

**T.C.
ERZİNCAN BİNALİ YILDIRIM ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
GIDA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**ERZİNCAN İLİNDEKİ KARAYOLLARINA YAKIN ARAZİLERDE
YETİŞTİRİLEN BUĞDAYLARIN AĞIR METAL İÇERİKLERİNİN VE
SAĞLIK RİSKLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

Sena AKBAŞ

Danışman: Prof. Dr. Mustafa Fatih ERTUGAY

TEZ JÜRİ ÜYELERİ

Prof. Dr. Mustafa Fatih ERTUGAY

Prof. Dr. M. Murat KARAOĞLU

Doç. Dr. Filiz YANGILAR

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ERZİNCAN, 2026

Sena AKBAŞ

Tüm hakları saklıdır.

Kabul ve Onay Sayfası

Prof. Dr. Mustafa Fatih ERTUGAY danışmanlığında, Sena AKBAŞ tarafından hazırlanan bu çalışma 02/02/2026 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Gıda Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans olarak oybirliği ile kabul edilmiştir.

Başkan: Prof. Dr. M. Murat KARAOĞLU

İmza:

Üye : Prof. Dr. Mustafa Fatih ERTUGAY

İmza:

Üye : Doç. Dr. Filiz YANGILAR

İmza:

Bu tez Enstitü Yönetim Kurulunun / / 20.... tarih ve/..... sayılı kararı ile onaylanmıştır.

Doç. Dr. Kemal Volkan ÖZDOKUR

Enstitü Müdür V.

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaklardan yapılan bildirişlerin, şekil ve tabloların kaynak olarak kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

Bilimsel Etiğe Uygunluk Sayfası

“Erzincan İlindeki Karayollarına Yakın Arazilerde Yetiştirilen Buğdayların Ağır Metal İçeriklerinin ve Sağlık Risklerinin Araştırılması” isimli “Yüksek Lisans” tezimi tarafımda intihal tespit programı ile incelenmiştir. Buna göre tezimde bilimsel etik ihlali ve intihal olarak nitelendirilebilecek herhangi bir durum olmadığını taahhüt ederim.

Bu çalışmadaki tüm bilgilerin, akademik ve etik kurallara uygun bir biçimde elde edildiğini; aynı zamanda bu kural ve davranışların gerektirdiği gibi, bu çalışmanın özünde olmayan tüm materyal ve sonuçları tam olarak aktardığımı ve referans gösterdiğimi beyan ederim. 02/02/2026

Sena AKBAş

ÖZET

ERZİNCAN İLİNDEKİ KARAYOLLARINA YAKIN ARAZİLERDE YETİŞTİRİLEN BUĞDAYLARIN AĞIR METAL İÇERİKLERİNİN ve SAĞLIK RİSKLERİNİN ARAŞTIRILMASI

Sena AKBAŞ

Yüksek Lisans Tezi, Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi, Fen Bilimleri
Enstitüsü,
Gıda Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Mustafa Fatih ERTUGAY
2026, 63 Sayfa

Bu çalışmada, Erzincan organize sanayi çevresindeki Erzincan-Erzurum karayolundan farklı noktalardan toplanan ekmeklik buğdaylardaki (*Triticum aestivum*) trafik, endüstriyel üretim ve tarımsal faaliyet kaynaklı alüminyum, arsenik, krom, manganez, kobalt, nikel, bakır, demir, çinko ve gümüş gibi ağır metal seviyelerinin karayoluna olan mesafeye bağlı olarak değişimi ve bu kirliliğin buğday tüketimi yoluyla insan sağlığı açısından oluşturduğu potansiyel riskler değerlendirilmiştir. Arsenik ($0.0289-0.0117 \mu\text{g kg}^{-1}$), krom ($0.250-0.078 \mu\text{g kg}^{-1}$), alüminyum ($20.19-3.66 \mu\text{g kg}^{-1}$), kobalt ($0.120-0.046 \mu\text{g kg}^{-1}$), manganez ($53.19-18.16 \mu\text{g kg}^{-1}$), nikel ($3.10-1.40 \mu\text{g kg}^{-1}$), bakır ($6.30-2.73 \mu\text{g kg}^{-1}$), demir ($56.47-32.79 \mu\text{g kg}^{-1}$), çinko ($39.01-26.98 \mu\text{g kg}^{-1}$) ve gümüş ($0.00317-0.00028 \mu\text{g kg}^{-1}$) gibi çeşitli ağır metallerin seviyelerinin karayolundan olan mesafeye bağlı olarak azalma gösterdiği belirlenmiştir. Bununla birlikte, insan sağlığına yönelik risk değerlendirmesi kapsamında hesaplanan tehlike indeksi (HI) değerinin, 1'in üzerinde bulunması, toplam sağlık riskinin tek bir metalden ziyade çoklu metal maruziyetinin birleşik etkisinden kaynaklandığını göstermektedir. Hedef Tehlike Katsayıları (THQ) bakımından, özellikle manganez (THQ= 1.779) ve kobaltın (THQ=1.746) değerlerinin 1'in üzerinde olması, HI'nin yükselmesinde baskın belirleyiciler olarak öne çıkmıştır. Diğer metallerin THQ değerleri 1'in altında kalmasına rağmen, toplam etkiyi artırarak HI'nin büyümesine katkı sağladığı belirlenmiştir. Sonuç olarak, çalışma alanında yetiştirilen buğdayın kısa vadede doğrudan "tehlikeli" olarak değerlendirilmesinden ziyade, özellikle uzun dönemli tüketim senaryolarında insan sağlığı açısından izlenmesi gerektiği ortaya konulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Ağır metal, buğday, çevresel kirlilik, sağlık risk analizi, hedef tehlike katsayısı, tehlike indeksi

ABSTRACT

INVESTIGATION of HEAVY METAL CONTENT AND HEALTH RISKS of WHEAT GROWN in AREAS NEAR HIGHWAYS in ERZİNCAN PROVINCE

Sena AKBAŞ

Master's Thesis, Erzincan Binali Yıldırım University, Institute of Science and
Technology,
Department of Food Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Mustafa Fatih ERTUGAY

2026, 63 Pages

In this study, the variation of heavy metal concentrations—including aluminum, arsenic, chromium, manganese, cobalt, nickel, copper, iron, zinc, and silver—in bread wheat (*Triticum aestivum*) samples collected from different locations along the Erzincan–Erzurum highway near the Erzincan Organized Industrial Zone was investigated in relation to distance from the roadway. Potential human health risks associated with wheat consumption were also assessed, considering contributions from traffic emissions, industrial activities, and agricultural practices. It was determined that the concentrations of various heavy metals, including arsenic ($0.0289\text{--}0.0117\ \mu\text{g kg}^{-1}$), chromium ($0.250\text{--}0.078\ \mu\text{g kg}^{-1}$), aluminum ($20.19\text{--}3.66\ \mu\text{g kg}^{-1}$), cobalt ($0.120\text{--}0.046\ \mu\text{g kg}^{-1}$), manganese ($53.19\text{--}18.16\ \mu\text{g kg}^{-1}$), nickel ($3.10\text{--}1.40\ \mu\text{g kg}^{-1}$), copper ($6.30\text{--}2.73\ \mu\text{g kg}^{-1}$), iron ($56.47\text{--}32.79\ \mu\text{g kg}^{-1}$), zinc ($39.01\text{--}26.98\ \mu\text{g kg}^{-1}$), and silver ($0.00317\text{--}0.00028\ \mu\text{g kg}^{-1}$) showed a decreasing trend with increasing distance from the highway. However, the calculated Hazard Index (HI) exceeding unity indicates that the overall health risk arises from the combined effects of multiple metal exposures rather than from a single element. In terms of Target Hazard Quotient (THQ), manganese (THQ=1.779) and cobalt (THQ=1.746) having values above 1 emerging as dominant contributors to the elevated HI values. Although the THQ values of the remaining metals were below unity, their cumulative effects contributed to the overall increase in HI. Consequently, while the wheat produced in the study area cannot be classified as acutely hazardous, the findings highlight the necessity of monitoring potential health risks associated with long-term consumption.

Keywords: Heavy metals, wheat, environmental pollution, health risk assessment, target hazard quotients, hazard index

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans öğrenim süresi boyunca, desteklerini esirgemeyen ve bu yolda bilgi, tecrübesi ve yardımlarıyla ilerlememi sağlayan danışman hocam Sn. Prof. Dr. Mustafa Fatih ERTUGAY’a teşekkürlerimi borç bilirim.

Analizlerimi gerçekleştirmemde yardımcı olan hocalarım ve teknik görüşleriyle destek olan arkadaşlarıma teşekkürlerimi sunarım.

Hayatımın her aşamasında beni destekleyen, her zaman yanımda olan ve varlıklarını güç olarak hissettiğim aileme teşekkür ederim.

Sena AKBAŞ

Şubat, 2026

İçindekiler

ÖZET	i
TEŞEKKÜR	iii
TABLO LİSTESİ	vi
ŞEKİLLER LİSTESİ	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	viii
1. GİRİŞ	1
1.1. Arsenik (As).....	9
1.2. Krom (Cr)	10
1.3. Kobalt (Co)	11
1.4. Nikel (Ni).....	11
1.5. Bakır (Cu)	12
1.6. Manganez (Mn)	13
1.7. Alüminyum (Al).....	13
1.8. Gümüş (Ag).....	14
1.9. Demir (Fe)	15
1.10. Çinko (Zn)	15
2. KAYNAK ÖZETLERİ	17
3. MATERYAL ve YÖNTEM	25
3.1. Materyal.....	25
3.1.1. Örnekleme Alanı	25
3.1.2. Örneklerin hazırlanması	26
3.2. Metot	26
3.2.1. Ağır Metal Analizi	26
3.2.2. Sağlık Risk Değerlendirmesi.....	27
3.2.2.1. Kanserojen olmayan risk değerlendirme	27
3.2.2.2. Kanserojen risk değerlendirme.....	28
3.2.3. İstatistiksel Analiz.....	29

4. ARAşTIRMA BULGULARI VE TARTIşMA.....	30
5. SONUÇ	45
KAYNAKLAR.....	48



TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 1.1. Bazı ağır metallerin kaynakları, günlük en fazla tolere edilebilecek dozları ve toksik etkileri	5
Tablo 1.2. WHO/FAO ve US EPA tarafından belirlenen ağır metal sınır değerleri ($\mu\text{g g}^{-1}$).....	8
Tablo 3.1. Sıcaklık kontrollü mikrodalga bozundurma programı	26
Tablo 3.2. ICP MS ölçüm parametreleri.	27
Tablo 4.1. Buğdaylardaki ağır metal seviyelerinin mesafeye bağlı olarak değişimi	30
Tablo 4.2. Ağır metal seviyeleri ve mesafe arasındaki korelasyon analizi	32
Tablo 4.3. Ağır metallerin mesafeye bağlı olarak değişimi ve regresyon analizi	33
Tablo 4.4. Ağır metallerin mesafeye göre değişim oranları	35
Tablo 4.5. Buğday örneklerinin tahmini günlük alım miktarı (EDI), hedef tehlike katsayısı (THQ) ve karsinojenik risk (CR) değerleri	42

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Otoyol kenarındaki kirleticiler ve kaynakları.....	4
Şekil 3.1. Erzincan-Erzurum karayolu güzergahındaki buğday örneklerinin alındığı alan (39°44'27" K ve 39°23'50" D).	25
Şekil 4.1. Buğday örneklerinde As seviyesi ile mesafe arasındaki ilişki	36
Şekil 4.2. Buğday örneklerinde Al seviyesi ile mesafe arasındaki ilişki.....	37
Şekil 4.3. Buğday örneklerinde Cr seviyesi ile mesafe arasındaki ilişki.....	37
Şekil 4.4. Buğday örneklerinde Mn seviyesi ile mesafe arasındaki ilişki	38
Şekil 4.5. Buğday örneklerinde Fe seviyesi ile mesafe arasındaki ilişki.....	38
Şekil 4.6. Buğday örneklerinde Co seviyesi ile mesafe arasındaki ilişki	39
Şekil 4.7. Buğday örneklerinde Ni seviyesi ile mesafe arasındaki ilişki.....	39
Şekil 4.8. Buğday örneklerinde Cu seviyesi ile mesafe arasındaki ilişki	40
Şekil 4.10. Buğday örneklerinde Ag seviyesi ile mesafe arasındaki ilişki.....	41

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

'	Dakika
"	Saniye
Ag ⁺	Gümüş iyonu
Al	Alüminyum
As	Arsenik
Bar	Basınç birimi
Be	Berilyum
C	Metal konsantrasyonu (µg kg ⁻¹)
Cd	Kadmiyum
Cl ⁻	Klor iyonu
cm	Santimetre
Co	Kobalt
Cr	Krom
Cu	Bakır
Dk	Dakika
Fe	Demir
H ₂ O ₂	Hidrojen peroksit
Hg	Civa
HNO ₃	Nitrik asit
K	Potasyum
Kg	Kilogram
da	Dekar
km	Kilometre
L	Litre
m	Metre
mg	Miligram
U	Uranyum
mm	Milimetre
Mn	Manganez
Mo	Molibden
Ni	Nikel

