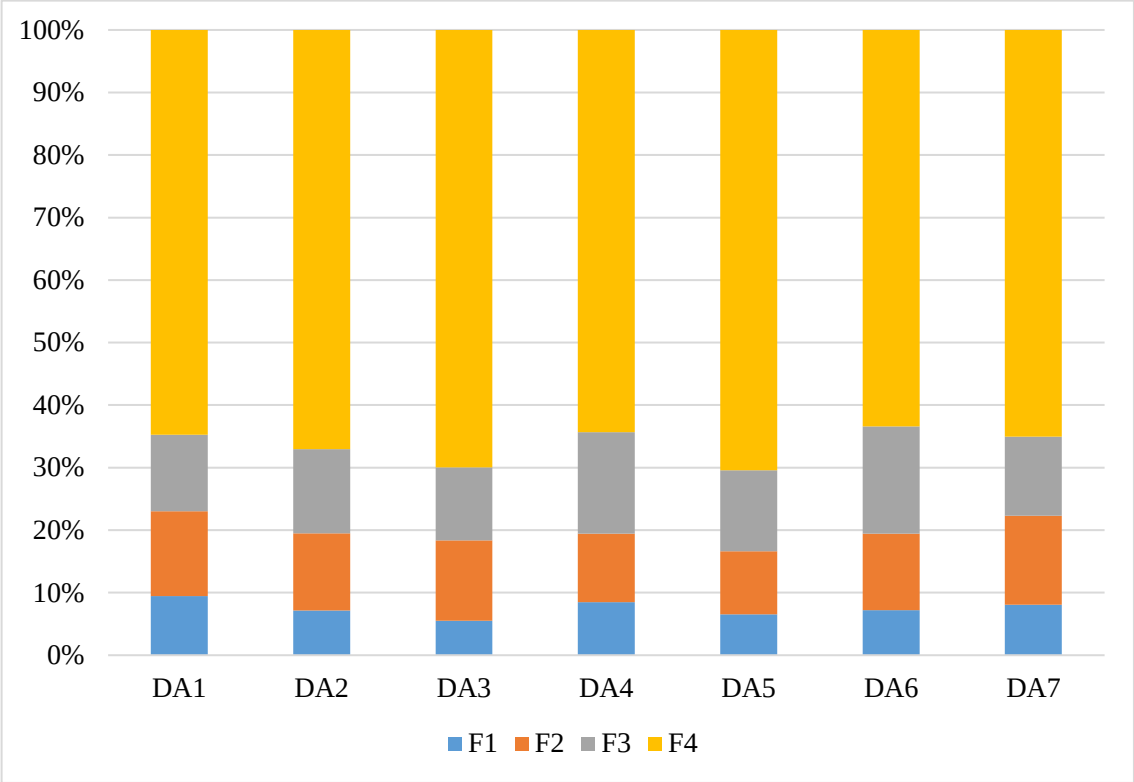
Tez çalışması kapsamında doğal alanlardan alınan örneklerin Cu elementine ait BCR ardışık ekstraksiyon yöntemi sonucunda elde edilen fraksiyon konsantrasyonları ve bunların

yüzdesel dağılımları Tablo 22 ve Şekil 20'te verilmiştir. Tablo 22 incelendiğinde kontrol topraklarının $F_1$ fraksiyonu konsantrasyonlarının 1,21 - 2,02 µg/g görülmektedir. Örneklerin $F_1$ fraksiyonu konsantrasyonları ortalaması 1,79 ± 0,26 µg/g bulunmuştur. Doğal alanlardan alınan toprakların $F_2$ fraksiyonu konsantrasyonları en düşük 2,45 µg/g en yüksek 3,35 µg/g olurken $F_2$ fraksiyonu konsantrasyonları ortalaması 2,93 ± 0,26 µg/g'dır. Bununla birlikte Cu elementine ait $F_3$ ve $F_4$ fraksiyonları sırasıyla en düşük 2,56 ve 13,82 µg/g en yüksek ise 4,41 µg/g ve 21,32 µg/g olarak tespit edilmiştir. Bu iki fraksiyonun konsantrasyonları ortalamaları sırasıyla 3,32 ± 0,64 µg/g ve 15,98 ± 2,30 µg/g'dır. Doğal alan topraklarının mobil fraksiyon ($F_{1+2+3}$) oranı %33,46 olarak hesaplanmıştır. Bu üç fraksiyon içinde %13,81 oranıyla $F_3$ fraksiyonu ön plana çıkmıştır. Doğal alanlardan alınan toprak örneklerinin büyük bir kısmı yüksek organik madde içeriğine sahiptir. Organik maddeye ve sülfitlere bağlı fraksiyon olarak karakterize edilen F3 farksiyonunda nispeten yüksek oranda bulunan Cu elementinin organik maddeye karşı olan afinetisinden kaynaklandığı düşünülmüştür. Toprak organik maddesinin topraktaki adsorbe edilen Cu'un tutulmasından esas olarak sorumlu olduğu literatürde bildirmiştir (Adriano, 1986; Alloway, 1990; Kabata-Pendias ve Szteke., 2015). Fraksiyonlar arasındaki en büyük oran %66,54 ile $F_4$ fraksiyonuna ait tespit edilmiştir. Elde edilen bu sonuçlar Cu'nun daha ana materyalden etkilendiğini göstermektedir.

Tablo 22

Doğal alan topraklarının Cu elementine ait jeokimyasal fraksiyonlar konsantrasyonları (µg/g)

| Örnek | $F_1$ | $F_2$ | $F_3$ | $F_4$ | Mobil ($F_{1+2+3}$) | ∑F ($F_{1+2+3+4}$) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **DA1** | 2,02 | 2,90 | 2,61 | 13,82 | 7,53 | 21,35 |
| **DA2** | 1,65 | 2,84 | 3,11 | 15,47 | 7,59 | 23,06 |
| **DA3** | 1,21 | 2,80 | 2,56 | 15,29 | 6,57 | 21,86 |
| **DA4** | 1,90 | 2,45 | 3,64 | 14,41 | 7,99 | 22,39 |
| **DA5** | 1,97 | 3,05 | 3,92 | 21,32 | 8,95 | 30,27 |
| **DA6** | 1,85 | 3,14 | 4,41 | 16,28 | 9,40 | 25,68 |
| **DA7** | 1,90 | 3,35 | 2,97 | 15,31 | 8,22 | 23,52 |
| **En düşük** | 1,21 | 2,45 | 2,56 | 13,82 | 6,57 | 21,35 |
| **En yüksek** | 2,02 | 3,35 | 4,41 | 21,32 | 9,40 | 30,27 |
| **Ortalama** | 1,79 | 2,93 | 3,32 | 15,98 | 8,04 | 24,02 |
| **Standart sapma** | 0,26 | 0,26 | 0,64 | 2,30 | 0,87 | 2,86 |
| **% Dağılım** | 7,44 | 12,21 | 13,81 | 66,54 | 33,46 | 100,00 |



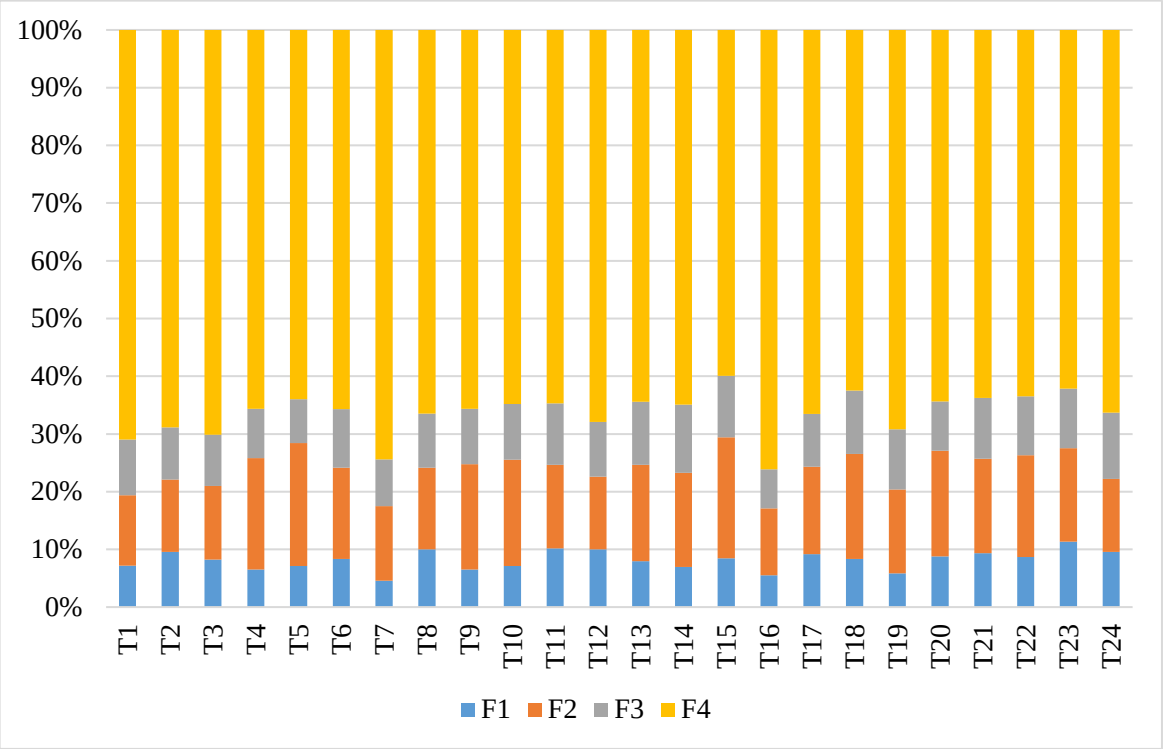

Şekil 20. Doğal alan topraklarının Cu elementine ait ağır metal fraksiyonları ve yüzde dağılımları.

Çalışma kapsamında alınan tarım toprakları örneklerinin Cu elementine ait BCR ardışık ekstraksiyon yöntemi sonucunda elde edilen fraksiyon konsantrasyonları ve bunların yüzdesel dağılımları Tablo 23 ve Şekil 21'te verilmiştir. Örneklenen tarım topraklarının $F_1$ fraksiyonu konsantrasyonları 2,21 - 3,60 µg/g arasında değişiklik göstermiştir. Örneklerin $F_1$ fraksiyonu konsantrasyonları ortalaması 2,91 ± 0,41 µg/g olmuştur. $F_2$ fraksiyonu konsantrasyonları 3,65 - 8,22 µg/g arasında bulunmuştur. Örneklerin $F_2$ fraksiyonu konsantrasyonların ortalaması 5,80 ± 1,41 µg/g bulunmuştur. Örneklerin $F_3$ fraksiyonu konsantrasyonları en düşük 2,54 µg/g iken en yüksek 5,15 µg/g'dır. Bununla birlikte örneklerin $F_3$ fraksiyonu konsantrasyonları ortalaması 3,53 ± 0,62 µg/g bulunmuştur. Son olarak tarım toprakları örneklerinin $F_4$ fraksiyonu konsantrasyonları 15,49 µg/g ile 41,31 µg/g arasında değişiklik göstermiştir. Örneklerin $F_4$ fraksiyonu ortalaması 24,54 ± 5,83 µg/g olarak tespit edilmiştir.

Tablo 23

Tarım topraklarının Cu elementine ait jeokimyasal fraksiyonlar konsantrasyonları (μg/g)

| Örnek | $F_1$ | $F_2$ | $F_3$ | $F_4$ | Mobil ($F_{1+2+3}$) | ∑F ($F_{1+2+3+4}$) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **T1** | 2,21 | 3,75 | 2,98 | 21,84 | 8,94 | 30,79 |
| **T2** | 2,80 | 3,65 | 2,65 | 20,10 | 9,10 | 29,20 |
| **T3** | 2,35 | 3,65 | 2,54 | 20,04 | 8,53 | 28,57 |
| **T4** | 2,78 | 8,22 | 3,65 | 28,00 | 14,65 | 42,65 |
| **T5** | 2,70 | 8,05 | 2,88 | 24,21 | 13,63 | 37,84 |
| **T6** | 3,16 | 5,95 | 3,82 | 24,78 | 12,92 | 37,70 |
| **T7** | 2,34 | 6,66 | 4,15 | 38,26 | 13,15 | 51,40 |
| **T8** | 3,20 | 4,53 | 3,01 | 21,30 | 10,74 | 32,04 |
| **T9** | 2,54 | 7,09 | 3,72 | 25,54 | 13,35 | 38,89 |
| **T10** | 2,34 | 6,03 | 3,18 | 21,24 | 11,55 | 32,79 |
| **T11** | 3,41 | 4,86 | 3,57 | 21,68 | 11,84 | 33,51 |
| **T12** | 3,36 | 4,22 | 3,20 | 22,80 | 10,78 | 33,57 |
| **T13** | 2,46 | 5,14 | 3,37 | 19,89 | 10,98 | 30,86 |
| **T14** | 2,71 | 6,35 | 4,60 | 25,27 | 13,66 | 38,93 |
| **T15** | 2,64 | 6,52 | 3,32 | 18,64 | 12,48 | 31,12 |
| **T16** | 3,00 | 6,29 | 3,66 | 41,31 | 12,95 | 54,26 |
| **T17** | 3,40 | 5,62 | 3,40 | 24,67 | 12,41 | 37,08 |
| **T18** | 3,11 | 6,78 | 4,09 | 23,29 | 13,99 | 37,28 |
| **T19** | 2,89 | 7,16 | 5,15 | 34,14 | 15,20 | 49,34 |
| **T20** | 3,60 | 7,53 | 3,52 | 26,48 | 14,65 | 41,13 |
| **T21** | 3,25 | 5,70 | 3,67 | 22,20 | 12,62 | 34,81 |
| **T22** | 3,58 | 7,32 | 4,23 | 26,29 | 15,13 | 41,42 |
| **T23** | 2,82 | 4,03 | 2,57 | 15,49 | 9,43 | 24,91 |
| **T24** | 3,11 | 4,11 | 3,72 | 21,54 | 10,94 | 32,47 |
| **En düşük** | 2,21 | 3,65 | 2,54 | 15,49 | 8,53 | 24,91 |
| **En yüksek** | 3,60 | 8,22 | 5,15 | 41,31 | 15,20 | 54,26 |
| **Ortalama** | 2,91 | 5,80 | 3,53 | 24,54 | 12,23 | 36,77 |
| **Standart sapma** | 0,41 | 1,41 | 0,62 | 5,83 | 1,93 | 7,11 |
| **% Dağılım** | 7,90 | 15,77 | 9,59 | 66,73 | 33,27 | 100,00 |




Şekil 21. Tarım topraklarının Cu elementine ait ağır metal fraksiyonları ve yüzde dağılımları.