NO ₃ ⁻	Nitrat iyonu
Pb	Kurşun
PO ₄ ³⁻	Fosfat iyonu
Sb	Antimon
Sc	Skandiyum
Se	Selenyum
Sn	Kalay
SO ₄ ²⁻	Sülfat iyonu
Tl	Talyum
V	Vanadyum
W	Watt
Zn	Çinko
ABD	Amerika Birleşik Devletleri
AT	Avrupa Topluluğu
ATn	Ortalama ömür (70 yıl × 365 gün)
BW	Vücut ağırlığı (yetişkin için ortalama 70 kg)
CR	Karsinogenik Risk
CsF	Kanser Eğim Faktörü
DNA	Deoksiribonükleik asit
ED	Ömür boyu maruz kalma süresi
EDI	Tahmini Günlük Alım Miktarı (Estimated Daily Index)
HI	Tehlike İndeksi (Hazard Index)
ICP-MS	Eşleşmiş Plazma Kütle Spektrometresi
IR	Günlük buğday tüketim miktarı (g gün ⁻¹)
AB	Avrupa Birliği
MRL	Minimum Risk Seviyesi
NIOSH	Ulusal İş Sağlığı ve Güvenliği İdaresi
OSHA	İş Sağlığı ve Güvenliği İdaresi
PCF	Bitki Konsantrasyon Faktörü
WHO	Dünya Sağlık Örgütü
ppm	Milyonda bir
R _d	Oral Referans Doz
SPSS	İstatistiksel analiz yazılımı

THQ

Hedef Tehlike Katsayısı (Target Hazard Quotient)

US EPA

Amerika Birleşik Devletleri Çevre Koruma Ajansı



1. GİRİŞ

Tahıllar insan beslenmesinde temel bir besin grubu olarak kabul edilmekte olup, karbonhidratlar, proteinler, yağlar, lif ve çeşitli temel vitaminler açısından zengin besin içeriğine sahiptir. Bu besin öğelerini dengeli bir şekilde içermesi, tahılları hem enerji sağlayıcı hem de besin değeri yüksek bir kaynak hâline getirmektedir. Özellikle protein içeriğinin yüksek olması, tahılların besinsel değerini ön plana çıkarmakta ve büyüme, doku onarımı gibi metabolik işlevler açısından önemli bir rol oynamaktadır (Senarathna vd. 2024).

İnsan beslenmesinde temel enerji ve besin kaynağı olarak önemli bir yere sahip olan tahıllar, dünya genelinde milyonlarca insanın günlük enerji ihtiyacının karşılanmasında kritik bir işlev görmektedir. Küresel ölçekte yapılan araştırmalar, tahılların bireylerin günlük diyet enerjisinin yaklaşık %45'ini sağlayarak kişi başına ortalama 1307 kcal'lık bir enerji katkısında bulunduğunu göstermektedir (Mani-López vd. 2023). Bu durum, tahılların sadece temel besin maddelerini temin etmedeki rolünü değil, aynı zamanda enerji dengesi ve beslenme güvenliği açısından da önemini ortaya koymaktadır. Ülkemizde kişi başına düşen günlük enerjinin yaklaşık %70'i, maliyeti düşük ve erişilebilirliği yüksek olan tahıllardan sağlanmaktadır. Bu tahıllar arasında en fazla tüketilen buğday ve buğday ürünleri (Kalkan ve Özarık, 2016) olmakla birlikte yetiştirilen tarım ürünlerinin başında tüm tarım alanlarının %20'sini oluşturan buğday gelmektedir (Özberk vd. 2016).

Buğday; karbonhidrat, protein, lif, vitamin ve mineral bileşenleri bakımından zengin bir besin kaynağı olarak insan beslenmesinde önemli bir yere sahiptir. Bu nedenle, stratejik öneme sahip bir gıda olan buğday ve buğday ürünlerinin üretimi ve tüketimi, hem enerji ihtiyacının karşılanması hem de sağlıklı beslenme açısından ülkemiz için büyük önem taşımaktadır (Kalkan ve Özarık, 2016). Buğday ayrıca tarım sektörü içerisinde ekonomik ve sosyo-kültürel alanda da öneme sahiptir (Atak, 2017).

Günümüzde birçok buğday türü bulunmakla birlikte, ekonomik açıdan en yaygın olanlar makarnalık (*Triticum durum*), ekmeklik (*Triticum aestivum*) ve bisküvilik (*Triticum compactum*) buğdaylardır. Bu sınıflandırma buğdayın kalite özellikleri ve kullanım amacına göre yapılmaktadır. Bisküvilik buğday yumuşak taneli olup protein içeriği düşüktür; makarnalık buğday sert taneli bir yapıya sahiptir; ekmeklik buğday ise yüksek gluten oranı sayesinde su tutma kapasitesi yüksek olan bir türdür (Kurt, 2012).

Buğday, dünya genelinde yıllık 730.9 milyon tonluk tüketimiyle temel bir besin kaynağı (FDA, 2017) olup, dünya genelinde 2023-2024 itibariyle, buğday üretiminin yaklaşık %80'ini

Hindistan, Rusya, Avrupa Birliği (AB), Kuzeybatı Asya, Çin ve Amerika Birleşik Devletleri (ABD) oluşturmaktadır. 2023/24 pazarlama yılı verilerine göre, Hindistan %14'lük pay ile birinci sırada, Rusya %13 ile ikinci sırada ve AB %11 ile üçüncü sırada yer almaktadır. Aynı ülkeler dünya buğday üretiminin yaklaşık %66'sını gerçekleştirmektedir. Üretim açısından ise 2023/24 yılı itibarıyla Çin %17'lik pay ile birinci, AB %17 ile ikinci ve Hindistan %14 ile üçüncü sırada bulunmaktadır (TEPGE, 2024). Ülke genelinde yaklaşık üretim miktarı 22 milyon ton olup, 2022-2023 yılında 6.6 milyon hektar olan buğday ekim alanı olan ülkemizde 2023-2024 yıllarında 6.8 milyon hektara yükseldiği tahmin edilmektedir. Aynı yıllarda buğday verimi 298 kg/da'dan 322 kg/da'a yükselmiştir (TÜİK, 2024). Türkiye, dünya buğday üretimi sıralamasında 10. sırada yer almaktadır (TEPGE, 2024).

Türkiye'de günlük kalori ihtiyacının %53'ü ekmek ve diğer buğday esaslı ürünlerden elde edilmektedir (Altuner vd. 2019). İnsan yaşamının sürdürülebilmesi, bu temel besin maddelerinin güvenli ve sürekli bir şekilde temin edilmesine bağıdır. Bu besinlerin en önemli kaynağı ise tarım ve gıda üretimidir. Dolayısıyla, tarımsal üretimin verimliliğinin korunması ve üretim faaliyetlerinin kesintisiz biçimde devam etmesi hayati bir önem taşımaktadır (Güngör vd. 2022). Bu bağlamda, buğday üretiminin yapıldığı tarım alanları günümüzde stratejik bir değer kazanmıştır.

Buğdayın beslenme açısından taşıdığı kritik önem ve tarımsal üretimdeki stratejik yeri göz önünde bulundurulduğunda, üretim yapılan çevresel koşulların sürdürülebilirliği daha da büyük bir anlam kazanmaktadır. Ancak modern üretim süreçlerinin yoğunlaşması, artan nüfusun ihtiyaçları, ilaçlama ve gübreleme gibi yanlış uygulamalar, bu değerli tarım alanlarının giderek çeşitli çevresel risklerle karşı karşıya kalmasına yol açmaktadır. Özellikle toprak, su ve hava kalitesindeki bozulmalar, hem ürün verimliliğini hem de insan sağlığını doğrudan etkileyebilecek boyutlara ulaşmıştır. Bu nedenle, buğday üretiminin gerçekleştirildiği ekosistemlerin maruz kaldığı çevresel tehditlerin ayrıntılı bir şekilde ele alınması, üretim güvenliğinin ve gıda kalitesinin korunması açısından büyük önem taşımaktadır.

İnsan kaynaklı hatalı uygulamalar sonucunda toprak ekosisteminin fiziksel, kimyasal ve biyolojik dengesi bozulmakta, bu durum toprakta yaşayan canlıları ve dolayısıyla üretim kapasitesini olumsuz yönde etkilemektedir (Algan ve Bilen, 2005). Örneğin bu topraklarda yetiştirilen bitkilerde kullanılan gübreler ve pestisitler, atık suların ve arıtma çamurlarının uygun önlemler alınmadan tarım alanlarında uygulanması ile endüstriyel ve evsel atıkların toprağa bırakılması, toprak kirliliğinin temel sebepleri arasında yer almaktadır (Kadioğlu,

2021). Bu uygulamalar toprağın doğal yapısının bozulmasına ve fiziksel, kimyasal ve biyolojik özelliklerinde olumsuz değişimlere yol açmaktadır. Özellikle pestisit kalıntıları ve diğer kirleticiler toprağın verimliliğini azaltmakla kalmayıp, ekosistem dengesini ve canlı sağlığını da tehdit etmektedir (Yıldız, 2011). Bu durum, bitkilerin de besin alım kapasitesini sınırlamakta, toprağın su tutma kapasitesini düşürmekte ve uzun vadede tarımsal üretim potansiyelini olumsuz yönde etkilemektedir. Ayrıca gıda zincirine geçmesi, insan ve hayvan sağlığı üzerinde ciddi riskler oluşturmaktadır (Alengebawy vd. 2021). Bu gelişmenin bir sonucu olarak ortaya çıkan çevre kirliliği ise insanlığın geleceğini tehdit etmektedir.

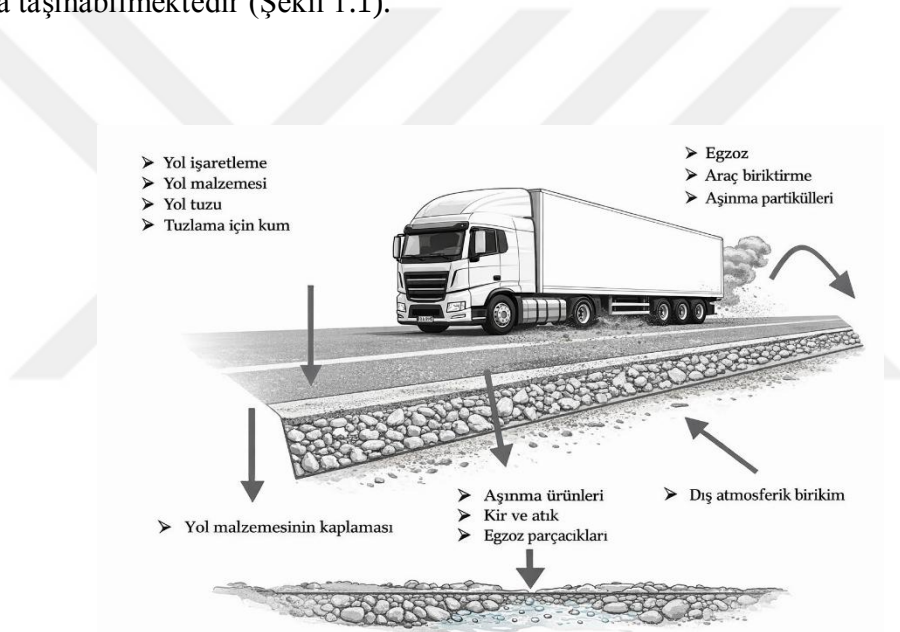
Artan insan nüfusunun ihtiyaçlarını karşılamak için yoğunlaşan ilaçlama, pestisit gibi tarımsal faaliyetler bu kirliliğin bir nedenidir (Özkan, 2017). Özellikle gelişmiş ve gelişmekte olan ülkelerde yaşanan çevre kirliliği sonucunda hava, su ve toprakta biriken kirleticilerin oluşturdukları toksikler insan sağlığını ciddi anlamda tehdit etmektedir (Yurdakul vd. 2017).

21.yüzyılda çevre kirliliği, sanayileşme ve nüfus artışının eş zamanlı olarak hız kazanmasıyla birlikte küresel ölçekte ciddi bir çevresel sorun haline gelmiştir. Artan nüfusun gereksinimlerini karşılamak amacıyla sanayi yatırımları teşvik edilmiş, bunun sonucunda sanayi işletmelerinin sayısında hızlı bir artış yaşanmıştır. Ancak bu büyüme sürecinde çevreye verilen zarar büyük ölçüde göz ardı edilmiş, çevre koruma önlemleri ise ekonomik gelişmeye engel oluşturacağı düşüncesiyle uzun süre geri planda kalmıştır. Özellikle sanayi kuruluşlarına ek mali yük getirecek çevresel tedbirler başlangıçta önemsenmemiştir. Kirliliğin artarak yaşamı tehdit eden boyutlara ulaşması, çevresel düzenlemelere duyulan ihtiyacı kaçınılmaz hale getirmiştir. Ancak bu farkındalık oluştuğunda, birçok yüzey suyu kaynağının hâlihazırda ciddi biçimde kirlenmiş olması, alınan önlemlerin etkinliğini sınırlamıştır.