Tarım topraklarında Cu'nun mobil fraksiyon ($F_{1+2+3}$) oranı %33,27 olarak hesaplanmıştır. Mobil fraksiyonlar arasında en yüksek oranı %15,77 ile $F_2$ fraksiyonu oluşturmaktadır. Tarım alanlarından alınan örneklerin mobil fraksiyon dağılımının doğal alanlara göre farklılaştığı görülmektedir. Doğal alanlardan alınan örneklerde daha baskın olan mobil fraksiyon $F_3$ fraksiyonu olurken tarım alanlarından alınan örneklerde $F_2$ fraksiyonu olmuştur. Szteke ve Kabata-Pendias (2015), Cu elementinin hareketliliğini etkileyen ana değişkenlerden birinin ayrışmış organik madde olduğunu bildirmiştir. Çalışma kapsamında elde edilen bu sonucun tarımsal faaliyetler (toprak işleme, pestisit, ilaç, sulama vb.) ile organik maddenin ayrışması sonucu mobil hale gelen Cu elementinin Fe-Mn oksitler tarafından adsorbe edilmesi olabileceği düşünülmektedir. Tarım alanlarındaki $F_4$ fraksiyonu oranı %66,73 bulunmuştur. Elde edilen bu sonuç Cu elementinin ana materyal etkisi ile birlikte antropojenik etkilerin de etkili olduğunu göstermektedir. Bunula birlikte Cu elementinin ∑F konsantrasyonunun (36,77 ± 7,11 µg/g) tarım toprakları için kullanılan yaygın değerlerin üzerinde olduğu görülmüştür. Bu sonucun Cu elementinin uzun vadede kirlilik riskik ortaya koyabileceğini işaret ettiği düşünülmüştür.

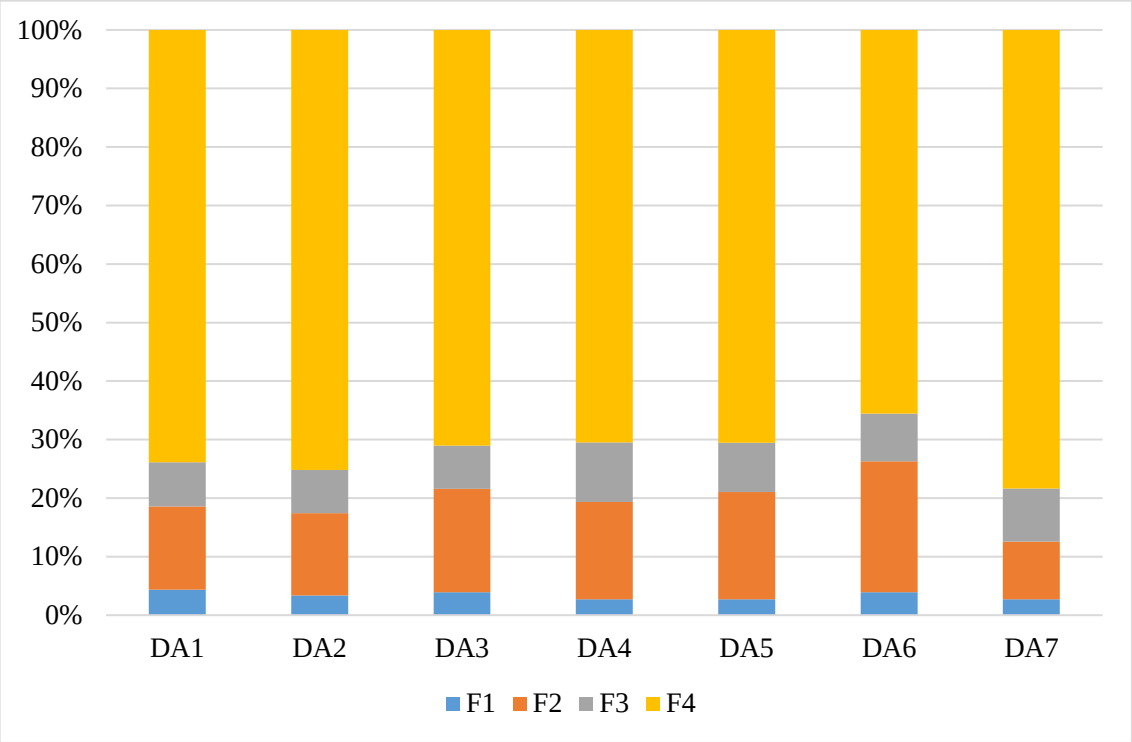
### 4.4.5. Nikel (Ni)

Çalışma kapsamında doğal alanlardan alınan toprak örneklerinin Ni elementine ait BCR ardışık ekstraksiyon yöntemi sonucunda elde edilen fraksiyon konsantrasyonları ve bunların yüzde dağılımları Tablo 24 ve Şekil 22'te verilmiştir. Örneklerde Ni'in $F_1$ fraksiyonu konsantrasyonları 26,54 µg/g ile 67,88 µg/g aralığında ve ortalama 44,25 ± 13,02 µg/g olarak tespit edilmiştir. $F_2$ fraksiyonu konsantrasyonlarının 115,29 ile 266,34 µg/g arasında değişiklik gösterdiği ve ortalama 205,16 ± 45,51 µg/g olduğu tespit edilmiştir. Tablo 19 incelendiğinde örneklerin $F_3$ fraksiyonları 81,99 - 132,93 µg/g arasında değişiklik göstermiştir. Bu fraksiyonun konsantrasyonları ortalaması 14,77 ± 8,26 µg/g bulunmuştur. $F_4$ fraksiyonu konsantrasyonları 684,35 - 1143,50 µg/g aralığında olduğu tespit edilirken $F_4$ fraksiyonu ortalama 143,47 ± 72,25 µg/g bulunmuştur. Doğal alanlardan alınan örneklerin mobil fraksiyon ($F_{1+2+3}$) oranı %27.5 olarak hesaplanmıştır. Mobil fraksiyon ($F_{1+2+3}$) göz önünde bulundurulduğunda $F_2$ fraksiyonu %16,3 oranla diğer iki fraksiyondan farklılaşmıştır. Bu durum Ni elementinin Fe-Mn oksitler tarafından adsorbe edilmiş veya serbest oksitlerle çökelmiş olabileceğine işaret etmiştir. Örneklerin $F_4$ fraksiyonu oranı %72,25 bulunmuştur. Bu durum örneklerin çevre jeolojisinden etkilendiğini açık bir şekilde yansıtmıştır.

Tablo 24

Doğal alan topraklarının Ni elementine ait jeokimyasal fraksiyonlar konsantrasyonları (µg/g)

| Örnek | $F_1$ | $F_2$ | $F_3$ | $F_4$ | Mobil ($F_{1+2+3}$) | ∑F ($F_{1+2+3+4}$) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **DA1** | 67,68 | 220,32 | 117,00 | 1143,50 | 405,00 | 1548,50 |
| **DA2** | 46,84 | 196,08 | 102,30 | 1047,00 | 345,22 | 1392,22 |
| **DA3** | 54,00 | 243,33 | 102,00 | 977,50 | 399,33 | 1376,83 |
| **DA4** | 35,78 | 217,26 | 132,93 | 920,50 | 385,97 | 1306,47 |
| **DA5** | 26,54 | 177,51 | 81,99 | 684,35 | 286,04 | 970,39 |
| **DA6** | 46,68 | 266,34 | 97,32 | 781,00 | 410,34 | 1191,34 |
| **DA7** | 32,23 | 115,29 | 106,32 | 919,50 | 253,84 | 1173,34 |
| **En düşük** | 26,54 | 115,29 | 81,99 | 684,35 | 253,84 | 970,39 |
| **En yüksek** | 67,68 | 266,34 | 132,93 | 1143,50 | 410,34 | 1548,50 |
| **Ortalama** | 44,25 | 205,16 | 105,69 | 924,76 | 355,10 | 1279,87 |
| **Standart sapma** | 13,02 | 45,51 | 14,77 | 143,47 | 58,03 | 173,15 |
| **% Dağılım** | 3,46 | 16,03 | 8,26 | 72,25 | 27,75 | 100,00 |



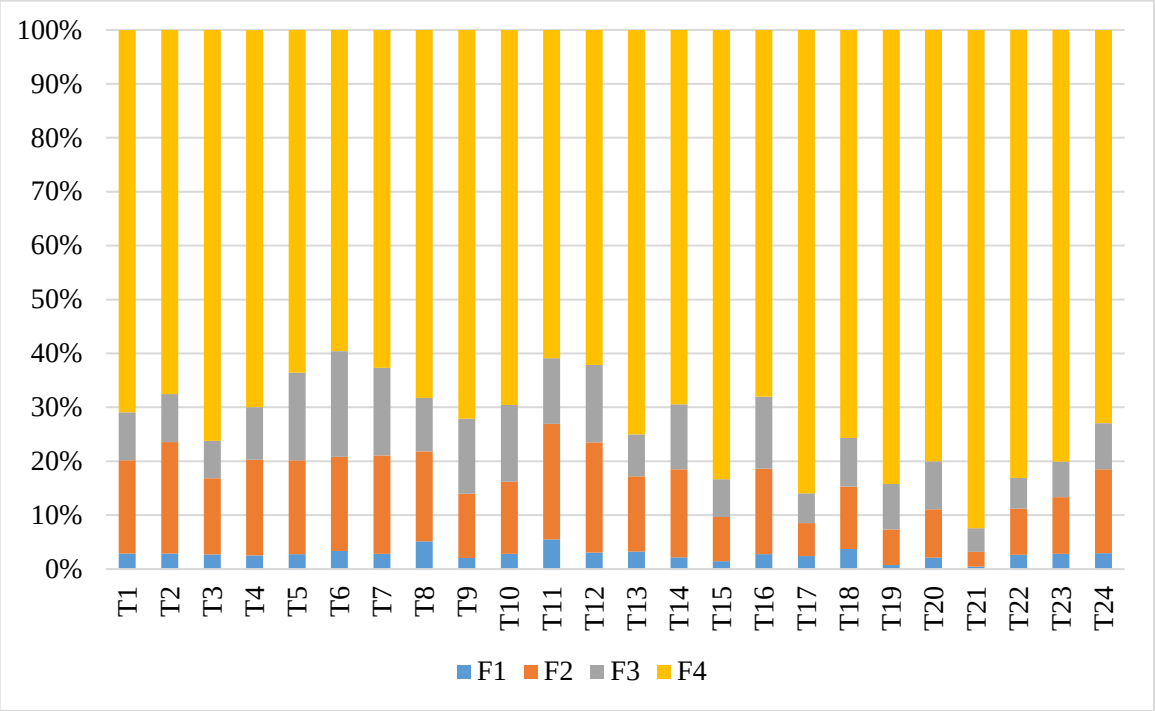

Şekil 22. Doğal alan topraklarının Ni elementine ait ağır metal fraksiyonları ve yüzde dağılımları.

Çalışma kapsamında tarım topraklarından alınan örneklerinin Ni elementine ait BCR ardışık ekstraksiyon yöntemi sonucunda elde edilen fraksiyon konsantrasyonları ve bunların yüzdesel dağılımları Tablo 25 ve Şekil 23'te verilmiştir. Örneklerin $F_1$ fraksiyonu konsantrasyonları en düşük 2,60 µg/g en yüksek 70,00 µg/g, ortalamaları ise 20,85 ± 17,31 µg/g bulunmuştur. Tablo 25 incelendiğinde örneklerin $F_2$ fraksiyonu konsantrasyonları 18,34 - 179,82 µg/g aralığında ve ortalama 91,80 ± 58,59 µg/g olduğu tespit edilmiştir. Örneklerin $F_3$ fraksiyonu konsantrasyonları 18,64 - 162,45 µg/g, ortalaması ise 64,50 ± 40,85 µg/g olarak bulunmuştur. $F_4$ fraksiyonu konsantrasyonları en düşük 72,70 µg/g, en düşük 2516,50 µg/g olurken $F_4$ fraksiyonu konsantrasyonları ortalaması 641,14 ± 568,80 µg/g olarak bulunmuştur.

Tablo 25

Tarım topraklarının Ni elementine ait jeokimyasal fraksiyonlar konsantrasyonları (µg/g)

| Örnek | $F_1$ | $F_2$ | $F_3$ | $F_4$ | Mobil ($F_{1+2+3}$) | ∑F ($F_{1+2+3+4}$) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **T1** | 13,80 | 81,84 | 42,15 | 336,15 | 137,79 | 473,94 |
| **T2** | 22,55 | 161,25 | 69,48 | 527,50 | 253,28 | 780,78 |
| **T3** | 27,23 | 140,40 | 68,76 | 758,00 | 236,39 | 994,39 |
| **T4** | 11,52 | 81,45 | 44,76 | 320,90 | 137,73 | 458,63 |
| **T5** | 3,20 | 19,89 | 18,64 | 72,70 | 41,73 | 114,43 |
| **T6** | 4,97 | 25,99 | 29,18 | 88,60 | 60,13 | 148,73 |
| **T7** | 6,86 | 44,49 | 39,75 | 152,80 | 91,10 | 243,90 |
| **T8** | 41,76 | 134,91 | 80,07 | 551,50 | 256,74 | 808,24 |
| **T9** | 3,19 | 18,34 | 21,38 | 111,00 | 42,91 | 153,91 |
| **T10** | 4,06 | 19,41 | 20,56 | 100,70 | 44,04 | 144,74 |
| **T11** | 15,53 | 60,60 | 34,38 | 172,00 | 110,51 | 282,51 |
| **T12** | 7,65 | 50,79 | 35,76 | 154,55 | 94,20 | 248,75 |
| **T13** | 40,16 | 173,58 | 96,42 | 930,50 | 310,16 | 1240,66 |
| **T14** | 13,30 | 98,52 | 72,66 | 419,25 | 184,48 | 603,73 |
| **T15** | 25,00 | 137,88 | 118,83 | 1406,00 | 281,71 | 1687,71 |
| **T16** | 5,99 | 34,65 | 29,12 | 148,25 | 69,76 | 218,01 |
| **T17** | 70,00 | 179,22 | 162,45 | 2516,50 | 411,67 | 2928,17 |
| **T18** | 36,57 | 113,19 | 88,74 | 742,00 | 238,50 | 980,50 |
| **T19** | 2,60 | 22,85 | 29,09 | 290,90 | 54,54 | 345,44 |
| **T20** | 36,74 | 157,08 | 156,84 | 1402,00 | 350,66 | 1752,66 |
| **T21** | 2,99 | 18,59 | 29,77 | 625,40 | 51,36 | 676,76 |
| **T22** | 25,59 | 81,48 | 55,11 | 795,75 | 162,18 | 957,93 |
| **T23** | 45,12 | 166,92 | 105,60 | 1274,50 | 317,64 | 1592,14 |
| **T24** | 33,95 | 179,82 | 98,40 | 842,00 | 312,17 | 1154,17 |
| **En düşük** | 2,60 | 18,34 | 18,64 | 72,70 | 41,73 | 114,43 |
| **En yüksek** | 70,00 | 179,82 | 162,45 | 2516,50 | 411,67 | 2928,17 |
| **Ortalama** | 20,85 | 91,80 | 64,50 | 614,14 | 177,14 | 791,28 |
| **Standart sapma** | 17,31 | 58,59 | 40,85 | 568,80 | 112,43 | 668,01 |
| **% Dağılım** | 2,63 | 11,60 | 8,15 | 77,61 | 22,39 | 100,00 |




Şekil 23. Tarım topraklarının Ni elementine ait ağır metal fraksiyonları ve yüzde dağılımları.