Çevre kirliliği genellikle su kaynaklarında başlamasına rağmen, en yoğun etkisini toprakta göstermektedir. Toprak kirliliği, doğrudan tarımsal üretim kapasitesini azaltmakta ve gıda güvenliğini tehdit etmektedir (Bilen, 2017). Bu durum tarımsal gelişme hızını ve verimliliği düşürmekte, dolaylı olarak insan sağlığını da olumsuz yönde etkilemektedir (Kalkınma Bakanlığı Raporu, 2018). Gelişmekte olan ülkelerde kirliliğin artmasıyla birlikte yaşam koşulları zorlaşmakta; su yolları, yer altı suları ve toprakların kirlenmesi sonucunda tarımsal ürünlerde ciddi kayıplar yaşanmaktadır. Toprak verimliliğinin düşmesi, mikroorganizmaların yok olmasıyla birleştiğinde tarımsal üretim üzerinde kalıcı olumsuz etkiler bırakmaktadır (Gönültaş ve Kızılaslan, 2021). Toprak, tarımsal üretim ve ekosistem sağlığı için temel bir kaynak olmasına rağmen günümüzde çeşitli çevresel kirliliklerden olumsuz etkilenmektedir.

Aşırı nüfus artışı, hızlı sanayileşmeye ve dolayısıyla endüstriyel atık üretiminin artmasına neden olmaktadır. Bu endüstriyel atıklar; suyu, havayı ve toprağı kirleterek büyük çevresel tahribatlara yol açmaktadır (Ahmed vd. 2021). Gübre, pestisit ve herbisit üretimi yapan tarım kimyası endüstrileri gibi agro-kimyasal sektörlerden kaynaklanan endüstriyel atık sular; toksik, reaktif, kanserojen veya yanıcı olabilen, biyolojik olarak parçalanamayan kirleticiler olarak ağır metaller içermektedir (Santos vd. 2021; Ab rhaman vd. 2021).

Karayolu trafiğı, çevresel kirleticilerin oluşumu ve yayılımında önemli bir antropojenik kaynak olarak öne çıkmaktadır. Araçlardan kaynaklanan egzoz emisyonları, lastik ve asfalt aşınması, yol çizgileri ile yol bakımında kullanılan tuz ve malzemeler; toz, partikül madde ve ağır metallerin çevreye yayılmasına neden olmaktadır. Bu kirleticiler atmosferik çökme, yüzey akışı ve toprağı sızma gibi farklı yollarla çevredeki topraklara, yeraltı sularına ve tarım alanlarına taşınabilmektedir (Şekil 1.1).



Şekil 1.1. Otoyol kenarındaki kirleticiler ve kaynakları (Dawson, 2008).

Ağır metallerin neden olduğu çevre kirliliğı ekosistemlerin işleyişini ciddi biçimde bozarak çok yönlü olumsuzlukların ortaya çıkmasına yol açmaktadır. Bu kirlilik, bir ekosistemden diğerine doğrudan ya da dolaylı yollarla kolaylıkla taşınabilmekte ve böylece çevresel etkilerini geniş bir alana yaymaktadır. Özellikle sanayi, metal ve kimya fabrikalarından çıkan gazlar ve tozlar, kullanılan mantar ilaçları ve gübreler, çeşitli koruyucular, petrol, sentetik deterjanlar, pestisitler, radyoaktif kalıntılar çevreye ağır metallerin salınmasına sebep olmaktadır (Gülada, 2015). Bu ağır metaller çevreye yayıldıktan sonra ekosistemde birikerek kalıcı kirliliğı neden olmaktadır. Tablo 1’de bazı ağır metallerin kaynakları, günlük en fazla

tolere edilebilecek dozları ve toksik etkileri verilmiştir (Adriano, 2001; Bradl, 2005; Lisha vd. 2009).

Ağır metaller, doğada biyolojik olarak parçalanmayan ve çevrede uzun süre kalabilen kirleticiler olup, toksisite düzeyleri ve çevresel kirlilik potansiyelleri bakımından önemlidir. Ağır metal olarak yaklaşık 70 element bulunmakla birlikte, çevresel etkileri bakımından öne çıkan 20 element özel önem taşımaktadır. Bu elementler arasında Fe, Mn, Zn, Cu, V, Mo, Co, Ni, Cr, Pb, Be, Cd, Tl, Sb, Se, Sn, Ag, As, Hg ve Al yer almaktadır (Yıldız, 2004). Cu, Se ve Zn gibi organizmada bulunan bazı iz elementler de ağır metal kapsamında değerlendirilmektedir. Özgül ağırlıkları 5 g/cm^3 'ten ve atom numaraları 20'den büyük olan elementler, periyodik tabloda "geçiş elementleri" olarak bilinen geniş bir grubu oluşturur. Ağır metaller gıda, su ve hava yoluyla vücuda girebilir (Govind ve Madhuri, 2014).

Tablo 1.1. Bazı ağır metallerin kaynakları, günlük en fazla tolere edilebilecek dozları ve toksik etkileri

Ağır metal	Kaynaklar	Günlük en fazla tolere edilebilecek doz (g L^{-1})	Toksisite
Arsenik (As)	Hayvan yem katkıları, pestisitler, tekstil işlemleri, boyalar, veteriner ilaçları, seramik, cam üretimi, cevher eritme, kömür ve jeotermal elektrik üretimi	0.01	Fitotoksik, karayak hastalığı, kanserojen
Kadmiyum (Cd)	Nikel-kadmiyum piller, metal kaplama, korozyon önleyici kaplamalar, kömür yanması, boyalar	0.003	Fitotoksik, itai-itai hastalığı, kanserojen
Krom (Cr)	Ferro-alaşım üretimi, tekstil ve deri tabaklama, ahşap işleme, boyalar	0.05	Cr (III) memeliler için zararlı değil; Cr (VI) çok toksik ve kanserojen
Bakır (Cu)	Su boruları, kimya ve ilaç ekipmanları, mutfak eşyaları, çatı kaplamaları, alaşımlar, boyalar	2	Memeliler için düşük toksisite, bitkiler için dar tolerans aralığı
Kurşun (Pb)	Alaşımlar, seramik, plastik, cam ürünleri, kurşun-asit pilleri, levha ve boru üretimi, lehim, boyalar	0.01	Nörotoksisite
Cıva (Hg)	Elektrik ve ölçüm cihazları, katalizörler, diş dolguları, cıva buharlı lambalar, lehim, X-ray tüpleri, fungusitler, elektrotlar	0.006	Minamata hastalığı
Nikel (Ni)	Çelik alaşımlar, katalizörler, seramik ve cam kalıpları, Ni-Cd pilleri, protezler, kaynak çubukları, boyalar	0.07	Kontakt dermatiti, astım, kronik solunum yolu enfeksiyonları, kanserojen

Ağır metaller, bulundukları çevrede mikroorganizmalar tarafından kolaylıkla parçalanamadıkları için ekosistemlerde uzun süre kalıcı olabilen elementlerdir. Bu özellikleri nedeniyle zamanla toprak, su ve hava ortamlarında birikerek toksik etkilerini artırmakta ve ekolojik dengeyi tehdit eden önemli bir çevre sorunu haline gelmektedirler (Deveci, 2015). Ağır metallerin toksisite düzeyi; bulundukları ortamın özelliklerine, metalin kimyasal formuna (organik bileşik, iyon veya elementel formda olma durumu gibi), konsantrasyonuna, maruziyet süresine ve etkilediği canlı türüne bağlı olarak değişiklik göstermektedir (Okcu vd. 2009).

Ağır metaller, yüksek dozda vücuda alımı ve birikimi ile birçok olumsuzluğu beraberinde getirmektedir. Hızlı ve kontrolsüz kentleşme ve sanayileşme kentsel yoğunlaşmanın yer aldığı alanlarda ve sanayi faaliyetlerinin gerçekleştiği çevrelerde toprakta, ürünlerde ve su kaynaklarında ağır metal seviyesinde artış olduğu bilinmektedir. Yayılan ağır metallerin geniş atmosfer alana salınımı insan sağlığı için risk teşkil etmektedir (Shahid vd. 2017). Ağır metallerin bitkiler tarafından alınan formları, toprakta mevcut olan toplam miktarından daha fazla önem taşımaktadır. Toprakta ise en yaygın bulunan ağır metaller arasında As, Hg, Zn, Cd, Cr, Pb ve Ni öne çıkmaktadır (Wuana ve Okieimen, 2011).

Ağır metal kirliliği topraktaki bitkiler için tehlikelidir (Çatak vd. 2000). Öncelikle etkilenen grup bitkiler olmaktadır. Toprakta biriken ağır metaller bitkiler için gerekli olan besin elementlerinin topraktan alınmasını engeller (Yerli vd. 2020). Ancak, endüstriyel olarak kirlenmiş toprakların tamamen bitki örtüsünden yoksun olduğunu söylemek doğru değildir. Büyüme ve üreme genetik olarak adapte olabilmiş bitkilerle devam etmektedir. Bu bitkiler kirlenmemiş topraklarda ve zehirli ortamlarda yaşayabilen toleranslı ekotipler geliştirmiş türlere aittir. Ağır metal toleransının zamanla gösterdiği gelişim; farklı yaşam öyküsü, yaşa süresi ve tozlaşma sistemine sahip çeşitli bitki türlerinde gerçekleşmiştir (Mengoni vd. 2000).

Toprakta biriken ağır metaller, bitkiler tarafından kök yoluyla alınarak bitki dokularında birikir ve bu yolla besin zincirine dâhil olur. Bitkiler genellikle kökleri aracılığıyla toprak çözeltisinde iyon halde yer alan ağır metalleri alırlar. Ancak düşük düzeyde de olsa yapraklarıyla da alırlar (Yaldız ve Şekeroğlu, 2012). Bu ağır metallerin bitkiler üzerindeki etkileri çeşitli şekillerde ortaya çıkmaktadır. Örneğin kadmiyum, bitkide azot ve karbonhidrat metabolizmasını değiştirerek enzim aktivitesini engellemektedir (Asri ve Sönmez, 2006). Stomaların kapanmasına ve dolayısıyla transpirasyon yoluyla su kaybının azalmasına sebep olmaktadır (Guo vd. 2008). Al, Cr, As, Pb ve Cd bitki gelişimi için gerekli değildir ve çok düşük konsantrasyonlarda dahi bitkiler için toksik özellik gösterir (Shahid vd. 2017; Sevgi ve

Leblebici, 2022). Bitkilere ulaşan ağır metallerin zararlı olduğu bilinmekle birlikte bu durum esasen yüksek seviyelerde bulunmasına bağlı olarak gerçekleşmektedir.

Yüksek düzeyde bulunan ağır metaller bitkiler için zararlı olup zehir etkisi gösterirken; Cu, Mo, Zn, Mn, Co, Fe ve Ni çeşitli enzimler için kofaktör görevi yaparak düşük konsantrasyonlarda bitki ve hayvan gelişimi için gerekli olmaktadır (Yaldız ve Şekeroğlu, 2012; Sevgi ve Leblebici, 2022).

Bitkiler kendileri için zararlı elementleri elimine etmek ve faydalı olanları alabilmek için çeşitli işleyiş özelliklerine sahiptir. Böylece toksik olan ağır metallerin kökleri tarafından alınmasını ve köklerden üst kısımlara, tahıllara taşınmasını azaltır. Ancak temel/gerekli olmayan elementler bitkilere sızabilmek için çözünebilir metal taşıyıcılar kullanabilir. Bu nedenle ağır metalle kirlenmiş ortamlarda ağır metaller tahıl tanelerinde birikebilmektedir (Hussain vd. 2019). Ayrıca, bitkilerde biriken ağır metaller hayvanlara yem aracılığıyla taşınmakta, bu metaller daha sonra hayvansal ürünler olan et, süt ve türevleri üzerinden dolaylı biçimde insanlara ulaşmaktadır (Yerli vd. 2020). Bunun sonucunda, toprakla temas veya gıda tüketimi yoluyla hem insan hem de hayvan vücuduna geçiş gerçekleşmektedir.

Ağır metaller; ne kadar dozda ağır metale maruz kalındığı, yaş, kişinin bağışıklık gücü ve genel sağlık durumu, genetik yapı ve beslenme alışkanlıkları gibi birçok faktöre bağlı olarak öncelikli kanser olmak üzere çeşitli hastalıklara neden olabilir. Söz konusu etkiler vücutta tutunduğu yere ve kalma süresine göre de değişkenlik gösterir. Ağır metaller karaciğer ve böbreklerde kolaylıkla birikebilir ve kardiyovasküler düşüş, beyin fonksiyonlarında kayıp, cilt, mesane ve akciğer kanser risklerini artırır (Rahimi ve Gheysari, 2016). Ağır metal kirliliğinin neden olduğu sağlık sorunları arasında organik civa zehirlenmesi olarak adlandırılan minamata hastalığı, kadmiyum zehirlenmesi olarak bilinen itai-itai hastalığı gibi çeşitli hastalıklar sayılabilir. Genel anlamda söz konusu metallerin çoğu kanserojendir. Alzheimer, Parkinson ve çeşitli gelişim bozuklukları ile organ yetmezliği gibi hastalıkların meydana gelmesine neden olur (Pirsaheb vd. 2016).