Örneklerin mobil fraksiyon ($F_{1+2+3}$) oranı %22,39 olarak hesaplanmıştır. Mobil fraksiyonlar göz önünde bulundurulduğunda $F_2$ fraksiyon oranı %11,60 ile öne çıkmaktadır. Bu durum Ni elementinin Fe-Mn oksitler tarafından adsorbe edildiğine işaret etmektedir. Diğer yandan, örneklerde Ni'in $F_4$ fraksiyonu ortalaması %77,61 bulunmuştur. Antić-Mladenović vd., (2011), yaptıkları çalışmada Ni'in esas olarak $F_4$ fraksiyonunda (%91,3) bulunduğunu ve diğer fraksiyonların $F_2 > F_3 > F_1$ sıralamasını izlediğini tespit etmiştir. Rinklebe vd., (2016) Sırbistan'daki Morava Nehri Vadisi'nde bulunan ultramafik topraklarda Ni'in esas olarak kalıntı fraksiyonunda (F4) tutulduğunu tespit etmiştir. Çalışma kapsamında elde edilen sonuçlar benzer çalışmalarla uyumlu olup Ni elementinin ana materyalin özelliklerini yansıttığını açık bir şekilde ortaya koymuştur. Çalışma kapsamında alınan 21 nolu örnekleme noktasında (Şekil 5) Ni konsantrasyonu F4 fraksiyonunda diğer örneklere göre daha yüksek bulunmuştur. Bunun temel nedeninin sonradan tarıma açılması ve nispeten daha sığ olması ile buna bağlı olarak yetersiz ayrışma ve dönüşüm süreçlerinden kaynaklanabileceği düşünülmüştür.

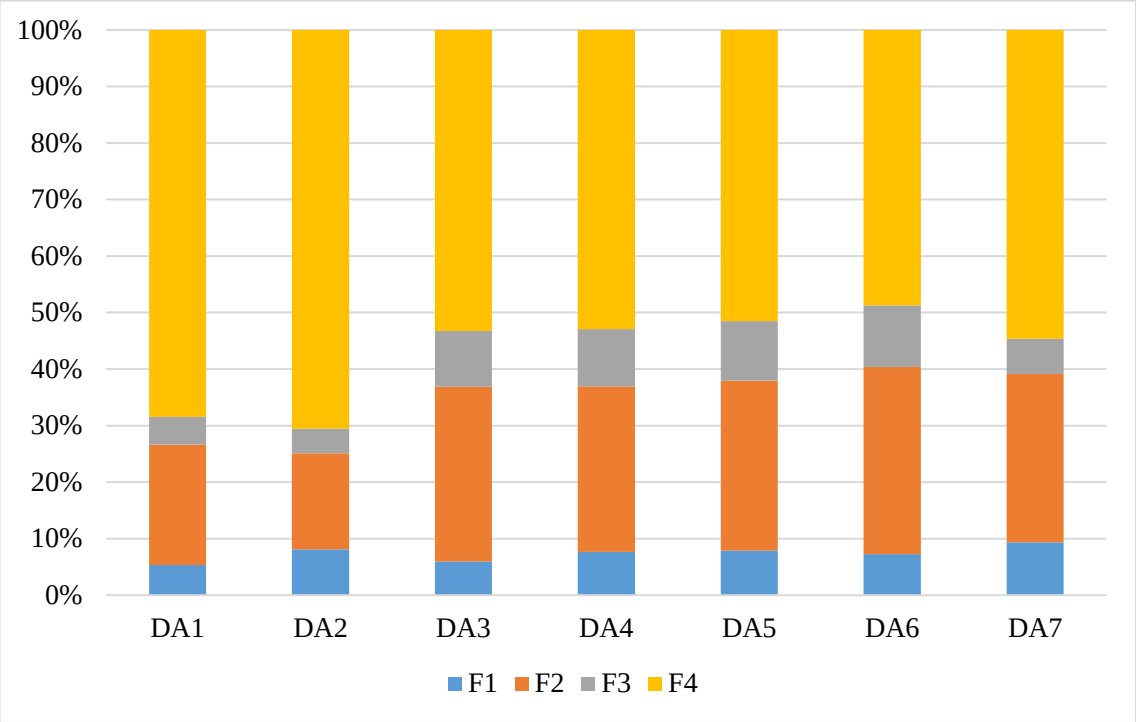
### 4.4.6. Kurşun (Pb)

Çalışma kapsamında doğal alanlardan alınan örneklerin Pb elementine ait BCR ardışık ekstraksiyon yöntemi sonucunda elde edilen fraksiyon konsantrasyonları ve bunların yüzde dağılımları Tablo 26 ve Şekil 24'te verilmiştir. Tablo 26 incelendiğinde örneklerin $F_1$ fraksiyonu konsantrasyonlarının en düşük 1,15 µg/g en yüksek ise 2,66 µg/g olarak belirlenmiştir. $F_1$ fraksiyonu konsantrasyonları ortalaması 2,12 ± 0,51 µg/g olarak bulunmuştur. Örneklerin $F_2$ fraksiyonu konsantrasyonlarının 4,34 - 10,92 µg/g arasında değiştiği ve ortalama 7,98 ± 2,47 µg/g olduğu tespit edilmiştir. $F_3$ fraksiyonu konsantrasyonları 1,06 - 3,58 µg/g arasında değişmektedir. Örneklerin ortalama $F_3$ fraksiyonu konsantrasyonu 2,43 ± 1,07 µg/g bulunmuştur. Örneklerde Pb elementinin $F_4$ fraksiyonundaki konsantrasyonları ise 13,67 - 18,39 µg/g arasında değişmiş ve ortalama 16,06 ± 1,69 µg/g olarak tespit edilmiştir. Bununla birlikte Pb elementinin mobilitesi ($F_{1+2+3}$) %43,83 olarak belirlenmiştir. Pb konsantrasyonlarının $F_4$ fraksiyonundaki oranı ise %56,7 bulunmuştur. Pb elementinin mobil fraksiyonlardan özellikle $F_2$ fraksiyonundan yoğunlaştığı görülmüştür. Bu durum F4 fraksiyonu ile beraber F2 fraksiyonunun ikincil bir birikimi yansıtabileceğini göstermektedir.

Tablo 26

Doğal alan topraklarının Pb elementine ait jeokimyasal fraksiyonlar konsantrasyonları (µg/g)

| Örnek | $F_1$ | $F_2$ | $F_3$ | $F_4$ | Mobil ($F_{1+2+3}$) | ∑F ($F_{1+2+3+4}$) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **DA1** | 1,15 | 4,58 | 1,06 | 14,73 | 6,79 | 21,52 |
| **DA2** | 2,06 | 4,34 | 1,11 | 18,01 | 7,52 | 25,53 |
| **DA3** | 1,63 | 8,42 | 2,69 | 14,52 | 12,75 | 27,27 |
| **DA4** | 2,66 | 10,19 | 3,52 | 18,39 | 16,37 | 34,76 |
| **DA5** | 2,61 | 9,95 | 3,49 | 17,03 | 16,05 | 33,08 |
| **DA6** | 2,39 | 10,92 | 3,58 | 16,05 | 16,89 | 32,94 |
| **DA7** | 2,34 | 7,46 | 1,56 | 13,67 | 11,35 | 25,02 |
| **En düşük** | 1,15 | 4,34 | 1,06 | 13,67 | 6,79 | 21,52 |
| **En yüksek** | 2,66 | 10,92 | 3,58 | 18,39 | 16,89 | 34,76 |
| **Ortalama** | 2,12 | 7,98 | 2,43 | 16,06 | 12,53 | 28,59 |
| **Standart sapma** | 0,51 | 2,47 | 1,07 | 1,69 | 3,88 | 4,64 |
| **% Dağılım** | 7,42 | 27,92 | 8,50 | 56,17 | 43,83 | 100,00 |




Şekil 24. Doğal alan topraklarının Pb elementine ait ağır metal fraksiyonları ve yüzde dağılımları.

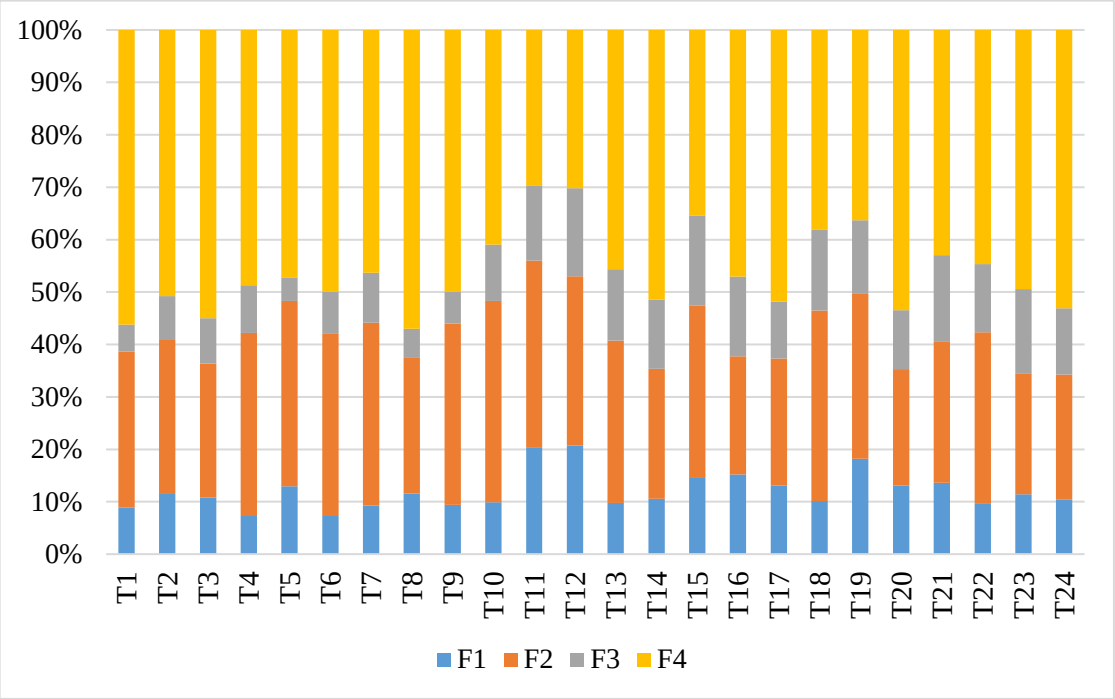
Çalışma kapsamında tarım topraklarından alınan örneklerin Pb elementine ait BCR ardışık ekstraksiyon yöntemi sonucunda elde edilen fraksiyon konsantrasyonları ve bunların yüzde dağılımları Tablo 27 ve Şekil 25'te verilmiştir. Tarım toprakları örneklerinin $F_1$ fraksiyonu konsantrasyonları 2,12 - 4,67 µg/g, ortalaması ise 3,41 ± 0,77 µg/g olarak belirlenmiştir. Örneklere ait $F_2$ fraksiyonu konsantrasyonları en düşük 3,37 ve en yüksek 15,19 µg/g olup ortalaması 8,89 ± 2,66 µg/g olarak tespit edilmiştir. Tablo 25 incelendiğinde Pb elementinin $F_3$ fraksiyonuna ait konsantrasyonları 1,21 µg/g ile 5,51 µg/g aralığında ve ortalama 3,33 ± 1,27 µg/g olarak belirlenmiştir. Tarım toprakları örneklerinde Pb'nun $F_4$ fraksiyonuna ait konsantrasyonları 6,43 - 21,98 µg/g tespit edilmiştir. Bununla birlikte $F_4$ fraksiyonu ortalaması ise 13,66 ± 4,01 µg/g bulunmuştur.

.

Tablo 27

Tarım topraklarının Pb elementine ait jeokimyasal fraksiyonlar konsantrasyonları (μg/g)

| Örnek | $F_1$ | $F_2$ | $F_3$ | $F_4$ | Mobil ($F_{1+2+3}$) | ∑F ($F_{1+2+3+4}$) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **T1** | 2,12 | 7,04 | 1,21 | 13,33 | 10,37 | 23,70 |
| **T2** | 2,80 | 7,17 | 2,04 | 12,40 | 12,01 | 24,41 |
| **T3** | 2,57 | 6,08 | 2,07 | 13,08 | 10,72 | 23,80 |
| **T4** | 2,62 | 12,24 | 3,20 | 17,15 | 18,05 | 35,20 |
| **T5** | 4,59 | 12,52 | 1,56 | 16,75 | 18,67 | 35,42 |
| **T6** | 3,29 | 15,19 | 3,54 | 21,98 | 22,02 | 44,00 |
| **T7** | 3,00 | 11,30 | 3,08 | 15,01 | 17,38 | 32,39 |
| **T8** | 2,64 | 5,94 | 1,28 | 13,08 | 9,86 | 22,94 |
| **T9** | 2,74 | 10,06 | 1,78 | 14,54 | 14,58 | 29,12 |
| **T10** | 2,81 | 10,89 | 3,06 | 11,60 | 16,75 | 28,35 |
| **T11** | 4,67 | 8,15 | 3,28 | 6,78 | 16,09 | 22,88 |
| **T12** | 4,42 | 6,88 | 3,59 | 6,43 | 14,88 | 21,32 |
| **T13** | 2,66 | 8,41 | 3,70 | 12,40 | 14,77 | 27,17 |
| **T14** | 4,04 | 9,48 | 5,05 | 19,70 | 18,57 | 38,26 |
| **T15** | 4,03 | 9,10 | 4,76 | 9,81 | 17,89 | 27,70 |
| **T16** | 2,27 | 3,37 | 2,28 | 7,04 | 7,92 | 14,95 |
| **T17** | 3,62 | 6,72 | 3,01 | 14,37 | 13,35 | 27,72 |
| **T18** | 3,03 | 10,85 | 4,59 | 11,38 | 18,47 | 29,85 |
| **T19** | 4,58 | 7,91 | 3,54 | 9,13 | 16,02 | 25,15 |
| **T20** | 3,53 | 6,01 | 3,03 | 14,44 | 12,57 | 27,01 |
| **T21** | 4,22 | 8,33 | 5,06 | 13,28 | 17,61 | 30,89 |
| **T22** | 3,80 | 13,01 | 5,16 | 17,76 | 21,97 | 39,73 |
| **T23** | 3,93 | 7,93 | 5,51 | 16,99 | 17,37 | 34,36 |
| **T24** | 3,81 | 8,78 | 4,66 | 19,52 | 17,25 | 36,77 |
| **En düşük** | 2,12 | 3,37 | 1,21 | 6,43 | 7,92 | 14,95 |
| **En yüksek** | 4,67 | 15,19 | 5,51 | 21,98 | 22,02 | 44,00 |
| **Ortalama** | 3,41 | 8,89 | 3,33 | 13,66 | 15,63 | 29,30 |
| **Standart sapma** | 0,77 | 2,66 | 1,27 | 4,01 | 3,58 | 6,59 |
| **% Dağılım** | 11,63 | 30,34 | 11,38 | 46,64 | 53,36 | 100,00 |




Şekil 25. Tarım topraklarının Pb elementine ait ağır metal fraksiyonları ve yüzde dağılımları.