Gıda güvenliği, insan sağlığının korunması açısından temel bir öncelik olup, çevresel kirleticilerin tarımsal ürünler yoluyla gıda zincirine dâhil olması bu kavramı doğrudan tehdit etmektedir. Bu bağlamda, ağır metaller, biyolojik olarak parçalanmamaları ve canlı dokularda birikme eğilimleri nedeniyle gıda güvenliği açısından en riskli çevresel kirleticiler arasında yer almaktadır. Tarım ürünleri, özellikle de tahıllar ve tahıl ürünleri, geniş kitleler tarafından düzenli olarak tüketilmeleri nedeniyle ağır metal maruziyetinde kritik bir rol oynamaktadır.

Dünya Sağlık Örgütü (WHO), Gıda ve Tarım Örgütü (FAO) ve ABD Çevre Koruma Ajansı'nın (US EPA) belirlemiş olduğu bitkilerde ve toprakta müsaade edilen ağır metal sınır değerleri Tablo 1.2'de verilmiştir (Ediene ve Umoetok, 2017; Onyedikachi vd. 2018; Özkan, 2017).

Tablo 1.2. WHO/FAO ve US EPA tarafından belirlenen ağır metal sınır değerleri ($\mu\text{g g}^{-1}$)

Metal	WHO – Yenilebilir Bitki	WHO – Bitki	US EPA – Toprak
Mg	-	-	-
Cr	-	0.5 / 0.2	400
Mn	2	-	-
Fe	20	30	-
Co	-	-	-
Ni	-	5	5
Cu	3	5	200
Zn	47.4	50	300
Cd	0.21	0.5	400
Pb	0.43	2	300

Avrupa Gıda Güvenliği Otoritesi (EFSA), ağır metallere diyet yoluyla maruziyet ve buna bağlı sağlık risklerini değerlendiren çok sayıda bilimsel görüş yayımlamıştır. EFSA tarafından yapılan değerlendirmelerde, kadmiyum için çocuklar ve yetişkinlerde yüksek maruziyet düzeylerinde (%95) sağlık temelli rehber değerlerin aşılabileceği belirtilmiştir; tahıllar ve tahıl ürünlerinin, diyetle alınan kadmiyumun başlıca kaynakları arasında yer aldığı vurgulanmıştır (EFSA, 2012). Bu durum, tahıl temelli beslenmenin yaygın olduğu toplumlarda kadmiyum maruziyetine bağlı risklerin daha da önem kazandığını göstermektedir. Kurşun maruziyetine ilişkin EFSA değerlendirmelerinde, özellikle bebekler, çocuklar ve hamile kadınlar gibi hassas gruplar için ciddi sağlık risklerine dikkat çekilmiştir. Tahıl ve tahıl ürünleri yoluyla alınan kurşunun, bu gruplarda nörogelişim üzerinde olumsuz etkilere neden olabileceği ve mevcut maruziyet düzeylerinin potansiyel bir endişe kaynağı olduğu bildirilmiştir (EFSA AFC Panel, 2010). Bu bulgular, ağır metallerin gıda zincirine taşınmasının yalnızca çevresel bir sorun değil, aynı zamanda önemli bir halk sağlığı problemi olduğunu ortaya koymaktadır.

Alüminyum için yapılan değerlendirmelerde ise EFSA, bu elemente ilişkin belirlenen Tolere Edilebilir Haftalık Alım (TWI) değerinin Avrupa nüfusunun önemli bir bölümünde aşılabileceğini belirtmiş; tahıllar ve tahıl ürünlerinin, diyetle alınan alüminyumun başlıca kaynakları arasında yer aldığını ifade etmiştir (EFSA, 2008). Bu durum, yaygın tüketilen

temel gıdaların ağır metal maruziyetindeki belirleyici rolünü açıkça göstermektedir. Nikel açısından EFSA, bu elementin insanlar için esansiyel olduğuna dair yeterli bilimsel kanıt bulunmadığını ve toksik etkilerine ilişkin yeterli doz–yanıt verisinin olmaması nedeniyle tolere edilebilir üst alım düzeyinin belirlenemediğini bildirmiştir (EFSA, 2005). Bu belirsizlik, özellikle uzun süreli düşük doz maruziyetlerin gıda güvenliği açısından dikkatle değerlendirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır.

Öte yandan, EFSA bazı elementlerin esansiyel olduğunu ve uygun düzeylerde alımlarının insan sağlığı açısından gerekli olduğunu da vurgulamaktadır. Bu kapsamda, bakır alımı ile DNA'nın oksidatif hasara karşı korunması, bağışıklık sisteminin normal işleyişi, enerji metabolizması, sinir sistemi fonksiyonları ve demir taşınımı arasında nedensel ilişkiler tanımlanmıştır (EFSA, 2009). Benzer şekilde Zn için de normal cilt yapısının korunması, protein sentezi, karbonhidrat ve makro besin metabolizması, saç ve tırnak sağlığı gibi birçok fizyolojik süreçle ilişkili olduğu ortaya konmuştur (EFSA NDA Panel, 2010).

Sonuç olarak, EFSA tarafından ortaya konulan bilimsel bulgular, tahıllar ve tahıl ürünlerinin ağır metal maruziyetinde hem risk hem de besinsel gereklilik boyutuyla kritik bir konumda bulunduğunu göstermektedir. Bu nedenle, özellikle çevresel kirlenme baskısı altında bulunan tarım alanlarında yetiştirilen buğday gibi temel gıda ürünlerinde ağır metal düzeylerinin belirlenmesi, gıda güvenliğinin sağlanması ve halk sağlığının korunması açısından büyük önem taşımaktadır.

1.1. Arsenik (As)

Doğada genellikle oksit, sülfid veya demir, sodyum, kalsiyum ve bakır gibi elementlerle oluşturduğu tuzlar halinde yaygın olarak bulunur (Singh vd. 2007). Yeryüzünde en fazla bulunan elementler arasında 20. yer alan arsenik, özellikle arsenit ve arsenat gibi inorganik bileşikleriyle çevre ve canlı yaşamı üzerinde ölümcül etkiler gösterebilir. Doğal olarak bulunan bir yarı metal olan arsenik, çevrede yaygın bir kirletici olarak bulunmakta ve gıda zincirine başlıca kontamine olmuş sulardan (EFSA, 2009) ve yaygın olarak tüketilen çeşitli gıda maddelerinden girmekte (Jiang vd. 2015) olup, birçok kanser türünde etkisini gösteren Sınıf I kanserojendir.

Arsenik için Minimum Risk Seviyesi (MRL), kronik maruziyet için $0.0003 \text{ mg kg}^{-1} \text{ gün}^{-1}$ ve akut maruziyet için $0.005 \text{ mg kg}^{-1} \text{ gün}^{-1}$ olarak tanımlanmıştır (ATSDR, 2016). Farklı ülkeler, durum buğdayındaki arsenik düzeyleri için farklı standartlar belirlemiştir. Örneğin, Avrupa Birliği (2015), 25 Haziran 2015 tarihli ve (AB) No 2015/1006 sayılı Komisyon

Tüzüğü ile (AT) No 1881/2006 sayılı Tüzükte yapılan değişiklik doğrultusunda, Ek II’de belirtildiği üzere, durum buğdayı dâhil olmak üzere gıda maddelerinde inorganik arsenik için maksimum düzeyi $0,1 \text{ mg kg}^{-1}$ olarak belirlemiştir (European Union, 2015). CODEX Alimentarius Komisyonu (FAO ve WHO, 2018), gıda amaçlı tuz için arsenik maksimum düzeyini $0,5 \text{ mg kg}^{-1}$, kavuzsuz pirinç için $0,2 \text{ mg kg}^{-1}$ ve kavuzlu pirinç için $0,35 \text{ mg kg}^{-1}$ olarak tanımlamıştır. Amerika Birleşik Devletleri’nde durum buğdayında inorganik arsenik için özel bir sınır bulunmamaktadır. Bununla birlikte, arsenik birikimi gösterebilen bir ürün olan pirinçte toplam arsenik için $0,5 \text{ mg kg}^{-1}$ sınırı uygulanmaktadır (U.S. Food and Drug Administration). Kanada’da ise durum buğdayındaki toplam arsenik miktarı, Kanada Gıda Denetim Ajansı’nın 2020 yılı düzenlemelerine göre $0,35 \text{ mg kg}^{-1}$ değerini aşmamalıdır (Canadian Food Inspection Agency, 2020).

İnsanlar bu elemente hem doğal süreçler hem de endüstriyel faaliyetler aracılığıyla maruz kalabilmektedir. İçme sularının arsenikle kirlenmesi; arsenikli pestisitlerin kullanımı, doğal mineral yataklarının çözünmesi veya arsenik içeren kimyasalların uygunsuz şekilde bertaraf edilmesi gibi nedenlerden kaynaklanabilir. Düşük düzeyde arsenik maruziyeti; bulantı ve kusma, eritrosit ve lökosit üretiminde azalma, anormal kalp atışları, ekstremitelerde parestezi ve vasküler hasar gibi etkilere yol açabilmektedir. Uzun süreli maruziyet ise cilt lezyonları, iç organ kanserleri, nörolojik bozukluklar, pulmoner hastalıklar, periferik damar hastalıkları, hipertansiyon, kardiyovasküler hastalıklar ve diyabet gibi kronik sağlık sorunlarının gelişimine neden olabilmektedir (Smith vd. 2000).

1.2. Krom (Cr)

Krom, dünyada en bol bulunan yedinci elementtir (Mohanty ve Patra, 2023). Çevrede çeşitli oksidasyon durumlarında bulunabilen krom özellikle üç değerlikli Cr (III) ve altı değerlikli Cr (VI) olmak üzere iki formda yaygındır (Rodríguez vd. 2009). Her iki form da insanlar, hayvanlar ve bitkiler için toksik özellik göstermektedir (Mohanty ve Patra, 2023). Krom, insülinin etkisini düzenleyerek karbonhidrat, yağ ve protein metabolizmasını etkileyen, doğada yaygın olarak bulunan bir metaldir. Havada genellikle $0,1 \text{ } \mu\text{g m}^{-3}$ ’ten fazla, kirlenmemiş sularda ise ortalama $1 \text{ } \mu\text{g L}^{-1}$ düzeyinde krom bulunmaktadır. Çoğu toprakta düşük miktarlarda ($2\text{--}60 \text{ mg kg}^{-1}$) krom tespit edilmekle birlikte, bazı kirlenmemiş topraklarda bu değer 4 g kg^{-1} ’a kadar ulaşabilmektedir (Kahvecioğlu vd. 2003).

Krom; metalürji, elektro kaplama, boya, pigment, koruyucu madde, kâğıt hamuru ve kâğıt üretimi gibi birçok endüstriyel alanda yaygın olarak kullanılmaktadır (Jaishankar vd. 2014). Kromun çevreye girişi çoğunlukla kanalizasyon atıkları ve gübreler yoluyla

gerçekleşmektedir (Ghani, 2011). Kalsiyum, çinko, stronsiyum ve kurşunun kromatlarını da içeren altı değerlikli krom bileşikleri suda yüksek derecede çözünür, toksik ve kanserojendir (Wolińska vd. 2013; Jaishankar vd. 2014). Ayrıca krom bileşiklerinin iyileşmesinin yavaş yavaş yavaşla ilişkilendirildiği ve kromat bileşiklerinin de hücrelerde DNA hasarına yol açabildiği bildirilmiştir (O'Brien, 2001; Matsumoto, 2006).

Dünya Sağlık Örgütü (WHO), tarımda kullanılan topraklar ve atık sularda altı değerlikli krom için güvenli sınırları sırasıyla 0.05 ppm ve 0.1 ppm olarak önermektedir (Chiroma vd. 2014; Aneyo vd. 2016). Bununla birlikte, Dünya Sağlık Örgütü, 70 kg ağırlığındaki bir yetişkin insan için önerilen günlük alım miktarını 50-200 µg gün⁻¹ olarak belirlemiştir (WHO, 2011).

1.3. Kobalt (Co)

Kobalt, doğal olarak bulunan ve yüzlerce organik ile inorganik bileşikte tespit edilebilen (Mahey vd. 2020) sert, parlak gümüş renğinde ve kırılgan yapıya sahip bir metaldir. Kobalt kirliliği asidik topraklardan başka nükleer santral kaynaklı katı atıklar, sızıntılar ve dökülmelerle de çevreye salınmaktadır. Yüksek düzeyde salınım olmadığı sürece zararlı etkilere neden olmaz (Blust, 2011). Bitkilerde kobalt için izin verilen en yüksek limit 50 mg kg⁻¹'dir (FAO/WHO, 2001).

Kobalta maruziyetin başlıca dış kaynakları soluma ve besin yoluyla alım iken, kobalt içeren kalça protezleri, ağız içi implantlar ve nanoparçacık kullanımı gibi iç kaynaklara bağlı maruziyet de giderek artmaktadır. Kobalt maruziyeti, akciğer fibrozu, hepatotoksisite, karsinogenez ve bronşit gibi üst solunum yolu iltihaplarının yanı sıra alt solunum sistemini etkileyen çeşitli solunum yolu rahatsızlıkları ile ilişkilendirilmiştir (Magaye vd. 2012). Kobalt sinir sistemi üzerindeki etkileri arasında hafıza kaybı, nöropatiler, optik atrofi ve bilateral sinir sağırlığı gibi bozukluklar yer almaktadır (Zhang vd. 2020). Kobalt, gastrointestinal sistemden emilir ve karaciğer, böbrek, pankreas, kalp, iskelet ve iskelet kasında birikir. Kobalt böbrekler yoluyla atılır; ancak maruziyet süresi uzadıkça ve doz yükseldikçe atılım verimliliği azalır.

1.4. Nikel (Ni)

Nikel, doğada çok düşük seviyelerde bulunan bir elementtir. Parlak, gümüşümsü renkte, sert ve ferromanyetik özellik gösteren bir metal olup, hava, su ve toprak gibi çeşitli çevresel ortamlarda yaygın olarak bulunur. Metal kaplama, elektrokaplama, devre kartı üretimi ve daha birçok farklı endüstri, çevreyi kirlüten ağır metal deşarjının ana kaynağıdır ve bu da tahıllardaki nikel konsantrasyonunu artırabilir (Khan vd. 2019a, b; Ugulu vd. 2021a, b).

Bu metali içeren ürünlerin yaygın olarak kullanılması, üretim, geri dönüşüm ve giderimin tüm aşamalarında nikel ve onun ikincil ürünleriyle çevrenin kaçınılmaz olarak kirlenmesine yol açmaktadır (Genchi vd. 2020). Çevrenin ağır metal kirlenme derecesi; işlenen nikel cevherinin türüne (sülfürük veya oksitli/laterit), cevherin kalitesine, çıkarma işlemi yöntemine, miktarına, kimyasal bileşim ve üretilen atıkların özelliklerine göre birçok faktöre bağlı olarak değişkenlik gösterir (Bartzas vd. 2021).

Çalışma ortamlarında havadaki nikel tozları için izin verilen sınır değeri 0.015 mg m^{-3} iken, nikel karbonil için bu değer 0.007 mg m^{-3} 'tür. Besin yoluyla alınan toplam nikel miktarı, hayvan yemleri ve bitkilerin içerdiği nikel düzeylerine bağlı olarak değişmektedir. Günlük nikel alımının yaklaşık yarısının ekmek, tahıl ve içeceklerin tüketimiyle gerçekleştiği bildirilmektedir (Özkan, 2009). Bitkilerdeki kabul edilebilir nikel seviyesi 67 mg kg^{-1} olarak bildirilmiştir (FAO/WHO, 2001).

Fazla nikelin vücuda alınmasıyla akciğer fibrosisi, böbrek ve kalp-damar hastalığı yaptığı bilinmektedir. Ayrıca ödem, zatüre, dermatitis, gırtlak ve akciğer kanseri gibi hastalıklara da yol açabilir. Nikelin başlangıçta gösterdiği belirtiler baş ağrısı, zafiyet, kusma ve bayılma olurken ileri düzeyde nefes almada zorluklar, nefes darlığı ve göğüs ağrısı gibi belirtiler olmaktadır (Kara ve Kara, 2018).

1.5. Bakır (Cu)

Bakır, enerji ve antioksidan metabolizmasında görev alan spesifik enzimler ile elektron taşıma proteinleri için bir kofaktör olarak işlev gördüğünden bilinen tüm canlı organizmalar için temel bir elementtir (Yasotha vd. 2021) ve aynı zamanda insanlar için hayati öneme sahip bir mikro besindir. Bakır; sakatatlar, deniz ürünleri, kabuklu yemişler, tohumlar, tam tahıllar, baklagiller ve bitter çikolata gibi gıdalarda bol miktarda bulunur.

Yetişkin bir bireyin vücudu ortalama 50–120 mg bakır içerir ve bu bakırın büyük bölümü karaciğer, beyin, kalp ve böbreklerde depolanır (Binesh ve Venkatachalam, 2024). Yetişkinler için günlük 2 mg bakır alımı önerilmektedir (FDA, 2013). Bununla birlikte, özellikle sakatatlar, kabuklu deniz ürünleri, kuruyemişler, tohumlar, çikolata ve mantarlar gibi kaynakların aşırı tüketimi ya da takviye kullanımı yoluyla fazla miktarda alınması toksisiteye ve çeşitli fizyolojik işlevlerin bozulmasına neden olabilir (Kumar ve Dwivedi, 2021).

Bu elementin önerilen düzeylerin üzerinde alınması, baş ağrısı, baş dönmesi, bulantı, ishal, karaciğer sirozu, böbrek hasarı, bağışıklık sisteminin zayıflaması ve üreme fonksiyonlarında bozulma gibi olumsuz etkilere yol açabilmektedir (Al Sidawi vd. 2021; Yasotha vd. 2021).

Ayrıca, bakırın Alzheimer hastalığı, Parkinson hastalığı ve amiotrofik lateral skleroz gibi nörodejeneratif bozuklukların patogeneğinde rol oynadığı bildirilmiştir (Gaetke ve Chow, 2003). ABD Çevre Koruma Ajansı (USEPA), bakırı kanser etkisi bulunmayan Grup D olarak sınıflandırmıştır (US EPA IRIS, 1988).

1.6. Manganez (Mn)

Manganez, periyodik tablonun 7B grubunda geçiş elementleri arasında yer alan gümüş grisi renkli bir elementtir. Doğada serbest halde bulunmayan manganez, genellikle diğer elementlerle bileşikler halinde bulunur ve yerkabuğunda en bol elementlerden biri olarak kabul edilmektedir (Eroğlu ve Şahiner, 2020).

Mangan eksikliği genellikle nadir görülmekte ve çoğunlukla yetersiz beslenmeye bağlı olarak ortaya çıkmaktadır. Sanayi ülkelerinde, günlük diyetle alınan manganez miktarı, tahmini günlük gereksinimden daha yüksektir ve manganez eksikliği nadir görülen bir beslenme bozukluğu gibi görünmektedir (Bornhorst vd. 2010). Bununla birlikte, diğer ağır metallerde olduğu gibi, manganezin fazla miktarda alınması da toksik etkilere yol açabilmektedir. Özellikle endüstriyel maruziyetlerde uzun süreli yüksek manganez alımı, sinir sistemi üzerinde olumsuz etkiler oluşturabilir ve Manganizm veya Parkinsonizm olarak adlandırılan, Parkinson hastalığına benzer semptomların gelişmesine neden olabilmektedir (Ratner ve Fitzgerald, 2017). Bu tür toksisite genellikle kontamine gıda ve su tüketimi yoluyla ortaya çıkmakta ve kardiyovasküler fonksiyonlar üzerinde de olumsuz etkiler yaratabilmektedir (Cheng vd. 2023; Monsivais vd. 2024).

1.7. Alüminyum (Al)

Alüminyum, yerkabuğunda yaklaşık %8 ile en çok bulunan üç elementten biridir ve periyodik tabloda Grup 13'de yer alır. Doğada metalik formda bulunmaz; alüminyum silikat, alüminyum oksit ve halojen tuzları halinde rastlanır (Fakri vd. 2006). Alüminyum, çevrede, gıda maddelerinde ve içme sularında doğal olarak bulunmaktadır (Nizamlioğlu ve Nizamlioğlu, 2023).

Toplam vücut alüminyum düzeyi yaklaşık 30–40 mg'dır. Şehirde yaşayan ve ortalama 70 kg ağırlığındaki bir bireyde, yiyeceklerle birlikte vücuda giren günlük alüminyum miktarı kilogram başına 0.01–1.4 mg arasında değişmektedir. Bu şekilde alınan alüminyum, mide mukozası ve proksimal ince bağırsaktan emilir. Emilim oranı oldukça düşüktür ve diyet faktörleri tarafından sınırlandırılır; buna karşın sitrat, paratiroid hormon, vitamin D ve üremi emilimi artırabilir. Bu nedenle sindirim sistemi yoluyla kana geçen alüminyum miktarı

genellikle %1'in altında olup, yaklaşık $1-2 \mu\text{g L}^{-1}$ seviyesindedir (Bakar ve Baba, 2009; Tayfur vd. 2022). Alüminyum için orta süreli maruziyete yönelik oral minimal risk düzeyi (MRL) değeri $1 \text{ mg Al kg}^{-1} \text{ gün}^{-1}$ olarak belirlemiştir (ATSDR, 2016).

Alüminyum genellikle zararsız bir bileşen olarak kabul edilse de, yüksek konsantrasyonlara veya düşük dozlarına uzun süreli maruziyet sağlık sorunlarına yol açabilmektedir. Bu nedenle vücuda fazla alüminyum alınması sakıncalıdır. İnsan vücudunda alüminyumun etkileri gastrointestinal, hematolojik, iskelet ve sinir sistemi üzerinde görülebilmektedir (Yurdakök ve İnce, 2008; Aslan ve Esen, 2010).

1.8. Gümüş (Ag)

Gümüş, periyodik tabloda 47. sırada yer alan ve “Argentum” anlamına gelen Ag sembolüyle gösterilen beyaz, parlak ve değerli bir metaldir. Gümüş elementi, iyileştirici ve biyolojik olarak faydalı birçok etkisi nedeniyle eski çağlardan beri aktif olarak kullanılan metaller arasında yer almaktadır. Özellikle, belirli miktarlarda kullanıldığında hücrelere karşı düşük toksisite göstermesi, gümüşün tercih edilmesinin temel nedenlerinden biridir (Kaptan, 2022).

Gümüş, insan vücudu için esansiyel bir element değildir ve biyolojik süreçlerde belirgin bir faydası yoktur. Ancak, çevresel ve mesleki maruziyet yoluyla insan sağlığı üzerinde toksik etkiler gösterebilir. Özellikle iyonik gümüş (Ag^+) ve çözünebilir gümüş bileşikleri, uzun süreli veya yüksek doz maruziyet durumlarında toksisiteye yol açmaktadır (Lansdown, 2006; NIOSH, 2015). Kronik gümüş maruziyetinin en bilinen sonucu argyriadır; bu durum, deri ve mukozalarda kalıcı mavi-gri renk değişimine yol açmaktadır (Carson, 2009).

Maruziyet süresi ve doz, toksik etkinin şiddetini belirleyen başlıca faktörlerdir. OSHA ve NIOSH, gümüş tozu ve çözünebilir bileşikleri için 8 saatlik ortalama maruziyet sınırını $0,01 \text{ mg m}^{-3}$ olarak belirlemiştir (NIOSH, 2015). Yüksek dozlarda ise karaciğer ve böbrek fonksiyonları etkilenebilir, hematolojik sistem ve solunum yollarında irritasyonlar gözlenebilir (Lansdown, 2006).

Hem insan hem bitkilerde toksik etki, gümüş maruziyetinin sıklığı, süresi ve formuna bağlıdır. İnsanlarda kısa süreli ve düşük seviyeli maruziyetler genellikle ciddi etki oluşturmazken, uzun süreli yüksek doz maruziyetler argyria ve organ toksisiteleri ile ilişkilidir (Carson, 2009). Bitkilerde ise çevresel metal birikimi, fotosentez, kök gelişimi ve hücre sağlığını bozabilir (Kumar ve Dwivedi, 2021).

Gümüşün cilt tahrişine yol açma potansiyelinin düşük olduğu bildirilmektedir. Bununla birlikte, bazı vakalarda göz tahrişi ve alerjik kontakt dermatit gözlenmiştir. Gümüşün

genotoksisite potansiyeline sahip olabileceği öne sürülmekle birlikte, kanserojen etkisini değerlendirmek için ek verilere ihtiyaç duyulmaktadır. Ayrıca bildirilen diğer toksik etkiler arasında karaciğer, böbrek, sinir sistemi ve hematolojik sistem üzerindeki etkiler yer almaktadır (Hadrup vd. 2018).

1.9. Demir (Fe)

Demir, dünya kabuğunda en bol bulunan ikinci metaldir (EPA, 1993) ve periyodik tabloda 26. sırada yer almaktadır. Hemen hemen tüm canlı organizmaların büyümesi ve hayatta kalması için kritik öneme sahip elementlerden biridir (Valko vd. 2005). Demir eksikliği anemisi dünyada en sık görülen mikro besin eksikliklerinden biridir (WHO, 2002). Algler gibi organizmalarda, sitokromlar ve katalaz gibi enzimlerde, ayrıca hemoglobin ve miyoglobin gibi oksijen taşıyan proteinlerde hayati bir bileşen olarak görev yapmaktadır (Vuori, 1995).