Bununla birlikte Pb elementinin mobilitesi ($F_{1+2+3}$) %53,36 olarak hesaplanmıştır. Örnek noktaları incelendiğinde özellikle T11, T12, T15, T18 ve T19 numaraları örneklerin mobil fraksiyonlarının diğer örnek noktalarından farklılaştığı görülmektedir. Bu örnek noktaları incelendiğinde, T18 hariç diğer örnek noktalarının trafik etkisi altında olduğu görülmüştür. Özellikle T11 ve T12 numaralı örnek noktaları Çanakkale- Ezine karayolu kenarında olup yoğun trafik etkisi altında olduğu gözlemlenmiştir (Şekil 5). T19 numaralı örnek tepe sırtının vadiye bakan kısmında alınmıştır (Şekil 9). Şekil 9'da görüldüğü gibi örnekleme noktasının tam karşısında yakın mesafede maden ocağı bulunmaktadır. Hava hareketlerine bağlı etkileşimin söz konusu olduğu bu ortamda kurşun değerlerinin diğer örneklerden farklılaşması beklenenden bir sonuçtur. Daha önce yapılan çalışmalar da madencilik, tarımsal faaliyetler ve egzoz emisyonları aracılığıyla mobilize olmuş Pb elementinin toprakta birikime neden olabileceğini bildirilmiştir (Temel vd., 2024; Olowoyo vd., 2022). Pb elementinin ekstrakte edilebilir oranları göz önüne alındığında, mobil fraksiyonlarının artakalan fraksiyondan daha yüksek olduğu ve bunun antropojenik etkilerin bir sonucu olduğu sonucuna varılmıştır. Bununla birlikte Pb elementinin ∑F konsantrasyonu 29,30±6,59 µg/g ile tarım arazilerinde yaygın kullanılan değerlerin üst sınırı olan 30 µg/g'a

çok yakın olduğu görülmektedir. Elde edilen bu sonuçlar Pb elementinin potansiyel çevresel risk oluşturabileceğine işaret etmektedir.

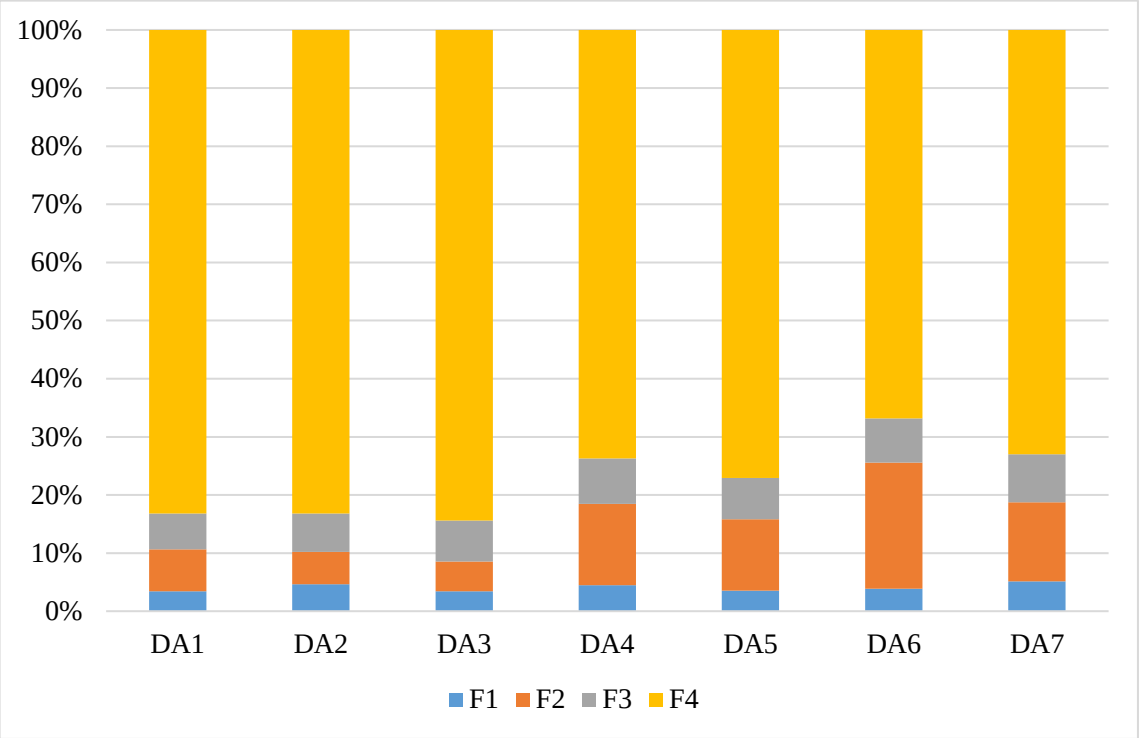
### 4.4.7. Çinko (Zn)

Çalışma kapsamında doğal alanlardan alınan toprak örneklerin Zn elementine ait BCR ardışık ekstraksiyon yöntemi sonucunda elde edilen fraksiyon konsantrasyonları ve bunların yüzde dağılımları Tablo 28 ve Şekil 26'de verilmiştir. Tablo 28 incelendiğinde örneklerde Zn'nin $F_1$ fraksiyonu konsantrasyonları en düşük 2,06 µg/g en yüksek ise 3,36 µg/g ve ortalama 2,60 ± 0,54 µg/g bulunmuştur. Diğer yandan örneklerde Zn'nin $F_2$ fraksiyonu konsantrasyonları 3,09 - 18,75 µg/g aralığında, ortalaması 7,82 ± 5,04 µg/g olarak bulunmuştur. $F_3$ fraksiyonu konsantrasyonları 3,78 - 6,53 µg/g aralığında ve ortalama 4,74 ± 0,92 µg/g'dır. Son olarak toprak örneklerinde Zn'nin $F_4$ fraksiyonu konsantrasyonları 45,16 - 57,68 µg/g arasında değişiklik gösterirken $F_4$ fraksiyonu konsantrasyonları ortalaması ise 49,94 ± 3,70 µg/g olarak tespit edilmiştir. Bununla birlikte doğal alanlardan alınan topraklardaki Zn elementinin mobil fraksiyonu ($F_{1+2+3}$) oranı %23,36, $F_4$ fraksiyonu oranı ise %76,64 bulunmuştur.

Tablo 28

Doğal alan topraklarının Zn elementine ait jeokimyasal fraksiyonlar konsantrasyonları (µg/g)

| Örnek | $F_1$ | $F_2$ | $F_3$ | $F_4$ | Mobil ($F_{1+2+3}$) | ∑F ($F_{1+2+3+4}$) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **DA1** | 2,10 | 4,44 | 3,78 | 51,08 | 10,32 | 61,39 |
| **DA2** | 2,71 | 3,24 | 3,88 | 48,57 | 9,83 | 58,40 |
| **DA3** | 2,09 | 3,09 | 4,29 | 51,17 | 9,46 | 60,63 |
| **DA4** | 2,94 | 9,16 | 5,13 | 48,26 | 17,23 | 65,49 |
| **DA5** | 2,06 | 7,22 | 4,15 | 45,16 | 13,43 | 58,59 |
| **DA6** | 3,34 | 18,75 | 6,53 | 57,68 | 28,62 | 86,30 |
| **DA7** | 3,36 | 8,87 | 5,40 | 47,64 | 17,63 | 65,27 |
| **En düşük** | 2,06 | 3,09 | 3,78 | 45,16 | 9,46 | 58,40 |
| **En yüksek** | 3,36 | 18,75 | 6,53 | 57,68 | 28,62 | 86,30 |
| **Ortalama** | 2,65 | 7,82 | 4,74 | 49,94 | 15,22 | 65,15 |
| **Standart sapma** | 0,54 | 5,04 | 0,92 | 3,70 | 6,31 | 9,03 |
| **% Dağılım** | 4,07 | 12,01 | 7,27 | 76,64 | 23,36 | 100,00 |



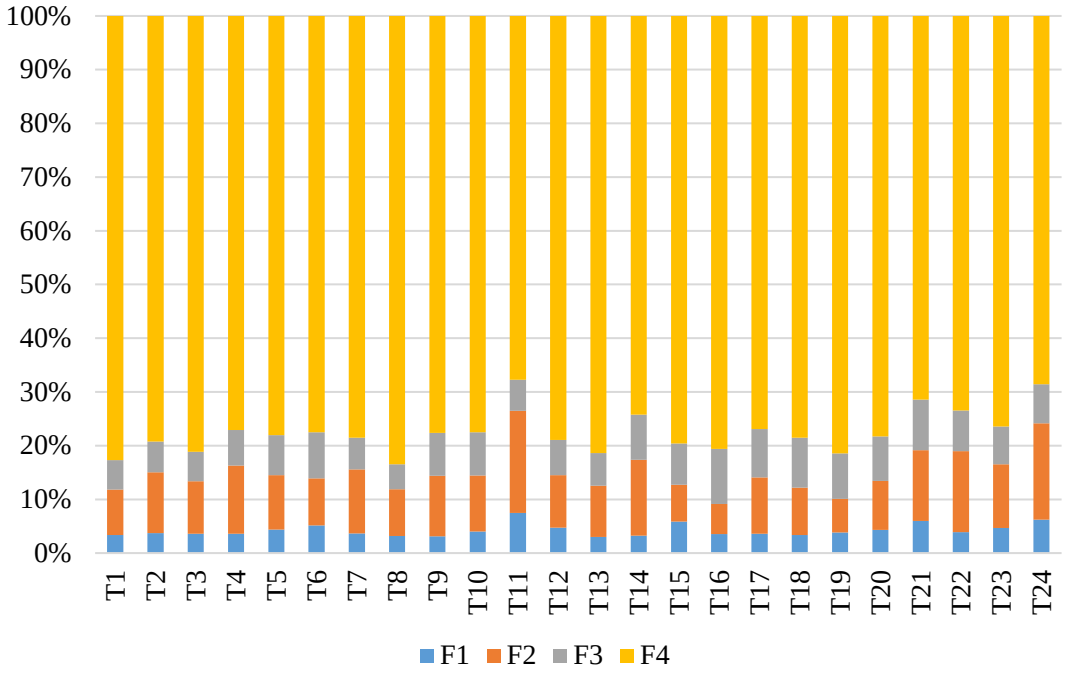

Şekil 26. Doğal alanlardan alınan toprakların Zn elementine ait ağır metal fraksiyonları ve yüzde dağılımları.

Çalışma kapsamında tarım topraklarından alınan örneklerinin Zn elementine ait BCR ardışık ekstraksiyon yöntemi sonucunda elde edilen fraksiyon konsantrasyonları ve bunların yüzde dağılımları Tablo 29 ve Şekil 27'de verilmiştir. Örneklerde Zn'nin $F_1$ fraksiyonu konsantrasyonları en düşük 2,15 µg/g en yüksek 5,05 µg/g, ortalamaları ise 3,01 ± 0,78 µg/g olarak bulunmuştur. Tablo 29 incelendiğinde örneklerdeki Zn'nin $F_2$ fraksiyonu konsantrasyonları 3,66 - 13,19 µg/g olarak tespit edilmiştir. $F_2$ fraksiyonu konsantrasyonları ortalaması 7,89 ± 2,76 µg/g bulunmuştur. $F_3$ fraksiyonu konsantrasyonları 3,30 - 7,20 µg/g arasında değişiklik göstermiştir. $F_3$ fraksiyonu ortalaması ise 5,27 ± 1,08 µg/g olarak bulunmuştur. $F_4$ fraksiyonu konsantrasyonları en düşük 45,64 µg/g en düşük 77,78 µg/g; $F_4$ fraksiyonu konsantrasyonları ortalaması ise 55,45 ± 6,83 µg/g olduğu tespit edilmiştir.

Tablo 29

Tarım topraklarının Zn elementine ait jeokimyasal fraksiyonlar konsantrasyonları (μg/g)

| Örnek | $F_1$ | $F_2$ | $F_3$ | $F_4$ | Mobil ($F_{1+2+3}$) | ∑F ($F_{1+2+3+4}$) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **T1** | 2,15 | 5,39 | 3,51 | 52,79 | 11,05 | 63,83 |
| **T2** | 2,46 | 7,52 | 3,81 | 52,63 | 13,79 | 66,42 |
| **T3** | 2,16 | 5,89 | 3,30 | 48,86 | 11,35 | 60,20 |
| **T4** | 2,90 | 10,33 | 5,34 | 62,51 | 18,57 | 81,08 |
| **T5** | 3,21 | 7,47 | 5,44 | 57,33 | 16,12 | 73,45 |
| **T6** | 3,61 | 6,14 | 5,99 | 54,25 | 15,74 | 69,99 |
| **T7** | 3,63 | 11,82 | 5,86 | 77,78 | 21,31 | 99,09 |
| **T8** | 2,39 | 6,52 | 3,48 | 62,50 | 12,40 | 74,90 |
| **T9** | 2,40 | 8,65 | 6,10 | 59,57 | 17,16 | 76,72 |
| **T10** | 2,48 | 6,40 | 4,96 | 47,68 | 13,84 | 61,52 |
| **T11** | 5,05 | 12,79 | 3,87 | 45,64 | 21,72 | 67,35 |
| **T12** | 3,08 | 6,34 | 4,26 | 51,32 | 13,68 | 65,00 |
| **T13** | 2,23 | 7,05 | 4,52 | 60,28 | 13,80 | 74,08 |
| **T14** | 2,78 | 12,05 | 7,20 | 63,39 | 22,04 | 85,43 |
| **T15** | 4,09 | 4,82 | 5,36 | 55,76 | 14,28 | 70,04 |
| **T16** | 2,29 | 3,66 | 6,69 | 52,51 | 12,64 | 65,15 |
| **T17** | 2,50 | 7,22 | 6,25 | 53,12 | 15,97 | 69,09 |
| **T18** | 2,38 | 6,32 | 6,63 | 56,10 | 15,33 | 71,43 |
| **T19** | 2,37 | 3,89 | 5,22 | 50,48 | 11,49 | 61,97 |
| **T20** | 2,95 | 6,17 | 5,64 | 53,17 | 14,76 | 67,93 |
| **T21** | 3,88 | 8,56 | 6,13 | 46,38 | 18,56 | 64,94 |
| **T22** | 3,20 | 12,45 | 6,26 | 60,61 | 21,91 | 82,51 |
| **T23** | 3,41 | 8,68 | 5,15 | 55,95 | 17,23 | 73,18 |
| **T24** | 4,55 | 13,19 | 5,36 | 50,36 | 23,10 | 73,46 |
| **En düşük** | 2,15 | 3,66 | 3,30 | 45,64 | 11,05 | 60,20 |
| **En yüksek** | 5,05 | 13,19 | 7,20 | 77,78 | 23,10 | 99,09 |
| **Ortalama** | 3,01 | 7,89 | 5,27 | 55,45 | 16,16 | 71,61 |
| **Standart sapma** | 0,78 | 2,76 | 1,08 | 6,83 | 3,62 | 8,64 |
| **% Dağılım** | 4,20 | 11,01 | 7,35 | 77,43 | 22,57 | 100,00 |




Şekil 27. Tarım topraklarının Zn elementine ait ağır metal fraksiyonları ve yüzde dağılımları.