Demirin hücreler üzerindeki toksisitesi, oksidatif ve redüktif mekanizmaları aracılığıyla demir kaynaklı doku hasarına ve mitokondri ile lizozom gibi hücre içi organellere yönelik toksik etkilere yol açmaktadır. Aşırı demir alımı, potansiyel hücre hasara neden olabilen çeşitli serbest radikallerin oluşumunu tetikler. Demir kaynaklı hidroksil radikalleri, DNA'ya saldırarak hücre hasar, mutasyon ve malin dönüşümlere yol açmakta ve bunun sonucunda çeşitli hastalıkların gelişmesine katkıda bulunmaktadır (Grazuleviciene vd. 2009).

1.10. Çinko (Zn)

Çinko, insanlar için temel bir mikro besindir ve eksikliği önemlidir. Kalıtsal ve patolojik çinko eksikliklerinin yanı sıra, özellikle çinko konsantrasyonu ve biyoyararlanımı düşük olan tahılları tüketenlerde yetersiz beslenmeye neden olmaktadır (Aiqing vd. 2022). Çinko, birçok protein ve enzimin ayrılmaz bir parçasıdır ve DNA transkripsiyonu, yara iyileşmesi, kan oluşumu, bağışıklık fonksiyonu ve diğer birçok süreç dahil olmak üzere biyokimyasal, immünolojik ve klinik süreçlerde katalitik, yapısal, işlevsel ve düzenleyici roller üstlenir (Kambe vd. 2015).

Çinko, suda çözünebilen kloratlar, klorürler, sülfatlar ve nitratlar şeklinde bulunabilirken; oksitler, karbonatlar, fosfatlar ve silikatlar gibi formları ise nispeten suda çözünmez özellik göstermektedir. Çinko emilimi, topraktaki çinko konsantrasyonunu belirleyen önemli bir faktördür ve bu durum toprak pH'sı, kil mineral içeriği, toprak organik maddesi ve toprak tipi gibi faktörlerden etkilenmektedir. Çinko genellikle Cl^- , PO_4^{3-} , NO_3^- ve SO_4^{2-} iyonları ile bileşikler oluşturur (Önder, 2012).

Bitkiler için mikro besin elementi olan çinko, kontamine toprakta 150-300 mg kg⁻¹ kadar bulunur. Aşırı çinko bitkide hidrojen peroksit seviyesini ve elektrolit sızıntıyı artırmaktadır. Çinko fazlalığı, bitkilerdeki sürgünlerde manganez ve bakır eksikliğine yol açabilir, besin elementlerinin kökten sürgüne geçişini engelleyebilir. Büyümeyi geciktirir ve yaşlanmaya neden olur (Nagajyoti vd. 2010). Cu, Zn, Co, Mn ve Ni bitki gelişiminde düşük konsantrasyonlarda besin elementi olarak görev görürken yüksek konsantrasyonlarda zarar verecek etkilere neden olmaktadır. Çinkonun çeşitli hücresel işlevler için gerekli olduğu, ancak yüksek konsantrasyonlarda toksik olduğu bilinmektedir. Yetişkinler için günlük 15 mg çinko alımı önerilmektedir (FDA, 2013).

Bu çalışmada, Erzincan-Erzurum karayolu üzerinde yer alan organize sanayi bölgesi çevresindeki karayoluna yakın tarım arazilerinden farklı mesafelerden alınan buğdaylardaki ağır metal seviyeleri ve bu kirliliğin buğday tüketimi yoluyla insan sağlığı açısından oluşturduğu potansiyel riskler incelenmiştir. Bu kapsamda, buğdaylardaki ağır metal seviyeleri ve karayoluna olan uzaklığa bağlı olarak olası değişimler değerlendirilmiştir. Ayrıca, karayoluna olan mesafeye bağlı olarak farklı noktalardan alınan buğdayların insan tüketimi açısından risklerini değerlendirmek amacıyla; Tahmini Günlük Alım Miktarı (EDI), Hedef Tehlike Oranı (THQ), Tehlike İndeksi (HI) ve Karsinojenik Risk (CR) değerleri incelenmiştir. Çalışma, trafik ve sanayi kaynaklı ağır metal kirliliğinin tarımsal üretim üzerindeki etkilerini ortaya koymayı amaçlamaktadır.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

Yol kenarları, özellikle yoğun trafik akışına sahip karayolu güzergâhları, çevresel ağır metal birikimi açısından önemli risk alanları olarak kabul edilmektedir. Yapılan çalışmalar, ağır metal birikiminin kara yolundan olan mesafeye bağlı olarak değiştiğini ve genellikle yol kenarına yakın alanlarda en yüksek seviyelerde olduğunu göstermektedir (Brizio vd. 2016, Çelebi ve Gök, 2016; Pirsahab vd. 2016; Kul vd. 2021) .

Karayolları kullanımına bağlı olarak gelişen ağır metal kirliliğine yol açan arsenik, krom, kobalt, nikel, kadmiyum ve kurşun elementleri doğrudan etkilidir. Toprakta normal şartlarda belirli oranlarda bulunan bu elementler trafik yoğunluğu ile toprağa daha fazla bulaşarak oradan bitkilere geçmektedir. Toprak kirliliğine neden olan ve çalışma alanını oluşturan trafik kaynaklı ağır metal kirlenmeleri de bir başka unsur olarak öne çıkmaktadır. Tarım arazilerinin trafiğe yakın olan ve araç geçişlerinin yüksek olduğu bölgelerde daha fazla ağır metale maruz kaldıkları, kirlenme oranının trafiğe ve araç yoğunluğunun az olduğu bölgelere geçildikçe azaldığı görülmektedir (Kul vd. 2021).

Trafik kaynaklı kirliliğin nedenleri; kullanılan kaldırım ve dolgu malzemeleri, trafik ve kargo yoğunluğu, kullanılan yol ekipmanları, bakım ve işletme kaynaklı sorunlar ve dış kaynaklar olmak üzere beş ana başlıkta incelenebilir. Yolların yapımında kullanılan malzeme ve teknikleri, yolların ağır taşımacılıkta kullanılması veya yoğun kullanımı, sürüş teknikleri gibi birçok farklı neden kirlenmeye yol açmaktadır (Çelebi ve Gök, 2016).

Ağır metallerin toplam miktarlarının belirlenmesi, çevresel değerlendirmeler açısından büyük önem taşımaktadır. Özellikle, bitkiler tarafından alınabilir formda bulunan ağır metal miktarlarının saptanması, çevre kirliliğinin ve bu metallerin toksik etkilerinin ortaya konulması açısından kritik bir veri sağlamaktadır.

Hui vd. (2017) tarafından yapılan bir çalışmada, Çin'in Liaoning Eyaleti'nde Shenyang–Dalian karayolu boyunca yol kenarındaki topraklarda Fe (43.8 mg kg^{-1}), Cu (26.5 mg kg^{-1}), Cd (0.12 mg kg^{-1}), Ni (32.1 mg kg^{-1}) ve Zn (71.3 mg kg^{-1}) birikimi incelenmiş ve tarım arazilerindeki en yüksek metal seviyelerinin yol kenarından 25 m mesafeden alınan örneklerde olduğu tespit edilmiştir.

Niğde ilinde yapılan bir çalışmada, tarafından yapılan bir çalışmada, farklı noktalardan alınan toprak örneklerinde ağır metal kirliliği değerlendirilmiştir. Ağır metal içerikleri; Pb, Zn, Cu ve Mn için sırasıyla 13.6–19.47; 10.97–42.37; 6.9–25.7 ve 117.5–338 mg kg^{-1} aralığında bulunmuştur. Endüstriyel, tarımsal ve yerleşim alanlarından alınan topraklarda söz konusu

metallerde artış gözlenmiş; ancak tüm konsantrasyonların ilgili standartlara göre kabul edilebilir sınırlar içinde olduğu belirlenmiştir (Altay, 2017).

Başka bir çalışmada, bir çimento fabrikası çevresindeki farklı meşcere tiplerine ait orman alanlarının üst toprak tabakasında ağır metal birikimini incelenmiş ve fabrikaya 45–50 m mesafeden alınan toprak örneklerinde Cu, Zn, As, Co, Cd, Pb ve Hg konsantrasyonları sırasıyla 23.83, 0.038, 0.002, 31.14, 0.037, 13.95 ve 3.86 mg kg⁻¹ olarak belirlenmiştir. Analizler sonucunda, kobalt ve cıvanın Çevre ve Şehircilik Bakanlığı sınır değerlerini aştığı, diğer metallerin ise sınır değerlerin altında olduğu görülmüştür. Bu durum, bölge topraklarında ağır metal birikiminin başladığını ve gelecekte kirlilik riskinin artabileceğini göstermektedir (Baykanoğlu, 2024).

Kekik (*O. vulgare*), pancar (*B. vulgaris*) ve patlıcan (*S. melongena*) bitkilerindeki trafik kaynaklı ağır metal kirliliğinin incelendiği bir çalışmada, Toronto'daki kentsel yol kenarı alanlarında yetiştirilen kekik, pancar ve patlıcan bitkilerinde Cr, Mn, Cu, Ni, Cd, As, Sb ve Pb birikimi incelemiştir. Farklı trafik yoğunluklarına sahip dört bölgeden alınan toprak, bitki dokusu ve rizosfer örnekleri ICP-MS ile analiz edilmiş ve trafik kaynaklı ağır metal kirliliğinin tespiti yapılmıştır (Wiseman vd. 2013).

Dilbilir ve Gülser (2024) tarafından yapılan bir çalışmada, Van Organize Sanayi Bölgesi çevresindeki topraklarda endüstriyel kaynaklı ağır metal birikimini incelemek üzere kuzey, güney ve doğu yönlerinde altışar adet olmak üzere toplam 18 noktadan, organize sanayi bölgesine 0.2, 1.0 ve 2.0 km mesafelerden 0–20 cm derinlikte toplanan 54 örnek değerlendirilmiştir. Yapılan analizlerde; en yüksek As (2.74 mg kg⁻¹) ve Mo (1.14 mg kg⁻¹) değerleri 0.2 km mesafede; en yüksek Cr (89.33 mg kg⁻¹), Zn (37.11 mg kg⁻¹) ve Ni (93.15 mg kg⁻¹) ise 1 km mesafede belirlenmiştir. Pb, Cu ve Co için en yüksek konsantrasyonlar sırasıyla 3.59, 10.16 ve 10.18 mg kg⁻¹ olarak 2 km mesafede tespit edilmiştir. Genel olarak, sanayi bölgesinden uzaklaştıkça ağır metal seviyelerinde azalma eğilimi gözlenmiştir.

Buğday, İtalyan çimi ve marulda günlük trafik yoğunluğunun incelendiği bir çalışmada, tarafından yapılan bir çalışmada; Zn, Cu, Pb, Cd ve Ni birikimi incelenmiştir. Bitki örnekleri yollardan 22, 58 ve 200 m mesafelerden alınmış, ayrıca kirlenmemiş toprakla dolu saksılar kontrol amacıyla kullanılmıştır. Bitkiler arasında en yüksek Zn, Cd ve Ni düzeyleri marulda ölçülmüştür. Buğday tanesinde kurşun çok düşük düzeyde kalmış ve mesafeye bağlı değişmemiştir. Bu, kurşunun çoğunlukla hava kaynaklı alındığını göstermektedir (Yläranta, 1995).

Coşkun (2022) tarafından yapılan bir çalışmada, İstanbul'un Mevlanakapı ve Yedikule bölgelerinde yol kenarına uzaklığın karalahana ve roka gibi geniş yapraklı sebzelerdeki ağır metal birikimi üzerine etkisi incelenmiştir. Üç bölgeden ve iki mesafeden (<10 m ve 60 m) alınan toplam 24 sebze örneği ile toprak ve sulama suyu örneklerinde ağır metal düzeyleri analiz edilmiştir. Sebzelerde; Cd=4.38–55.11 mg kg⁻¹, Pb=0.07–0.32 mg kg⁻¹, Hg=2.56–22.37 mg kg⁻¹ ve Fe=1.10–22.37 mg kg⁻¹; toprakta Cd=32.37–51.17 mg kg⁻¹, Pb=4.06–17,22 mg kg⁻¹, Hg=5.08–19.45 mg kg⁻¹; sulama suyunda Cd=0.02–0.05 mg kg⁻¹ ve Pb=0.004–0.007 mg kg⁻¹ olarak belirlenmiştir. Sebze ve topraklarda kadmiyum ve cıvanın, sulama suyunda ise kadmiyumun sınır değerleri aştığı tespit edilmiştir.