Örneklerin mobil fraksiyon ($F_{1+2+3}$) oranı %22,57 olarak hesaplanmıştır. Mobil fraksiyonlar arasında $F_2$ fraksiyonu %11,01 ile en yüksek orana sahiptir. Fe/Mn oksitlere bağlı fraksiyon olan $F_2$ fraksiyonunda daha yüksek oranda bulunan Zn 'nin Fe/Mn oksitler tarafından adsorbe edilmesinden kaynaklandığı düşünülmüştür. Kabata-Pendias (2011), Al, Fe ve Mn oksitleri ve hidroksitlerinin topraklarda Zn'nin bağlanmasında önemli olduğunu bildirmiştir. Bununla birlikte fraksiyonlar arasında %77,43'lük oran ile $F_4$ fraksiyonu en baskın fraksiyon olmuştur. Bu durum Zn elementinin çevre jeolojisinin özelliklerini yansıttığını göstermektedir.

### 4.5. Toprak Özellikleri ile Ağır Metallerin Jeokimyasal Fraksiyonları Arasındaki İlişki

Doğal alanlardan alınan topraklara ait fiziko-kimyasal özellikleri (pH, kireç/$CaCO_3$, organik madde/OM ve kil değerleri) ile ağır metallerin jeokimyasal fraksiyonları arasındaki ilişkiyi belirlemek için verilere Pearson korelasyonu uygulanmıştır. Elde edilen korelasyon katsayıları Tablo 30'da sunulmuştur.

Tablo 30

Doğal alan topraklarının fiziko-kimyasal özellikleri ile ağır metallerin fraksiyonlarının korelasyonu

| Metal | Toprak özelliği | Fraksiyonlar | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | $F_1$ | $F_2$ | $F_3$ | $F_4$ | $F_{1+2+3}$ | ∑F |
| Cd | pH | 0,661 | -0,439 | -0,496 | 0,205 | -0,304 | -0,165 |
| | % $CaCO_3$ | -0,446 | 0,299 | 0,199 | -0,176 | 0,163 | -0,015 |
| | % OM | -0,637 | 0,448 | 0,660 | -0,479 | 0,373 | -0,159 |
| | % Kil | 0,382 | 0,033 | 0,264 | -0,290 | 0,244 | -0,066 |
| Co | pH | -0,408 | 0,630 | -0,681 | 0,690 | 0,095 | 0,667 |
| | % $CaCO_3$ | 0,222 | -0,032 | -0,157 | -0,317 | 0,078 | -0,289 |
| | % OM | **0,943*** | **-0,860*** | **0,969*** | -0,523 | 0,444 | -0,432 |
| | % Kil | 0,316 | -0,189 | 0,224 | 0,189 | 0,259 | 0,216 |
| Cr | pH | -0,122 | -0,426 | -0,271 | 0,651 | -0,331 | 0,592 |
| | % $CaCO_3$ | 0,396 | 0,312 | 0,387 | -0,192 | 0,36 | -0,138 |
| | % OM | 0,649 | **0,760*** | 0,680 | -0,009 | 0,722 | 0,093 |
| | % Kil | 0,452 | 0,368 | 0,429 | 0,651 | 0,41 | 0,697 |
| Cu | pH | -0,038 | 0,177 | -0,268 | -0,247 | -0,156 | -0,245 |
| | % $CaCO_3$ | -0,111 | 0,293 | 0,679 | 0,252 | 0,557 | 0,372 |
| | % OM | 0,355 | 0,175 | 0,392 | -0,196 | 0,448 | -0,02 |
| | % Kil | 0,392 | 0,642 | -0,396 | -0,031 | 0,019 | -0,019 |
| Ni | pH | **0,864*** | 0,864 | 0,511 | -0,112 | 0,566 | 0,533 |
| | % $CaCO_3$ | 0,037 | 0,590 | -0,475 | -0,487 | 0,35 | -0,286 |
| | % OM | -0,535 | -0,327 | 0,376 | -0,302 | -0,281 | -0,344 |
| | % Kil | -0,108 | **-0,765*** | -0,032 | 0,125 | -0,633 | -0,109 |
| Pb | pH | **-0,821*** | -0,373 | -0,335 | -0,459 | -0,438 | -0,533 |
| | % $CaCO_3$ | 0,216 | 0,466 | 0,467 | 0,088 | 0,454 | 0,412 |
| | % OM | 0,636 | 0,471 | 0,285 | -0,009 | 0,462 | 0,383 |
| | % Kil | -0,180 | -0,284 | -0,474 | -0,713 | -0,336 | -0,541 |
| Zn | pH | -0,373 | -0,030 | -0,174 | 0,598 | -0,081 | 0,188 |
| | % $CaCO_3$ | 0,328 | 0,732 | 0,621 | **0,770*** | 0,703 | **0,807*** |
| | % OM | **0,876*** | 0,629 | **0,783*** | 0,068 | 0,692 | 0,511 |
| | % Kil | 0,080 | -0,132 | -0,063 | -0,347 | -0,108 | -0,217 |

**p<0,05 düzeyinde istatistiksel olarak anlamlı farklılıkları işaret etmektedir.

Tablo 30 incelendiğinde toprakların fiziko-kimyasal özellikleri ile Cd ve Cu'un jeokimyasal fraksiyonları arasında anlamlı bir ilişki bulunmamıştır. Tablo 30 incelendiğinde, toprakların pH, $CaCO_3$ ve kil içerikleri ile Co elementinin fraksiyonları arasında istatistiksel olarak anlamı bir ilişki bulunmamıştır. Toprakların OM içeriği ile Co'ın $F_1$ ve $F_3$ fraksiyonları arasında istatistiksel olarak pozitif, $F_2$ fraksiyonunda ise negatif yönde anlamlı bir ilişki olduğu tespit edilmiştir ($p<0,05$).

Doğal alan topraklarının fiziko-kimyasal özellikleri ile Cr elementinin her bir fraksiyonda bulunan konsantrasyonları arasındaki ilişki Tablo 30'da verilmiştir. Toprakların pH, $CaCO_3$ ve kil miktarları ile Cr elementinin her bir fraksiyonlardaki miktarları arasında istatistiksel olarak anlamlı bir ilişki bulunmamıştır. Örneklerin OM içeriği ile Cr'un $F_2$ fraksiyonunda bulunan konsantrasyonları arasında istatistiksel olarak pozitif yönlü anlamlı bir ilişki olduğu tespit edilmiştir ($p<0,05$).

Doğan alan topraklarının fiziko-kimyasal özellikleri ile Ni elementinin jeokimyasal fraksiyonları arasındaki ilişki Tablo 30'da sunulmuştur. Tablo 30 incelendiğinde, toprakların $CaCO_3$ ve OM miktarları ile Ni elementinin fraksiyonları arasında istatistiksel olarak anlamlı bir ilişki bulunmamıştır. Toprakların pH değeri ile Ni'nin $F_1$ fraksiyonu arasında istatistiksel olarak pozitif, kil miktarları ve $F_2$ fraksiyonu arasında ise negatif yönde anlamlı bir ilişki olduğu tespit edilmiştir ($p<0,05$).

Doğal alan topraklarının fiziko-kimyasal özellikleri ile Pb elementinin fraksiyonlarda bulunan konsantrasyonları arasındaki ilişki Tablo 30'da sunulmuştur. Toprakların $CaCO_3$, OM ve kil miktarları ile Pb elementinin fraksiyonları arasında anlamlı bir ilişki bulunmamıştır. Toprak pH'sı ile Pb elementinin $F_1$ fraksiyon arasında istatistiksel olarak negatif yönde anlamlı bir ilişki tespit edilmiştir ($p<0,05$).

Doğal alan topraklarının pH, $CaCO_3$, OM ve kil miktarlarının Zn elementinin fraksiyonlarda bulunan konsantrasyonları arasındaki ilişki Tablo 30'da verilmiştir. Tablo 30 incelendiğinde pH ile Zn elementinin fraksiyonları arasında istatistiksel olarak anlamlı bir ilişki bulunmamıştır. Örneklerin $CaCO_3$ miktarı ile Zn'nin $F_4$ ve $\sum F$ fraksiyonları ve OM miktarı ile Zn'nin $F_1$ ve $F_3$ fraksiyonları arasında istatistiksel olarak pozitif yönde bir ilişki tespit edilmiştir ($p<0,05$).

Tarım alanlarından alınan topraklara ait fiziko-kimyasal özellikleri (pH, kireç/$CaCO_3$, organik madde/OM ve kil değerleri) ile ağır metallerin jeokimyasal fraksiyonları arasındaki ilişkiyi belirlemek için verilere Pearson korelasyonu uygulanmıştır. Elde edilen korelasyon katsayıları Tablo 31'de sunulmuştur.

Tarım alanlarından alınan toprakların fiziko-kimyasal özellikleri ile Cr elementinin jeokimyasal fraksiyonları arasındaki ilişki Tablo 31'de verilmiştir. Toprakların pH ve $CaCO_3$ miktarları ile Cd elementinin fraksiyonları arasında istatistiksel olarak anlamlı bir ilişki bulunmamıştır. Toprak örneklerinin OM miktarları ile Cr'nin F3, F4 ve ∑F fraksiyonları ve kil miktarları ile F4 ve ∑F fraksiyonları arasında istatistiksel olarak pozitif düzeyde anlamlı bir ilişki olduğu tespit edilmiştir ($p<0,05$).

Tablo 31 incelendiğinde, tarım alanlarından alınan toprak örneklerinin $CaCO_3$ içerikleri ile Co'nun $F_2$ fraksiyonu arasında istatistiksel olarak anlamlı bir ilişki bulunmamıştır. Toprakların pH içerikleri ile Co elementinin $F_2$, $F_{1+2+3}$ ve ∑F fraksiyonları arasında istatistiksel olarak negatif düzeyde anlamlı bir ilişki olduğu tespit edilmiştir ($p<0,05$). Toprak örneklerinin OM miktarları ile Co elementinin her bir fraksiyonunda istatistiksel olarak pozitif düzeyde anlamlı bir ilişki bulunmuştur ($p<0,05$). Toprakların kil miktarları ile Co'nun $F_2$, $F_3$, $F_{1+2+3}$ ve ∑F fraksiyonları arasında istatistiksel olarak pozitif düzeyde anlamı bir ilişki olduğu tespit edilmiştir ($p<0,05$).

Tarım alanlarından alınan toprakların fiziko-kimyasal özellikleri ile Cr elementi fraksiyonları arasındaki ilişki Tablo 31'de sunulmuştur. Toprak pH'sı ile Cr'nin $F_2$ fraksiyonu arasında istatistiksel olarak negatif yönde anlamlı bir ilişki olduğu bulunmuştur ($p<0,05$). Toprakların $CaCO_3$ miktarı ile Cr elementinin fraksiyonları arasında istatistiksel olarak anlamlı bir ilişki tespit edilmemiştir. Örneklerin organik madde miktarı ile Cr'nin $F_4$ ve ∑F fraksiyonları arasında istatistiksel olarak pozitif yönde bir ilişki olduğu tespit edilmiştir ($p<0,05$). Toprak örneklerinin kil miktarı ile Cr'nin $F_2$, $F_4$ ve ∑F fraksiyonları arasında istatistiksel olarak pozitif yönde bir ilişkinin olduğu bulunmuştur ($p<0,05$).

Tablo 31

Tarım topraklarının fiziko-kimyasal özellikleri ile ağır metallerin fraksiyonlarının korelasyonu

| Metal | Toprak özelliği | Fraksiyonlar | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | **F1** | **F2** | **F3** | **F4** | **$F_{1+2+3}$** | **∑F** |
| **Cd** | pH | -0,095 | -0,077 | -0,246 | -0,387 | -0,168 | -0,352 |
| | % $CaCO_3$ | 0,172 | 0,024 | -0,033 | -0,304 | 0,097 | -0,159 |
| | % OM | 0,061 | 0,255 | **0,558*** | **0,712*** | 0,342 | **0,663*** |
| | % Kil | 0,292 | 0,276 | 0,182 | **0,479*** | 0,367 | **0,517*** |
| **Co** | pH | -0,294 | **-0,493*** | -0,512 | -0,543 | **-0,498*** | **-0,525*** |
| | % $CaCO_3$ | 0,165 | -0,302 | -0,309 | -0,279 | -0,271 | -0,276 |
| | % OM | **0,714*** | **0,642*** | **0,447*** | **0,648*** | **0,632*** | **0,644*** |
| | % Kil | 0,220 | **0,512*** | **0,597*** | **0,521*** | **0,523*** | **0,524*** |
| **Cr** | pH | -0,185 | **-0,465*** | -0,166 | -0,375 | -0,318 | -0,383 |
| | % $CaCO_3$ | -0,089 | 0,142 | 0,133 | -0,318 | 0,142 | -0,293 |
| | % OM | 0,173 | 0,234 | 0,308 | **0,525*** | 0,294 | **0,524*** |
| | % Kil | 0,184 | **0,408*** | 0,328 | **0,420*** | 0,387 | **0,431*** |
| **Cu** | pH | 0,016 | -0,026 | 0,057 | -0,121 | 0,003 | -0,099 |
| | % $CaCO_3$ | 0,325 | -0,196 | 0,108 | -0,009 | -0,04 | -0,019 |
| | % OM | 0,128 | -0,365 | -0,055 | -0,208 | -0,256 | -0,241 |
| | % Kil | 0,119 | **0,443*** | 0,210 | 0,172 | **0,415*** | 0,254 |
| **Ni** | pH | -0,380 | -0,331 | **-0,450*** | **-0,490*** | -0,395 | **-0,484*** |
| | % $CaCO_3$ | -0,292 | -0,313 | -0,334 | -0,331 | -0,329 | -0,337 |
| | % OM | **0,752*** | **0,712*** | **0,649*** | **0,649*** | **0,723*** | **0,674*** |
| | % Kil | 0,493 | 0,352 | **0,568*** | **0,491*** | **0,466*** | **0,496*** |
| **Pb** | pH | 0,170 | 0,339 | 0,227 | 0,222 | 0,37 | 0,336 |
| | % $CaCO_3$ | **0,536*** | -0,093 | 0,044 | **-0,531*** | 0,062 | -0,289 |
| | % OM | 0,095 | -0,359 | 0,322 | -0,048 | -0,132 | -0,101 |
| | % Kil | -0,095 | 0,132 | 0,079 | 0,361 | 0,106 | 0,277 |
| **Zn** | pH | 0,220 | **0,444*** | 0,006 | 0,181 | 0,388 | 0,305 |
| | % $CaCO_3$ | 0,378 | 0,134 | -0,310 | -0,323 | 0,091 | -0,217 |
| | % OM | 0,026 | 0,021 | -0,113 | 0,013 | -0,012 | 0,005 |
| | % Kil | -0,251 | 0,007 | **0,514*** | **0,584*** | 0,105 | **0,505*** |

*p<0,05 düzeyinde istatistiksel olarak anlamlı farklılıkları işaret etmektedir.

Tarım alanlarından alınan toprakların fiziko-kimyasal özellikleri ile Cu elementi fraksiyonları arasındaki ilişki Tablo 31'de verilmiştir. Tarım yapılan topraklardan alınan örneklerin pH, $CaCO_3$, OM içerikleri ile Cu elementinin fraksiyonları arasında istatistiksel olarak anlamlı bir ilişki bulunmamıştır. Örneklerin kil içerikleri ile Cu elementinin $F_2$ ve mobil ($F_{1+2+3}$) fraksiyonları arasında istatistiksel olarak pozitif yönde bir ilişki olduğu tespit edilmiştir ($p<0,05$).