Nijerya'da Lagos şehrindeki iki ana karayolu boyunca ağır metal birikimini belirlemek amacıyla yapılan bir çalışmada, toprak ve *Amaranthus viridis* örnekleri incelenmiştir. Örnekler 5–20 m mesafelerden alınmış, kırsal bölge referans olarak kullanılmıştır. Pb ve Cd değerleri sırasıyla toprakta 47–151 ve 0.30–1.33 mg kg⁻¹, bitki yapraklarında ise 68–152 ve 0.5–4.9 mg kg⁻¹ aralıklarında bulunmuştur. Bitki konsantrasyon faktörü (PCF) değerleri, yol kenarından uzaklaştıkça metal düzeylerinin azaldığını göstermiş ve yoğun trafik alanlarında yetişen *Amaranthus*'ta Pb ve Cd içerikleri referans alana göre anlamlı düzeyde yüksek (P<0.05) bulunmuştur. Topraktaki değerler kritik sınırların altında olsa da bitki dokularındaki seviyelerin normal limitleri aştığı belirlenmiştir (Atayese vd. 2008).

Viard vd. (2004) tarafından yapılan çalışmada, Fransa'daki A31 otoyolu yakınında trafik kaynaklı ağır metal birikimini değerlendirmek amacıyla 1–320 m mesafelerden toprak, yol kenarı toprağı ve Gramineae bitkilerinde Zn, Pb ve Cd düzeyleri analiz edilmiştir. Otoyol etkisinin 320 m'ye kadar uzandığı, en yüksek kirlenmenin ise 5–20 m mesafede görüldüğü belirlenmiştir. Bu bölgedeki bitkilerde Pb, Cd ve Zn değerleri sırasıyla 2.1, 0.06 ve 62 mg kg⁻¹ olarak tespit edilmiştir. Metal konsantrasyonları mesafe arttıkça azalmış, üç metal içinde karayolu kaynaklı kirliliğin en iyi göstergesinin Pb olduğu sonucuna varılmıştır.

Başka bir çalışmada, Batı Şeria'da iki ana şehri bağlayan yol boyunca yol kenarı toprakları ve yaygın bir bitki türü olan *Inula viscosa* üzerinde ağır metal birikimini tespit etmek amacıyla toprak ve yaprak örneklerinde ağır metal konsantrasyonları (Pb, Cd, Cu, Zn, Fe, Mn, Ni ve Cr) ölçülmüştür. Topraktaki ortalama değerler Pb=87.4, Cd=0.27, Cu=60.4, Zn=82.2, Fe=15.7, Mn=224, Ni=18.9, Cr=42.4 µg g⁻¹, bitkilerde ise Pb=7.25, Cd=0.1, Cu=10.6, Zn=47.6, Fe=730, Mn=140, Ni=4.87, Cr=7.03 µg g⁻¹ olarak bulunmuştur. Yol kenarından uzaklık arttıkça metal konsantrasyonları azalmış; Cd dışında tüm metallerle negatif korelasyon gözlenmiştir. Yol kenarı etkisi yaklaşık 20 m'ye kadar belirgin olup, bu mesafeden sonra

değerler çevresel arka plana yaklaşmıştır. Bulgular, tarımsal ve doğal alan planlamasında yol kenarından uzaklığın önemini vurgulamaktadır (Swaileh vd. 2004).

Naser vd. (2012) tarafından yapılan bir çalışmada, Bangladeş'in Gazipur kentinde ana otoyol boyunca yol kenarı toprakları ve sebzelerde (su kabağı, kabak) Pb, Cd ve Ni birikimi incelenmiştir. 0, 50, 100 ve 1000 m mesafelerden alınan toprak örneklerinde, Pb ve Ni konsantrasyonlarının yol kenarına yakın noktalarda en yüksek olduğu ve mesafe ile azaldığı gözlemlenirken Cd ise mesafeye bağlı değişim göstermemiştir. Toprak ve bitkiler arasındaki farklar, metal birikiminin yalnızca trafik etkisiyle değil, bitki türü, toprak yapısı ve çevresel koşullara bağlı olduğunu göstermektedir. Tüm mesafelerde metal birikim sırası $Ni > Pb > Cd$ olarak belirlenmiştir. Bulgular, yol kenarındaki tarımsal üretimde ağır metal riskinin özellikle kurşun ve nikel açısından önemli olduğunu ortaya koymaktadır.

Bir diğer çalışmada, Bingöl-Erzurum karayolu yakınındaki topraklarda Co, Cr, Cu ve Mn birikimini belirlemek amacıyla yolun her iki tarafından 0, 2, 15 ve 40 m mesafelerden (0–15 cm derinlik) toplam 80 örnek analiz edilmiştir. Sonuçlarına göre; Co, Cr, Cu ve Mn konsantrasyonları sırasıyla 0.001–0.147, 0–0.68, 0–0.008 ve 0–0.364 mg kg⁻¹ aralığında tespit edilmiştir. Tüm elementlerin seviyeleri kirlilik kriterlerinin altında bulunmuş ve yolun düşük trafik yoğunluğunu yansıtmıştır. Elementlerin yoğunluk sırası $Cr > Mn > Co > Cu$ şeklindedir. En yüksek ağır metal değerleri yol kenarında (0 m) görülmüş, mesafe arttıkça konsantrasyonların azaldığı belirlenmiştir (Sürücü vd. 2018).

Ifeoma vd. (2014) tarafından yapılan bir çalışmada, Güneybatı Nijerya'daki bir taş ocağı çevresinde toprak ve bitkilerde ağır metal konsantrasyonları değerlendirilmiştir. Örneklem, taş ocağı işlem tesisinden 1, 50, 100, 150, 200, 250 ve 300 m uzaklıktaki noktalarda yapılmıştır. Toprak ve bitki örneklerindeki Cd, Zn, Cu, Pb, Ni, Cr, Co, Fe, Se ve Mn seviyeleri analiz edilmiştir. Toprak örneklerinde Cd, Cr, Pb, Se, Ni, Co, Mn ve Zn konsantrasyonları, taş ocağından uzaklaştıkça azalmış; Fe ve Cu ise farklı noktalarda düzensiz değişim göstermiştir. Bitki dokularında Cd, Cr, Pb, Se, Ni ve Co düşük seviyelerde bulunmuş (0.01–0.05 mg kg⁻¹) ve toksik sınırların altında kalmıştır.

Mardin'de Viranşehir–Kızıltepe karayolu boyunca topraklardaki trafik kaynaklı ağır metal kirliliğini belirlemek amacıyla yapılan çalışmada, karayolunun sağ ve sol tarafında 0, 15, 30 ve 60 m uzaklıklardan 96 toprak örneği alınmıştır. Analizlerde $Pb=0.64–2.24$, $Cd=0.26–0.40$, $Ni=27–42$, $Cr=17–28$ ve $Cu=9.9–14.2$ mg kg⁻¹ değerleri elde edilmiş ve tüm metallerin sınır değerlerin altında olduğu belirlenmiştir. Karayolundan uzaklaştıkça tüm ağır metal konsantrasyonlarında azalma görülmüş olup, bu durumun kirliliğin büyük ölçüde trafik

kaynaklı olduğunu göstermiştir. Topraklardaki metal yoğunluğunun sıralaması $Ni > Cr > Cu > Pb > Cd$ olarak bulunmuştur (Bilge ve Çimrin, 2013).

Bwatanglang vd. (2019) tarafından yapılan bir çalışmada, Hong bölgesindeki Plaifu, Shiwa, Fadama-rake ve Damdrai'den alınan toprak ve bitki örneklerinde Cd, Pb, Zn, Cr, Fe, Mg, Mn, Co, Ni ve Cu düzeyleri incelenmiştir. Toprak örnekleri yol kenarından 10, 20 ve 30 m uzaklıklardan ve 0–30 cm derinliklerden alınırken bitki örnekleri ise aynı bölgelerden rastgele toplanmıştır. Topraktaki ağır metal sıralaması $Fe > Mn > Mg > Pb > Zn > Ni > Co > Cu > Cr > Cd$; bitkilerde ise $Fe > Mn > Mg > Zn > Pb > Ni > Cu > Cd > Co > Cr$ olarak belirlenmiştir. Hem mesafe hem de derinlik arttıkça konsantrasyonlar azalmıştır.

Başka bir çalışmada, Denizli'yi komşu illere bağlayan karayolu üzerindeki altı kesimde, tarım arazilerinde ulaşım kaynaklı Cr, Ni, Hg, Pb ve U kirliliği ve bu metallerin yol ekseninden uzaklığa bağlı değişim incelenmiştir. Her yol için şehir merkezinden sonra, tarım alanlarının yoğun olduğu bölgelerde yolun sağ ve solundan 0–50 m, 50–100 m ve 100–150 m mesafelerde toplam 108 toprak örneği alınmıştır. Sonuçlara göre $Cr=186.4-854.1$, $Ni=134.4-700.1$, $Hg=0.9-1.7$, $Pb=7.6-23$ ve $U=2.1-3.3 \text{ mg kg}^{-1}$ aralığında bulunmuştur. Sınır değerlerle karşılaştırıldığında Pb ve U'un izin verilen düzeylerin altında, diğer elementlerin ise üzerinde olduğu belirlenmiştir. Mesafe arttıkça Cr ve Ni değerlerinin yükseldiği; Hg ve Pb değerlerinin ise azaldığı saptanmıştır (Atilla vd. 2017).

Yan vd. (2013) tarafından yapılan çalışmada, Qinghai–Tibet Platosu'ndaki yol kenarı topraklarında Cu, Zn, Cd, Pb, Cr, Co, Ni ve As konsantrasyonları ve trafik kaynaklı potansiyel ekolojik riskler incelenmiştir. Çalışmada beş yol parçası boyunca toplam 120 toprak örneği toplanmış ve yol kenarı mesafesi ile metal konsantrasyonu ilişkisi doğrusal olmayan regresyon ile analiz edilmiştir. Sonuçlar, hem ağır metal konsantrasyonlarının hem de ekolojik risk indekslerinin yol kenarından uzaklaştıkça üssel olarak azaldığını göstermiştir. Yol kenarından 10 m uzaklıkta orta düzeyde potansiyel ekolojik risk tespit edilmiş ve en yüksek risk Cd'a ait bulunmuştur. Sekiz metalin çevresel risk sıralaması: $Cd > As > Ni > Pb > Cu > Co > Zn > Cr$ şeklinde gerçekleşmiştir. Çalışma, trafik kaynaklı kadmiyum kirliliğinin yerel toprak ekosistemi ve halk sağlığı için öncelikli bir tehdit olduğunu vurgulamaktadır.

Amman'ı Ürdün'ün güney bölgelerine bağlayan ana karayolunun her iki tarafından alınan yüzey toprak, bitki ve hava örneklerinde Cu, Pb, Cd ve Zn seviyelerini belirlemek amacıyla yapılan başka bir çalışmada, hem toprakta hem de bitkilerde yol kenarında arka plan değerlerinin üzerinde ağır metal seviyeleri tespit edilmiştir. Ağır metal konsantrasyonları, yol kenarından uzaklaştıkça üssel olarak azalmış ve yaklaşık 60 m uzaklıkta arka plan seviyesine

düşmüştür. Sonuçlar, yol kenarı ortamındaki metallerin ana kaynağının trafik olduğunu ve artan trafik yoğunluğu ile metal birikiminin yükseldiğini göstermektedir (Jaradat ve Momani, 1999).

Özkan (2017) tarafından yapılan bir çalışmada, Hatay'daki Antakya–Cilvegözü uluslararası karayolu çevresindeki tarım arazileri ve yetişen bitkilerde ağır metal kirliliğini incelemek amacıyla, yol kenarından 25, 100, 500 m ve 1 km mesafedeki toprak ve bitki örnekleri analiz edilmiştir. Toprak ve bitkilerdeki ağır metal birikiminin, ulusal ve uluslararası sınır değerlerin altında ve kabul edilebilir seviyede olduğu belirlenmiştir.

Koca vd. (2019), Lapseki'deki kiraz bahçesi topraklarında Cd, Cu, Pb ve Zn düzeylerinin yerleşim yerine olan uzaklığa göre değişimini incelemişler ve 0, 250 ve 750 m mesafelerden alınan toprak örneklerindeki Cd ve Zn'nun tarımsal açıdan normal sınırlar içinde olduğunu tespit etmişlerdir. Cu ise tüm mesafe ve derinliklerde normalin üzerinde bulunmuş ve toprakta belirgin bir birikim göstermiştir. Bu durumun yoğun bakır içerikli tarım kimyasallarından kaynaklandığı düşünülmektedir. Kurşun ise derinliğe göre değişmezken, yerleşim yerine yakın örneklerde anlamlı derecede daha yüksek çıkmış olup, bu artış trafik, sanayi, ısınma, ilaçlama, pestisit ve gübreleme etmenlerine bağlanmıştır.

Kiknadze vd. (2019) tarafından yapılan çalışmada, Sarpi–Poti–Senaki karayolu çevresinde trafik kaynaklı ağır metallerin kırmızı topraklar ve tarım ürünlerinin (mandalina, patates, yeşil soğan, domates, mısır vb.) ekolojik ve fizikokimyasal özelliklerine etkisi incelenmiştir. Ayrıca Doğu Gürcistan'daki çernozem, çayır kahverengisi ve karbonat kahverengisi toprak tiplerinde ağır metal dağılımı ve toprak profilindeki ayrışma süreçleri de değerlendirilmiştir. Sonuçlar, Pb ve Cd birikiminin karayoluna 50 m mesafeye kadar arttığını, 20 m sonrasında ise azaldığını göstermiştir. Ağır metaller humusça zengin topraklarda daha yüksek bulunmuş, hareketli metal formları ekilebilir üst tabakada yoğunlaşmıştır. Bulgular, karayollarına uzak alanlarda tarım yapılmasını önermektedir.