Tarım alanlarından alınan toprakların fiziko-kimyasal özellikleri ile Ni elementi fraksiyonları arasındaki ilişki Tablo 31'de verilmiştir. Tarım alanlarından alınan toprakların pH değerleri ile Ni elementinin F3, F4 ve ∑F fraksiyonları arasında istatistiksel olarak negatif, kil miktarları ile bu fraksiyonlar arasında istatistiksel olarak pozitif yönde bir ilişki olduğu tespit edilmiştir ($p<0,05$). Örneklerin OM miktarları ile Ni'nin her bir fraksiyonu arasında istatistiksel olarak pozitif yönde bir ilişki olduğu tespit edilmiştir ($p<0,05$).

Tarım alanlarından alınan toprakların fiziko-kimyasal özellikleri ile Pb elementinin fraksiyonları arasındaki ilişki Tablo 31'de verilmiştir. Toprakların pH, OM ve kil içerikleri ile Pb fraksiyonları arasında istatistiksel olarak bir ilişki bulunmamıştır. Örneklerin $CaCO_3$ miktarları ile Pb'nin $F_1$ fraksiyonu arasında istatistiksel olarak pozitif, $F_4$ fraksiyonunda ise negatif yönde anlamlı bir ilişki olduğu tespit edilmiştir ($p>0,05$).

Tarım alanlarından alınan toprakların fiziko-kimyasal özellikleri ile Zn elementinin fraksiyonları arasındaki ilişki Tablo 31'de verilmiştir. Tablo 31 incelendiğinde, toprakların pH'sı ile Zn elementinin $F_2$ fraksiyonu arasında istatistiksel olarak pozitif yönde anlamlı bir ilişki bulunmuştur ($p<0,05$). Örneklerin $CaCO_3$ ve kil miktarları ile Zn'nin fraksiyonları arasında istatistiksel olarak anlamlı bir ilişki bulunmamıştır. Toprakların Kil miktarı ile Zn'nin $F_3$, $F_4$ ve ∑F fraksiyonları arasında istatistiksel olarak pozitif yönde anlamlı bir ilişki olduğu tespit edilmiştir ($p<0,05$).

### 4.6. Ağır Metallerin Çevresel Risk Değerlendirmesi

Tez çalışması kapsamında tarım topraklarında bulunan ağır metallerin potansiyel ekolojik risklerini belirlemek amacıyla risk değerlendirme kodu (RAC), kontaminasyon faktörü (Cf), ekolojik risk indeksi (Er) ve potansiyel risk indeksi (RI) uygulanmış ve tüm sonuçlar Tablo 32'de sunulmuştur.

Tarım alanlarından alınan toprak örneklerde ağır metallerin RAC değerleri Cd > Pb > Cu > Co > Zn > Ni > Cr sıralamasını izlemiştir (Tablo 32). Tablo 32 incelendiğinde Cr risksiz olarak sınıflandırlırken; Ni, Zn, Cu düşük riskli olarak sınıflandırılmıştır. Diğer yandan Cd ve Pb ise orta düzeyde riskli olarak sınıflandırılmıştır (Tablo 32).

Tablo 32 incelendiğinde ağır metallerin Cf değerleri Cd > Pb > Co > Cu > Ni > Zn > Cr sıralamasını izlemiştir. Yapılan Cf değerlendirmesinde Cr, Zn, Ni, Co ve Cu'nun kirlilik sergilemediği ancak Cd ve Pb'nin düşük kirlilik sergilediği görülmüştür.

Ağır metallerin ekolojik risk derecesi (Er değerleri) Cd > Pb > Co > Cu > Ni > Cr > Zn sıralamasını izlemiştir (Tablo 32). Ağır metallerin Er değerleri Cd elementi hariç tüm elementlerin düşük ekolojik risk derecesine sahip olduğunu göstermiştir. Diğer yandan Cd elementinin ise orta derecede ekolojik risk derecesine sahip olduğunu göstermiştir (Tablo 32). Bununla birlikte ağır metallerin RI değerleri 68,86 olarak hesaplanmış ve ağır metallerin orta derecede risk oluşturduğunu göstermiştir. Ancak Er değerlerinin toplamı ile elde edilen RI değeri daha çok Cd elementinin yüksek Er değerine (53,62) sahip olmasından kaynaklı olarak orta risk grubuna dahil olduğu anlaşılmıştır. Dolayısıyla RI değerinin diğer elementlerden ziyade Cd elementinin yüksek mobilitesinden kaynaklanan bir sonuç olduğu anlaşılmıştır.

Tablo 32

Ağır metallere ait RAC, Cf ve Er değerleri ve sınıfları

| Ağır Metal | RAC (%) | Risk Derecesi | Cf | Kirlilik Derecesi | Er | Risk Derecesi |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **Cd** | 27,08 ± 6,38 | Orta düzey | 1,79 ± 0,76 | Düşük | 53,62 ± 22,69 | Orta |
| **Co** | 7,41± 3,88 | Düşük | 0,75 ± 0,10 | Temiz | 3,75 ± 0,50 | Düşük |
| **Cr** | 0,73 ± 0,39 | Risk yok | 0,28 ± 0,17 | Temiz | 0,56 ± 0,35 | Düşük |
| **Cu** | 8,14 ± 1,62 | Düşük | 0,51 ± 0,08 | Temiz | 2,56 ± 0,40 | Düşük |
| **Ni** | 2,76 ± 1,07 | Düşük | 0,39 ± 0,16 | Temiz | 1,94 ± 0,80 | Düşük |
| **Pb** | 12,08 ± 3,52 | Orta düzey | 1,23 ± 0,44 | Düşük | 6,15 ± 2,19 | Düşük |
| **Zn** | 4,23 ± 1,13 | Düşük | 0,29 ± 0,07 | Temiz | 0,29 ± 0,07 | Düşük |

Elde edilen sonuçlara göre, Cd ve Pb'nin orta derecede potansiyel ekolojik risk grubunda yer aldığı görülmüş ve ayrıca Cd ve Pb'nun toplam konsantrasyonlarının tarım toprakları için önerilen limit değerlere yakın olması bu iki elementin çevre üzerindeki toksik etkileri konusunda dikkatli olunması gerektiğini göstermiştir.

Tez çalışması kapsamında alınan bitki örneklerine Biyolojik Biriktirme Faktörü (BAF) indeksi uygulanmıştır. Bitkilere ait BAF değerleri ve birikim durumları Tablo 33'te verilmiştir.

Tablo 33

Bitki örneklerine ait BAF değerleri ve birikim durumları

| | Biyolojik Biriktirme Faktörü (BAF) | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Metal** | **Buğday** | **Birikim** | **Kapya biber** | **Sınıf** | **Yonca** | **Sınıf** | **Zeytin** | **Sınıf** |
| **Cd** | 0,347 ± 0,102 | Yok | 1,140 ± 0,487 | Var | 0,804 ± 0,142 | Yok | 0,404 ± 0,191 | Yok |
| **Co** | 0,003 ± 0,002 | Yok | 0,013 ± 0,008 | Yok | 0,012 ± 0,005 | Yok | 0,003 ± 0,003 | Yok |
| **Cr** | 0,002 ± 0,003 | Yok | 0,016 ± 0,009 | Yok | 0,009 ± 0,001 | Yok | 0,003 ± 0,004 | Yok |
| **Cu** | 0,206 ± 0,063 | Yok | 0,423 ± 0,214 | Yok | 0,342 ± 0,053 | Yok | 0,211 ± 0,093 | Yok |
| **Ni** | 0,004 ± 0,002 | Yok | 0,038 ± 0,214 | Yok | 0,081 ± 0,003 | Yok | 0,025 ± 0,036 | Yok |
| **Pb** | 0,005 ± 0,001 | Yok | 0,012 ± 0,004 | Yok | 0,006 ± 0,003 | Yok | 0,007 ± 0,001 | Yok |
| **Zn** | 0,237 ± 0,039 | Yok | 0,944 ± 0,154 | Yok | 0,484 ± 0,150 | Yok | 0,217 ± 0,045 | Yok |

Cd elementi BAF değerleri kapya biber > yonca > zeytin > buğday sıralamasını izlemiştir. Tablo 33 incelendiğinde buğday, yonca ve zeytin bitkilerinin Cd elementini birikim biriktirmediği ancak kapya biberin Cd elementini biriktirme potansiyeline sahip olabileceği anlaşılmıştır.

Co elementi BAF değerleri kapya biber > yonca > zeytin > buğday sıralamasını izlemiştir. Elde edilen BAF değerlerine göre Co elementinin bitkilerde birikim sergilemediği belirlenmiştir (Tablo 33).

Cr elementi BAF değeleri kapya biber > yonca > zeytin > buğday şeklinde sıralanmıştır. Bununla birlikte buğday, kapya biber, yonca ve zeytin bitkilerinin Cr elementini biriktirmediği sonucuna varılmıştır (Tablo 33). Cu elementi BAF değerleri kapya biber > yonca > zeytin > buğday sıralamasını takip etmiştir. Tablo 33 incelendiğinde bitkilerin Cu elementini biriktirmediği görülmüştür.

Ni elementi BAF değerleri yonca > kapya biber > zeytin > buğday sıralamasını izlemiştir. Elde edilen bu sonuç Ni elementinin bitkilerde birikim sergilemediğini ortaya koymuştur (Tablo 33). Pb elementinin BAF değerleri incelendiğinde kapya biber > zeytin > yonca > buğday sıralamasının ortaya çıktığı görülmüştür. Bu durum Pb elementinin bitkilerde birikmediğini ortaya koymuştur.

Zn elementinin BAF değerleri kapya biber > yonca > buğday > zeytin sıralamasını izlemiştir (Tablo 33). Buna göre Zn elementinin bitkilerde birikim göstermediği sonucuna varılmıştır. Ancak Zn elementi BAF değerinin kapya biber bitkisi özelinde bazı örnekleme noktalarında sınır değeri (>1) aştığı tespit edilmiştir. Bu durum Cd elementinde olduğu gibi Zn elementinin de kapya biber bitkisinde birikim sergileyebileceğini ortaya koymuştur.

Biyolojik biriktirme faktörünün (BAF) değeri, bir bitkinin topraktan metali alma yeteneğini ve toprak üstü kısımlarına translokasyon miktarını gösterir (Wieczorek vd., 2023). Elementlerin BAF değerleri incelendiğinde, tüm elementlerde kapya biber bitkisi en yüksek BAF değerini aldığı tespit edilmiştir (Tablo 33). Bu sonuç ile kapya biber bitkisinin çalışmadaki diğer bitkiler ile kıyaslandığında ağır metalleri daha fazla biriktirme potansiyeli olabileceği düşünülmüştür.

# BEŞİNCİ BÖLÜM
# SONUÇ VE ÖNERİLER

Tez çalışması kapsamında Çanakkale ili sınırları içindeki serpantin anamateryali üzerinde oluşmuş doğal alan ve tarım topraklarının ağır metal konsantrasyonları ve bunların jeokimyasal fraksiyonları belirlenmiştir. Çalışma doğrultusunda belirlenen noktalardan 24 adet tarım toprağı, 7 adet doğal alan toprağı ve 7 adet kayaç örneği alınmıştır. Alınan toprak örneklerinin fiziko-kimyasal özellikleri, toplam ağır metal konsantrasyonları, ağır metallerin jeokimyasal fraksiyonlarını ve hareketliliği belirlenmiştir. Ağır metallerin ekosistem üzerindeki etkilerini ortaya koymak için çevresel risk indeksleri hesaplanmıştır. Çevresel risk değerlendirmesi yanında ağır metallerin bitkiye transferini belirlemek için tarım yapılan arazilerden 22 noktada bitkilerden yaprak örnekleri alınmıştır. Alınan bitki yapraklarında ağır metal analizleri yapılmıştır.

Çalışma kapsamında alınan kayaç örneklerinin Cd ve Co konsantrasyonları ultramfik kayaçlar ve kerkabuğu için bildirilen değerlerin üzerinde tespit edilmiştir. Kayaç örneklerinin Cr ve Ni konsantrasyonları yerkabuğu ortalamasından yüksek bulunmuştur.

Doğal alanlardan alınan toprakların toplam ağır metal konsantrasyonları Ni > Cr > Co > Zn > Pb > Cu > Cd sıralamasını izlemiştir. Çalışmada doğal alan topraklarının Cd, Co, Cr, Ni, Pb konsantrasyonları dünya toprak ortalaması ve yerkabuğu ortalamasından yüksek; Cu ve Zn'nin ise düşük olduğu tespit edilmiştir. Tarım topraklarının ağır metal konsantrasyonları Cr > Ni > Zn > Co > Cu > Pb > Cd sıralamasını izlemiştir. Tarım alanlarından alınan örneklerin Cd değerlerinin izin verilen maksimum değeri aşmadığı ancak tarım toprakları için genel yaygın değere yakın olduğu belirlenmiş ve tarımsal faaliyetler sonucu bir miktar Cd'nin ortama dahil olduğu kanısına varılmıştır. Tarım topraklarının Co, Cr ve Ni konsantrasyonlarının tarım toprakları için genel yaygın değer ve MAC değerinden daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Bu sonuç çalışma alanı toprakları olan serpantin topraklar için beklenen bir sonuçtur. Çalışmada elde edilen sonucçlara göre Cu ve Zn'nin tarım topraklarında zenginleştiği belirlenmiştir. Bu durumun tarımsal faaliyetlerden kaynaklandığı düşünülmüştür.

Çalışma kapsamında alınan bitki örneklerinin ortalama konsantrasyonları ise genel olarak Cr ve Ni'de tolere edilebilir miktarın üst sınırına çok yakın olduğu tespit edilmiştir. Bu durum bitkilerin toprak aldıkları Cr ve Ni'i bitki yapraklarına taşıdıklarını göstermektedir. Bu yaprakların tüketilmesi ve/veya meyveye geçmesi ekosistem açısından uzun dönemde önemli olumsuz sonuçlara neden olabileceği düşünülmektedir. Örnekleme noktalarındaki bitkilerin Cr ve Ni açısından takip edilmesi önerilmektedir. Sonuçlar bitki bazlı incelendiğinde tüm metaller için kapya biberin diğer bitkilere göre daha yüksek metal içeriğine sahip olduğu tespit edilmiştir. Dolayısıyla kapya biber üretimi yapılan alanların izlenmesi ve daha detaylı çalışmaların yapılması gerektiği düşünülmüştür.

Faktör analizi ve hiyerarşik kümeleme analizi benzer sonuçlar vererek Cd, Co, Cr ve Ni elementlerinin litolojik; Pb ve Zn elementlerinin antropojenik ve litolojik; Cu elementinin ise antropojenik etkilerin daha yoğun olduğu hem litolojik hem de antropojenik etkilerle topraklarda zenginleştiği belirlenmiştir. Cu elementinin farklılaşmasında özellikle tarımsal girdilerin etkisinin önemli olduğu sonucuna varılmıştır.

Ağır metallerin fraksiyonları incelendiğinde tüm örneklerdeki ağır metallerin farklı konsantrasyonlarda olmasına rağmen ağırlıklı olarak $F_4$ fraksiyonunda bulunduğu tespit edilmiştir. Bununla birlikte doğal alan topraklarında Cu, tarım topraklarında ise Cd dışındaki tüm metallerin $F_2$ fraksiyonunda baskın olduğu belirlenmiştir. Ardışık ektraksiyon sonucunda tarım topraklarında Cd ve Pb elementinin mobil fraksiyonlarının diğer elementlere göre yüksek olduğu tespit edilmiştir. Cd elementinin mobil çıkmasının Cd elementinin çözünürlüğü ve tarımsal girdiler ile olduğu sonucuna varılmıştır. Pb elementinin hareketli olmasında ise özellikle yola yakın tarım topraklarının emisyonlardan etkilendiği sonucuna varılmıştır. Co, Cr, Cu, Ni ve Zn metalleri immobil fraksiyonda bulunmuş ve bu elementlerin toprakların mineral yapısına bağlı olduğu düşünülmüştür.

Tarım topraklarıda Cd'un $\sum F$ konsantrasyonu incelendiğinde tarım toprakları için kullanılan yaygın değerler sınırları içinde tespit edilmiştir. Bu durum Cd'un uzun vadede izlenmesi gerektiği kanısı oluşturmuştur. Co elementi en fazla $F_4$ fraksiyonunda bulunurken bunu $F_2$ fraksiyonu takip etmiştir. Bu sonuçlar çevre koşullarındaki meydana gelebilecek değişikliklerin Co elementinin serbest formlara geçerek çevresel risk açısından önemli hale gelebileceğine işaret etmiştir. Cr elementi %83,64 oranında $F_4$ fraksiyonunda bulunduğu ve bu durumun anamateryal kaynaklı olduğu anlaşılmıştır. Cu elementinin $\sum F$ konsantrasyonu,

bu elementin uzun vadede potansiyel çevresel riskler ortaya koyabileceği düşünülmüştür. Ni elementi %77,61'lik oran ile $F_4$ fraksiyonunda tespit edilmiştir. Bu durumun Ni elementinin serpantin topraklarının özelliğini yansıttığını ortaya koymaktadır. Pb elementi ∑F konsantrasyonu tarım arazileri için kullanılan yaygın değerler üst sınırına çok yakındır. Bu durum Pb elementinin potansiyel çevresel risk oluşturabileceğini işaret etmektedir. Zn elementinin %77,43 oran ile $F_4$ fraksiyonunda baskın olduğu tespit edilmiştir.

Ağır metallerin RAC değerleri incelendiğinde, Cd ve Pb elementi orta düzey risk sınıfında, kirlilik indeksine (Cf) göre Cd ve Pb elementi düşük kirlilik derecesine sahipken, Cr, Cu, Ni ve Zn elementlerinin kirlilik sergilemediği tespit edilmiştir. Ağır metallerin ekolojik risk indekslerine bakıldığında ise Cd elementinin orta risk sınıfına sahipken Cr, Cu, Ni, Pb ve Zn elementleri düşük ekolojik risk sınıfına sahip olmuştur. Bununla birlikte ağır metallerin RI değerleri ağır metallerin orta derecede risk oluşturduğunu göstermiştir. Bu sonucun Cd elementinin yüksek mobilitesinden kaynaklandığı anlaşılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, Cd ve Pb elementlerinin orta derecede potansiyel ekolojik risk grubunda yer aldığı ve ayrıca Cd ve Pb'nin toplam konsantrasyonlarının tarım toprakları için önerilen limit değerlere yakın olması bu iki elementin çevre üzerindeki toksik etkileri konusunda dikkatli olunması gerektiğini göstermiştir.

Bitkilerin BAF değerleri dikkate incelendiğinde tüm elementlerde kapya biberin en yüksek BAF değerine sahip olduğu ve kapya biber bitkisinin Cd ve Zn elementlerini biriktirme potansiyeline sahip olabileceği sonucuna ulaşılmıştır.

# KAYNAKÇA


Abdul Rashid, S. R., Wan Yaacob, W. Z., and Umor, M. R. (2023). "Assessments of heavy metals accumulation, bioavailability, mobility, and toxicity in serpentine soils". *Sustainability*, *15*(2), 1218.

Adriano, D. C. Trace Elements in the Terrestrial Environment,(1986). *Spring-Verlag, New York.*

Alexakis D. (2016). "Human health risk assessment associated with Co, Cr, Mn, Ni and V contents in agricultural soils from a Mediterranean site". *Arch Agron Soil Sci* 62(3):359-373.

Alexander, E.B. (2014). "Arid to humid serpentine soils, mineralogy, and vegetation across the Klamath Mountains, USA". *Catena* 116, 114-122.

Alkan, A. (2019). "Pınarbaşı ofiyoliti ve ofiyolit tabanı metamorfitlerinin jeokimyasal özellikleri ve uzaktan algılama yöntemleriyle haritalanması". Yüksek Lisans Tezi. Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli.

Alloway, B. J. (2012). "Heavy metals in soils: trace metals and metalloids in soils and their bioavailability". (Vol. 22). Springer Science and Business Media.

Almås, Å. R. and Singh, B. R. (2017). "Trace metal contamination". *Encyclopedia of Soil Sciences; Lan, R., Ed.; CRC Press: Boca Raton, FL, USA*, 2364-2368.

Altınözlü, H., Karagöz, A., Polat, T. and Ünver, İ. (2012). "Nickel hyperaccumulation by natural plants in Turkish serpentine soils". *Turkish Journalof Botany*, 36(3), 269-280.

Altunbaş, S. (2019). "Plant nutrient capacity of soils development on the serpentine rock in the Burdur-Gölhisar basin". *Mediterranean Agricultural Sciences*, 32, 141-146.

Altunbaş, S. (2023). "Heavy metals concentration and availability of serpentine soils in southwestern Turkey". *Chilean journal of agricultural research*, *83*(3), 358-368.

Amini, Z., Hatami-Manesh, M., Aazami, J. and Savabieasfahani, M. (2024). "Ecological risk assessment of heavy metals (Pb, Cd, Cr, Ni, Zn, Fe) and metalloid (As) in surface sediment of Anzali International Wetland, Iran". *Geology, Ecology, and Landscapes*, 1-19.

Antić-Mladenović, S., Rinklebe, J., Frohne, T., Stärk, H. J., Wennrich, R., Tomić, Z. and Ličina, V. (2011). "Impact of controlled redox conditions on nickel in a serpentine soil". *Journal of Soils and Sediments*, *11*, 406-415.

Arenas-Lago, D., Andrade, M. L., Vega, F. A. and Singh, B. R. (2016). "TOF-SIMS and FE-SEM/EDS to verify the heavy metal fractionation in serpentinite quarry soils". *Catena*, *136*, 30-43.

Aziz, R. A., Abd Rahim, S., Sahid, I. and Idris, W. M. R. (2015). "Speciation and availability of heavy metals on serpentinized paddy soil and paddy tissue". *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 195, 1658-1665.

Becquer, T., Quantin, C., Sicot, M. and Boudot, J. (2003). "Chromium availability in ultramafic soils from New Caledonia". *Science of the Total Environment*, *301*(1-3), 251-261.

Best, M. G. (2013). *Igneous and metamorphic petrology*. John Wiley and Sons.

Bini, C., Maleci, L. and Wahsha, M. (2017). "Potentially toxic elements in serpentine soils and plants from Tuscany (Central Italy). A proxy for soil remediation". *Catena*, *148*, 60-66.

Bo, L., Wang, D., Zhang, G. and Wang, C. (2015). "Heavy metal speciation in sediments and the associated ecological risks in rural rivers in southern Jiangsu Province, China". *Soil and Sediment Contamination: An International Journal*, *24*(1), 90-102.

Botsou, F., Sungur, A., Kelepertzis, E., Soylak, M. (2016). "Insights into the chemical partitioning of trace metals in roadside and off-road agricultural soils along two major highways in Attica's region, Greece". *Ecotoxicology and Environmental Safety*, *132*, 101-110.

Brady K.U., Kruckeberg A.R., Bradshaw H.D. Jr. (2005). "Evolutionary ecology of plant adaptation to serpentine soils". *Annual Review of Ecology, Evolution and Systematics*, 36, 243-266.

Quantin, C., Ettler, V., Garnier, J. and Šebek, O. (2008). "Sources and extractibility of chromium and nickel in soil profiles developed on Czech serpentinites". *Comptes Rendus Geoscience*, *340*(12), 872-882.

Chen, H., Teng, Y., Lu, S., Wang, Y. and Wang, J. (2015). "Contamination features and health risk of soil heavy metals in China". *Science of the total environment*, *512*, 143-153.

Cheng, C. H., Jien, S. H., Iizuka, Y., Tsai, H., Chang, Y. H. and Hseu, Z. Y. (2011). "Pedogenic chromium and nickel partitioning in serpentine soils along a toposequence". *Soil Science Society of America Journal*, *75*(2), 659-668.

Coleman, R. G., Jove, C. (1992). "Geological origin of serpentinites". *The vegetation of ultramafic (serpentine) soils*, 1-17.

Çoğulu, E. (1976). Petrografi ve Petroloji (Cilt-I-Magmatizma). İTÜ. Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Yayınları, 111. (Ders kitabı).

Devi, P., Saroha, A. K. (2014). "Risk analysis of pyrolyzed biochar made from paper mill effluent treatment plant sludge for bioavailability and eco-toxicity of heavy metals". *Bioresour Technol* 162:308-315.

Du Laing, G. (2011). "Redox metal processes and controls in estuaries". *Treatise on estuarine and coastal science*, 4, 115-141.

Eren, S. T., Sungur, A. and Ekinci, H. (2021). "Trace metal fractions, sources, and risk assessment in sediments from Umurbey Stream (Çanakkale-Turkey)". *Environmental Monitoring and Assessment*, *193*(6), 347.

Fernandez, S., Seoane, S. and Merino, A. (1999). "Plant Heavy Metal Concentrations And Soil Biological Properties İn Agricultural Serpentine Soils". *Communications İn Soil Science And Plant Analysis*, 30(13-14), 1867-1884.

Fernández-Ondoño, E., Bacchetta, G., Lallena, A. M., Navarro, F. B., Ortiz, I. and Jiménez, M. N. (2017). "Use of BCR sequential extraction procedures for soils and plant metal transfer predictions in contaminated mine tailings in Sardinia". *Journal of Geochemical Exploration*, 172, 133-141.

Freitas, H., Prasad, M.N.V., Pratas, J. (2004). "Analysis of serpentinophytes from north-east of Portugal for trace metal accumulation--relevance to the management of mine environment". *Chemosphere*, 54: 1625-1642.

Garnier, J., Quantin, C., Guimarães, E. M., Vantelon, D., Montargès-Pelletier, E. and Becquer, T. (2013). "Cr (VI) genesis and dynamics in Ferralsols developed from ultramafic rocks: The case of Niquelândia, Brazil". *Geoderma*, *193*, 256-264.

Garnier, J., Quantin, C., Martins, E. S. and Becquer, T. (2006). "Solid speciation and availability of chromium in ultramafic soils from Niquelândia, Brazil". *Journal of Geochemical Exploration*, *88*(1-3), 206-209.

Gee GW, Or D. (2002). Particle-size analysisParticle-size analysis . Dane J, and Topp G Madison WI: Soil Science Society of America, 255-293.

Ghasemi, R., Ghaderian, S. M. (2009). "Responses of two populations of an Iranian nickel-hyperaccumulating serpentine plant, Alyssum inflatum Nyar., to substrate Ca/Mg quotient and nickel". *Environmental and Experimental Botany*, *67*(1), 260-268.

Girotto, E., Ceretta, C. A., Brunetto, G., Miotto, A., Tiecher, T. L., De Conti, L., Cledimar, R. L., Lorensini, F., Gubani, P. I., da Silva, S. L. and Nicoloso, F. T. (2014). "Copper availability assessment of Cu-contaminated vineyard soils using black oat cultivation and chemical extractants". *Environmental Monitoring and Assessment*, *186*, 9051-9063.

Grewelling T. ve Peech M. (1960). Chemical Soil Test. Cornell University Agr. Expt. Sta.

Gur, E. and Sungur, R. (2018). Estimation of heavy metal fractions, sources and uptake by plants in cherry orchards (Canakkale-Lapseki, Northwestern Turkey). *Fresenius Environmental Bulletin*, 27,6379-6387.

Güler, C., Alpaslan, M., Kurt, M. A. and Temel, A. (2010). "Deciphering factors controlling trace element distribution in the soils of Karaduvar industrial-agricultural area (Mersin, SE Turkey)". *Environmental Earth Sciences*, 60, 203-218.

Hızalan, E. ve Ünal, H. (1966). Topraklarda önemli kimyasal analizler. *AÜ Ziraat Fakültesi Yayınları*, *278*, 5-7.

Ho, C.-P., Hseu, Z.-Y., Chen, N.-C., Tsai, C.-C. (2013). "Evaluating heavy metal concentration of plants on a serpentine site for phytoremediation applications". *Environ. Earth Sci*. 70, 191-199.

Hseu, Z. Y. and Iizuka, Y. (2013). “Pedogeochemical characteristics of chromite in a paddy soil derived from serpentinites". *Geoderma, 202*, 126-133.

Hussain, B., Abbas, Y., ur-Rahman, S., Ali, H., Zafar, M., Ali, S., Ashraf, M. N., Zehra, Q., Espinoza, S. T. L. and Valderrama, J. R. D. (2022). “Metal and metalloids speciation, fractionation, bioavailability, and transfer toward plants”. In *Metals metalloids soil plant water systems*, p. 29-50. Academic Press.

Ismanto, A., Hadibarata, T., Widada, S., Indrayanti, E., Ismunarti, D. H., Safinatunnajah, N. and Alkahtani, J. (2023). “Groundwater contamination status in Malaysia: level of heavy metal, source, health impact, and remediation technologies”. *Bioprocess and Biosystems Engineering*, *46*(3), 467-482.

Jain CK. (2004). “Metal fractionation study on bed sediments of River Yamuna India”. *Water Res*. 38(3):569-578.

Jamali, M. K., Kazi, T. G., Arain, M. B., Afridi, H. I., Jalbani, N., Memon, A. R. and Shah, A. (2007). “Heavy metals from soil and domestic sewage sludge and their transfer to Sorghum plants”. *Environmental Chemistry Letters*, *5*, 209-218.

Kabata-Pendias, A. (2011). “Trace Elements in Soils and Plants”. 4th edition. Boca Raton, FL, USA: CRC Press/Taylor camp; Francis Group (2010), pp. 548, US$159.95. ISBN 9781420093681. *Experimental Agriculture*, *47*(4), 739-739.

Kabata-Pendias, A. and Szteke, B. (2015). “Trace elements in abiotic and biotic environments”. p. 468. Taylor and Francis.

Kanellopoulos, C., Argyraki, A. and Mitropoulos, P. (2015). “Geochemistry of serpentine agricultural soil and associated groundwater chemistry and vegetation in the area of Atalanti, Greece”. *Journal of Geochemical Exploration*, 158, 22-33.

Kaplan, O. and Yaman, M. (2009). “Selective and sequential extraction of lead in soil samples and plant parts taken from a serpentine and copper mining area”. *Atomic Spectroscopy*, *30*(1), 1-9.

Kara, Z. (2019). “Kahramanmaraş bölgesinde ofiyolitik topluluğun farklı kesimlerini temsil eden kayaçlar ile üzerinde oluşan toprakların asbest mineral içeriklerinin ve jeokimyasal özelliklerinin araştırılması”. Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi,

Fen Bilimleri Enstitüsü, Toprak Bilimi ve Bitki Besleme Anabilim Dalı, Doktora Tezi. 223s.

Karanlık S., Ağca N., Yalçın M. (2011). "Spatial Distribution of Heavy Metals Content in Soils of Amik Plain (Hatay, Turkey)". *Environ Monit Assess*, 173: 181-191.

Kelepertzis E. (2014). "Accumulation of heavy metals in agricultural soils of Mediterranean: insights from Argolida basin, Peloponnese, Greece". *Geoderma*, 221:82-90.

Kelepertzis, E., Galanos, E., and Mitsis, I. (2013). "Origin, mineral speciation and geochemical baseline mapping of Ni and Cr in agricultural topsoils of Thiva Valley (central Greece)". *Journal of Geochemical Exploration*, 125, 56-68.

Kılıç, E., 2019. "Eskişehir- Mihalıççık- Karaçam Köyü Civarı Yeşil Renkli Kalsedon Oluşumlarının Jeoloji, Mineraloji ve Gemolojisi". Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi. 112s.

Kierczak, J., Neel, C., Bril, H., and Puziewicz, J. (2007). "Effect of mineralogy and pedoclimatic variations on Ni and Cr distribution in serpentine soils under temperate climate". *Geoderma*, *142*(1-2), 165-177.

Kierczak, J., Pietranik, A. and Pędziwiatr, A. (2021). "Ultramafic geoecosystems as a natural source of Ni, Cr, and Co to the environment: A review". *Science of The Total Environment*, *755*, 142620.

Koller, M. and Saleh, H. M. (2018). "Introductory chapter: Introducing heavy metals". *Heavy metals*, *1*, 3-11.

Kowalska JB, Mazurek R, Gąsiorek M, Zaleski T. (2018). "Pollution indices as useful tools for the comprehensive evaluation of the degree of soil contamination−a review". *Environ Geochem Health*, 40(6):2395-2420.

Kraemer, S., Hering, J. (2004). "Biogeochemical controls on the mobility and bioavailability of metals in soils and groundwater". *Aquatic Sciences*, 66(1): 1-2.

Kumar, A., Ramamoorthy, D., Kumar, N., Verma, R., Kumar, A., Verma, D. K., Jayabalan, I., Marwein, B.M. and Jaiswal, K. K. (2023). "Investigation on the potential of eco-friendly bio-char for amendment in serpentine soils and immobilization of heavy

metals contaminants: a review". *Biomass Conversion and Biorefinery*, 13(18), 16585-16605.

Lazaro, J.D., Kidd, P.S., C. Martı´nez, M. (2006). "A phytogeochemical study of the Tra´s-os-Montes region (NE Portugal): Possible species for plant-based soil remediation Technologies". *Science of the Total Environment*, 354: 265- 277.

Licina, V., Antic-Mladenovic, S., Kresovic, M. and Rinklebe, J. (2010). "Effect of high nickel and chromium background levels in serpentine soil on their accumulation in organs of a perennial plant". *Communications in soil science and plant analysis*, 41(4), 482-496.

Lombini, A., Dinelli, E., Ferrari, C. And Simoni, A. (1998). "Plant-soil relationships in the serpentinite screes of Mt. Prinzera (Northern Apennines, Italy)". *Journal of Geochemical Exploration*, 64(1-3), 19-33.

Meteoroloji Genel Müdürlüğü. (2024, 1 Ocak). Erişim Adresi: https://www.mgm.gov.tr/

Miranda, M., Benedito, J. L., Blanco-Penedo, I., López-Lamas, C., Merino, A. and López-Alonso, M. (2009). "Metal accumulation in cattle raised in a serpentine-soil area: relationship between metal concentrations in soil, forage and animal tissues". *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*, 23(3), 231-238.

Nnaji, N. D., Onyeaka, H., Miri, T. and Ugwa, C. (2023). ""'Bioaccumulation for heavy metal removal: a review". *SN Applied Sciences*, 5(5), 125.

O'Hanley, D. S. (1996). "Serpentinites. Records of Tectonic and Petrological History". Oxford Monographs on Geology and Geophysics New York, Oxford University Press, 277. New York, Oxford: Oxford University Press.

Oğuzhan, F. (2019). "Çomaklı Köyü Çevresinde (Van- Doğu Anadolu) Gözlenen Ultramafik Kayaçlar İçerisinde Gelişen Alterasyonların ve Cevher Potansiyelinin İncelenmesi". Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi.38s.

Okay, İ.A., Siyako, M. ve Bürkan, K.A. (1990). "Biga Yarımadası'nın Jeolojisi ve Tektonik Evrimi". *TPJD Bült.Cilt*, 2/1, 83-121.

Olowoyo, J. O., Lion, N., Unathi, T. and Oladeji, O. M. (2022). "Concentrations of Pb and other associated elements in soil dust 15 years after the introduction of unleaded fuel and the human health implications in Pretoria, South Africa". *International Journal of Environmental Research and Public Health,* 19(16), 10238.

Oviedo, R., Faife-Cabrera, M., Noa-Monzón, A., Arroyo, J., Valiente-Banuet, A. and Verdú, M. (2014). "Facilitation allows plant coexistence in Cuban serpentine soils". *Plant Biology*, 16(4), 711-716.

Oze C., Skinner C., Schorth W. A., Coleman G. R. (2008). "Growing Up Green on Serpentine Soils: Biogeochemistry of Serpentine Vegetation in the Centeral Range of California". *Applied Geochemistry* 23: 3391-3403.

Oze, C. (2003). *Chromium geochemistry of serpentinites and serpentine soils*. Stanford University.

Oze, C., Fendorf, S., Bird, D. K. and Coleman, R. G. (2004). "Chromium geochemistry in serpentinized ultramafic rocks and serpentine soils from the Franciscan complex of California". *American Journal of Science,*304, 67–101.

Özbey, B.G. (2019). "Ankara Elmadağ Serpantin Serisinde Serpantinikol Endemizmin Ekolojik Uyum Mekanizmalarının Araştırılması". Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Biyoloji Anabilim Dalı, Doktora Tezi. 152 s.

Özcan, H., Sungur, A., Everest, T., Temel, E., Bozcu, M. and Soylak, M. (2022). "Serpantin Üzerinde Oluşmuş Topraklarda Kobalt, Krom ve Nikelin Jeokimyasal Fraksiyonlarının Belirlenmesi (Çanakkale-Ezine, Türkiye)". *Türk Tarım ve Doğa Bilimleri Dergisi,* 9(3), 509-517.

Özdeniz, E., Özbey, B. G., Kurt, L. ve Bölükbaşı, A. (2017). "Serpantin ekolojisi ve Türkiye serpantin florası'na katkılar". *Toprak Bilimi ve Bitki Besleme Dergisi,* 5(1), 22-33.

Pagnanelli, F., Moscardini, E., Giuliano, V. and Toro, L. (2004). "Sequential extraction of heavy metals in river sediments of an abandoned pyrite mining area: pollution detection and affinity series". *Environmental Pollution,* 132: 189-201.

Pavlova, D. and Karadjova, I. (2013). "Toxic element profiles in selected medicinal plants growing on serpentines in Bulgaria". *Biological trace element research*, *156*, 288-297.

Rajapaksha, A. U., Vithanage, M., Oze, C., Bandara, W. M. A. T. and Weerasooriya, R. (2012). "Nickel and manganese release in serpentine soil from the Ussangoda Ultramafic Complex, Sri Lanka". *Geoderma, 189*, 1-9.

Reeves D.R., Adıgüzel N. (2004). "Rare Plants and Nickel Accumulators from Turkish Serpentine Soils, with Special Reference to Centaurea Species", *Turk.J.Bot*, 28 :147-153.

Richards, L.A. (1954). "Diagnosis and Improvement of Saline and Alkali Soils". US Department of Agriculture Handbook 60:94.

Rinklebe, J., Antić-Mladenović, S., Frohne, T., Stärk, H. J., Tomić, Z.and Ličina, V. (2016). "Nickel in a serpentine-enriched Fluvisol: redox affected dynamics and binding forms". *Geoderma, 263*, 203-214.

Saglam, C. (2017). "Heavy metal concentrations in serpentine soils and plants from Kizildag national park (Isparta) in Turkey". *Fresenius Environmental Bulletin*, 26(6), 3995-4003.

Schlichting E. and Blume E. (1966). *Bodenkundliches Practikum*. Verlag Paul Parey,

Shah, M. T., Ara, J., Muhammad, S., Khan, S., Asad, S. A. and Ali, L. (2014). "Potential heavy metals accumulation of indigenous plant species along the mafic and ultramafic terrain in the Mohmand Agency, Pakistan". *CLEAN-Soil, Air, Water*, 42(3), 339-346.

Singh, K. P., Mohan, D., Singh, V. K. and Malik, A. (2005). "Studies on distribution and fractionation of heavy metals in Gomti river sediments—a tributary of the Ganges, India". *Journal of hydrology*, 312(1-4), 14-27.

Smith, H. W. and Weldon, M. D. (1941). "A comparison of some methods for the determination of soil organic matter". *Soil Science Society of America*, 5, 177-182.

Soil Survey Division Staff. (2017). Soil Survey Manual, Soil Conservation Service. Washington (DC):U.S. Department of Agriculture Handbook 18.

Soylak M., Akkaya Y., Elci L. (2001). "Monitoring Trace Metal Levels in Yozgat- Turkey: Determinations of Some Metal Ions in Roadside Soils". Trace Elem. *Electroly*, 18: 176-180.

Soylak M., Türkoğlu O. (1999). “Trace Metal Accumulation Caused by Traffic in An Agricultural Soil Near a Motorway in Kayseri, Turkey”. J. *Trace Microprobe Tech,* 17: 209-217.

Summa, V., Boccia, P., Lettino, A., Margiotta, S., Palma, A., Ragone, P. P., Sinisi, R., Zanellato, M. and Sturchio, E. (2020). “Mobility of trace metals in serpentinite-derived soils of the Pollino Massif (Southern Italy): insights on bioavailability and toxicity”. *Environmental Geochemistry and Health*, 42, 2215-2232.

Sungur, A. (2016). “Heavy metals mobility, sources, and risk assessment in soils and uptake by apple (Malus domestica Borkh.) leaves in urban apple orchards”. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 62(8), 1051-1065.

Sungur, A., Soylak, M. and Ozcan, H. (2014). “Investigation of heavy metal mobility and availability by the BCR sequential extraction procedure: relationship between soil properties and heavy metals availability”. *Chemical Speciation and Bioavailability*, 26(4), 219-230.

Sungur, A., Soylak, M., Yilmaz, S. and Ozcan, H. (2016). “Heavy metal mobility and potential availability in animal manure: using a sequential extraction procedure”. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 18, 563-572.

Sungur, A., Temel, E., Everest, T., Soylak, M. And Özcan, H. (2023). “Effects of soil texture on trace metal concentrations and geochemical fractions in the soil of apple orchards (Çanakkale, NW Turkey)”. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 69(13), 2677-2691.

Susaya, J. P., Kim, K. H., Asio, V. B., Chen, Z. S. and Navarrete, I. (2010). “Quantifying nickel in soils and plants in an ultramafic area in Philippines”. *Environmental monitoring and assessment*, 167, 505-514.

Tashakor, M., Yaacob, W. Z. W. and Mohamad, H. (2011). “Speciation and availability of Cr, Ni and Co in serpentine soils of Ranau, Sabah”. *Am J Geosci*, 2(1), 4-9.

Tashakor, M., Zuhairi Wan Yaacob, W., Mohamad, H., Abdul Ghani, A. And Saadati, N. (2014). “Assessment of selected sequential extraction and the toxicity characteristic leaching test as indices of metal mobility in serpentinite soils”. *Chemical Speciation and Bioavailability*, 26(3), 139-147.

Taş, H. (2018). “Gevaş Ofiyolit Napı'nda (Van) Serpantinleşme ile İlişkili Mineral Oluşumlarının Mineralojik ve Jeokimyasal Özelliklerinin İncelenmesi”. Fen Bilimleri Enstitüsü, Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, 87s.

Tchounwou, P. B., Yedjou, C. G., Patlolla, A. K. and Sutton, D. J. (2012). Heavy metal toxicity and the environment. Molecular, clinical and environmental toxicology: volume 3: *Environmental Toxicology*, 133-164.

Temel, E., Everest, T., Sungur, A., Özcan, H. (2024). “Determination of Cu, Pb and Zn Contents of Soils Formed on Different Parent Materials (Çanakkale, Türkiye)”. *Türk Tarım ve Doğa Bilimleri Dergisi*, 11(1), 216-225.

Tessier, A. P. G. C., Campbell, P. C. and Bisson, M. J. A. C. (1979). “Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals”. *Analytical chemistry*, 51(7), 844-851.

Tuzen M, Sari H, Soylak M. (2004). “Microwave and wet digestion procedures for atomic absorption spectrometric determination of trace metals contents of sediment samples”. *Anal Lett.* 37(9):1925-1936.

Ulgen N., and Yurtsever N. (1995). “The guide of fertilizer and fertilization for Turkey. Publishing Ministry of Agriculture and Forestry”. *Soil Water General Directorate*.

Uner, T., Cakir, U., Ozdemir, Y. and Arat, I. (2014). “Geochemistry and origin of plagiogranites from the Eldivan Ophiolite, Çankırı (Central Anatolia, Turkey)”. *Geologica Carpathica*, 65(3):195-205.

Usero, J., Gamero, M., Morillo, J. and Gracia, I. (1998). “Comparative study of three sequential extraction procedures for metals in marine sediments”. *Environment International*, 24(4), 487-496.

Ünver, İ., Madenoğlu, S., Dilsiz, A. and Namlı, A. (2013). “Influence of rainfall and temperature on DTPA extractable nickel content of serpentine soils in Turkey”. *Geoderma*, *202*, 203-211.

van der Ent, A., Callahan, D.L., Noller, B.N., Mesjasz-Przybylowicz, J., Przybylowicz, W.J., Barnabas, A., Harris, H.H. (2017). “Nickel biopathways in tropical nickel hyperaccumulating trees from Sabah (Malaysia)”. *Scientific Reports*, 7, 41861.

Vithanage, M., Kumarathilaka, P., Oze, C., Karunatilake, S., Seneviratne, M., Hseu, Z. Y., ... and Rinklebe, J. (2019). “Occurrence and cycling of trace elements in ultramafic soils and their impacts on human health: A critical review”. *Environment international*, 131, 104974.

Vithanage, M., Rajapaksha, A. U., Oze, C., Rajakaruna, N. and Dissanayake, C. B. (2014). “Metal release from serpentine soils in Sri Lanka”. *Environmental Monitoring and Assessment*, 186, 3415-3429.

Wei W., Ma R., Sun Z., Zhou A., Bu J., Long X., Liu Y. (2018). “Effects of mining activities on the release of heavy metals (HMs) in a typical mountain headwater region, the Qinghai-Tibet Plateau in China”. *Int J Environ Res Public Health*, 15(9): 1987.

Wieczorek, J., Baran, A. and Bubak, A. (2023). “Mobility, bioaccumulation in plants, and risk assessment of metals in soils”. *Science of The Total Environment*, 882, 163574.