Güneş ve Çilali (2018), Amasya–Tokat karayolunun 15–21. km'leri arasında doğal olarak yetişen kuşburnu bitkilerinde ağır metal birikimini incelemek amacıyla, karayoluna 0–1000 m mesafelerden alınan yaprak, meyve ve toprak örneklerinde Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb ve Zn düzeyleri analiz edilmiştir. Sonuçlar, mesafeye bağlı anlamlı bir ağır metal değişimi olmadığını ve kuşburnunun trafik kaynaklı kirlenmeden etkilenmediğini göstermiştir. Yapraklarda metal birikimi meyveye göre daha yüksek bulunmuştur. Toprakta Cr düzeyinin yaprak ve meyveden fazla olması, Cr geçişinin toprak kaynaklı olabileceğini; yapraktaki Cu, Fe, Mn ve Zn birikiminin yüksek olması ise bu metallerin çevresel (hava) kaynaklı

olabileceğini düşündürmüştür. Genel olarak, kuşburnu yaprak ve meyvesindeki ağır metal düzeylerinin Fe hariç insan sağlığı açısından güvenli sınırların altında olduğu belirlenmiştir.

Başka bir çalışmada ise, Kwara Eyaleti, Nijerya'daki ana yollar boyunca alınan bitki ve toprak örneklerindeki Cd, Zn, Cu, Cr, Pb ve Ni seviyeleri analiz edilmiştir. Yol kenarındaki bitkilerde; Pb=24–142, Cu=28.55–115.2, Zn=13–120.45, Cd=0–0.4, Cr=0–53.65 ve Ni=1.65–11.85 mg kg⁻¹; toprakta ise Pb=24–157.67, Cu=7.7–80.13 Zn=30.8–219.23, Cd=0–0.37, Cr=10.57–77.1 ve Ni=1.83–14.87 mg kg⁻¹ arasında bulunmuştur. Sonuçlar, yol kenarındaki toprak ve bitkilerin ağır metal kirliliğine açık olduğunu göstermektedir (Ogundele vd. 2015).

Islam vd. (2024) tarafından yapılan çalışmada, Bangladeş'te Dhaka–Chattogram otoyolu boyunca artan trafik nedeniyle 0, 300 ve 500 m mesafelerdeki tarım topraklarında ağır metal seviyeleri incelenmiş ve ekolojik ile sağlık riskleri değerlendirilmiştir. Cd tüm mesafelerde yüksek kirlilik, Cr ise %67 alanda orta kirlilik göstermiştir. Kirlilik Yük İndeksi ne göre Cd, Cr ve Pb başlıca kirleticiler olup, Temel bileşen analizi sonuçları bu metallerin antropojenik kaynaklı olduğunu ortaya koymaktadır. Potansiyel Ekolojik Risk Değerlendirmesi analizine göre Pb, Cd, Cr ve Ni orta düzeyde ekolojik tehdit oluşturmakta, Hedef Tehlike Katsayısı (THQ) değerleri ise özellikle Pb ve Cr için 1'in üzerinde olup insan sağlığı açısından önemli risk taşımaktadır (THQ: yetişkin kadın > yetişkin erkek > çocuk).

Varanasi (Hindistan) kentinde yaygın olarak tüketilen ticari pirinç tanelerinde ağır metal kontaminasyonu ve bunun insan sağlığına olası etkilerinin incelendiği çalışmada, Pb, As ve Ni seviyelerinin belirlenen tespit sınır değerlerinin altında olmasıyla birlikte Cd, Cr, Cu ve Zn konsantrasyonlarının sırasıyla 0.25–1.3; 0.25–4.1; 1.8–10.5 ve 19.5–36.8 µg g⁻¹ aralığında olduğu tespit edilmiştir. Sağlık riski değerlendirmesi kapsamında, Cd, Cr ve Cu için yüksek maruziyet senaryolarında bazı pirinç çeşitlerinde THQ değerlerinin 1'in üzerine çıktığı gözlemlenmiştir (Singh vd. 2025).

Bir başka çalışmada, Irak'ta yetiştirilen buğdaylarda farklı ağır metallerin (Cd, Pb, Hg, Cr ve Ni) düzeyleri belirlenmiş ve bu metallerin tüketim yoluyla insan sağlığı üzerindeki potansiyel etkileri değerlendirilmiştir (Tawfeeq ve Hakeem, 2025). Cd (0.012–0.026 mg kg⁻¹), Pb (0.034–0.058 mg kg⁻¹) ve Ni (0.21–0.45 mg kg⁻¹) gibi toksik elementlerde yüksek seviyelerin bazı örneklerde izin verilen limitleri aştığı tespit edilmiştir. Her bir metalin toksik potansiyelini değerlendirmek için hesaplanan hedef tehlike katsayısı (THQ) değerleri Cd için 0.07; Pb için 0.11; Cu için 0.09, Zn için 0.05 ve Ni için 0.08 olarak bulunmuştur. Tüm metallerin toplam etkisi olan toplam tehlike indeksi (HI) ise 0.40 olarak hesaplanmıştır. HI değerinin 1'in altında olması, buğday tüketimi yoluyla toplam metal maruziyetinin hem

yetişkinler hem de çocuklar için belirgin toksik etkiler oluşturma olasılığının düşük olduğunu göstermektedir.

Peru'nun Arequipa bölgesinde yetiştirilen tahıllar ve tahıl bazlı işlenmiş ürünlerde ağır metal kontaminasyonunun ve bu metallerin insan sağlığı üzerindeki potansiyel risklerinin değerlendirildiği bir çalışmada, tahıl ürünlerinde As için 0.17 ve Cd için 0.11 mg kg⁻¹ gibi değerlerin Codex Alimentarius'un genel standart sınırlarının üzerinde olduğu tespit edilmiştir. Özellikle pirinç ve pirinç ürünlerinde HI değerleri 1 ile 10 arasında bulunmuş ve bu durum kanserojen olmayan olumsuz sağlık etkilerine işaret etmiştir (Román-Ochoa vd. 2021).

Başka bir çalışmada, buğday, arpa, pirinç ve mercimek gibi tahıllar ve tarım ürünlerinde Cd, Pb, Zn ve Cu başta olmak üzere ağır metal konsantrasyonları ve her bir metal için THQ ve HI değerleri incelenmiştir. Ağır metal limitlerinin FAO/WHO sınır değerlerinin altında olduğu ve söz konusu tahılların mevcut tüketim koşullarında hem çocuklar hem de yetişkinler için belirgin toksik etkiler oluşturma olasılığının düşük olduğu tespit edilmiştir (Pirsaheb vd. 2016).

Tarımsal topraklarda yetiştirilen çeşitli tahıllardaki Cd, Pb, As, Hg, Ni ve Zn elementlerin insan sağlığı üzerindeki potansiyel risklerinin değerlendirildiği bir çalışmada, Cd, Pb ve As gibi elementlerin ulusal ve uluslararası izin verilen maksimum konsantrasyonların altında kaldığı ve THQ ile HI değerlerinin ise yetişkinler ve çocuklar için genellikle 1'in altında olduğu tespit edilmiştir (Gruszecka-Kosowska, 2020).

Bir diğer çalışmada, pirinç, buğday, darı, mısır, çavdar gibi 13 farklı tahıl türünde Cd, Pb, Hg ve As seviyeleri ölçülmüş ve hem THQ hem de HI değerlerinin çocuklar ve yetişkinler için 1'in altında kaldığı ve dolayısıyla tahılların mevcut tüketim koşullarında genel olarak güvenli ve belirgin toksik etkilerin olasılığının düşük olduğu tespit edilmiştir (Ge vd, 2020).

3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1. Materyal

3.1.1. Örnekleme Alanı

Uluslararası ulaşım ağının önemli bir parçası olan E80 Sivas–Erzincan karayolu, Erzincan ili sınırları içerisinde konumlanmaktadır. Bu çalışma kapsamında incelenen alan, Erzincan Merkez ilçesine bağlı Oğlaktepe mevkiinde yer almakta olup, Erzincan Organize Sanayi Bölgesi'ne yaklaşık 400 metre mesafededir. Araştırma sahasının coğrafi koordinatları 39°44'27" Kuzey ve 39°23'50" Doğu olarak belirlenmiştir (Şekil 3.1).



Şekil 3.1. Erzincan-Erzurum karayolu güzergahındaki buğday örneklerinin alındığı alan (39°44'27" Kuzey ve 39°23'50" Doğu).

Çalışmada, ekmeklik buğday (*Triticum aestivum*) olan Krasunia Odes'ka çeşidi kullanılmıştır. Buğday örnekleri, bölgenin coğrafi ve çevresel özellikleri dikkate alınarak üreticilerle yapılan görüşmeler sonucunda hasat döneminde toplanmıştır. Numune alımı, karayolu kenarından başlanarak her 10 metrede bir olacak şekilde, karayolundan uzaklaşarak gerçekleştirilmiştir. Numune noktalarının seçiminde, mesafenin ağır metal birikimi üzerindeki etkisini değerlendirmek amaçlanmıştır. Bu yöntemle toplam 10 adet buğday numunesi toplanmış ve buğday örnekleri analiz edilinceye kadar oda sıcaklığında kuru bir yerde plastik torbalar içerisinde muhafaza edilmiştir.

3.1.2. Örneklerin hazırlanması

Toplanan buğday örnekleri laboratuvara getirilerek sap kısımlarından ayrılmıştır. Ayrılan taneler 2 mm gözenek çapına sahip paslanmaz çelik elekten geçirilmiştir. Elekten geçirilen örnekler, etüvde 60°C sıcaklıkta 24 saat boyunca kurutularak nemi uzaklaştırılmıştır. Kurutulan buğday örnekleri plastik torbalara konarak analiz yapılincaya kadar muhafaza edilmiştir.

Analizlerde kullanılmak üzere her bir element için uygun konsantrasyon aralıklarında standart çözeltiler hazırlanmıştır. Stok çözeltilerden (1000 mg L⁻¹, analitik saflıkta) uygun hacimlerde alınarak seyreltme yoluyla hazırlanmıştır. Doğruluğu sağlamak amacıyla her element için üç farklı konsantrasyon seviyesi belirlenmiştir.

3.2. Metot

3.2.1. Ağır Metal Analizi

Buğday numunelerindeki ağır metal düzeyleri Eşleşmiş Plazma Kütle Spektrometresi (ICP-MS) ile tespit edilmiştir. Çalışmada As, Cr, Mn, Fe, Cu, Zn, Co, Ni, Al ve Ag elementlerinin analizi yapılmıştır.

Buğday örnekleri, ICP-MS analizinden önce Segura vd. (2020)'nın kullandığı yöntem modifiye edilerek mikrodalga bozunma prosedürüne tabi tutulmuştur. Bu amaçla, kurutulmuş numunelerin her birinden 0.5 g tartılarak beherlere aktarılmıştır. Her bir beher içerisine 7 mL nitrik asit (HNO₃, %65, analitik saflıkta) ve 1 mL hidrojen peroksit (H₂O₂, %30, analitik saflıkta) eklenmiştir. Asit karışımı ilave edilen numuneler mikrodalga bozundurma kaplarına alınmıştır. Mikrodalga fırın kullanılarak, numuneler 200°C sıcaklıkta ve 45 bar basınçta yakılmıştır. Yakma işlemi tamamlandıktan sonra bozundurma kapları oda sıcaklığına kadar soğutulmuş, ardından içerikleri 100 mL'ye saf su ile tamamlanarak seyreltilmiştir. Elde edilen çözeltiler, katı parçacıklardan arındırmak amacıyla 0.45 µ gözenek açıklığına sahip teflon filtrelerden süzölmüştür. Numune çözeltileri, ICP-MS analizine hazırlık için 10 mL'lik polipropilen falcon tüplerine aktarılmıştır. Örnekler iki adımlı bir sıcaklık programı kullanılarak mikrodalga ile bozundurulmuştur (Tablo 3.1).

Tablo 3.1. Sıcaklık kontrollü mikrodalga bozundurma programı

Basamaklar	Sıcaklık	Isıtma Hızı	Zaman
1.basamak	20 – 120°C	20°C dk. ⁻¹	-
2.basamak	120 – 180°C	20°C dk. ⁻¹	10 dk.

Mikrodalga işleminden sonra, numuneler 100 mL'lik bir hacimsel balona aktarılmış ve hedef hacme kadar ultra saf su ile tamamlanmıştır. ICP-MS ölçümleri için plazma gücü 1550 W olarak ayarlanmış ve diğer ölçüm ayarları otomatik ayar raporundan elde edilerek Tablo 3.2'de listelenmiştir. Helyum modu kullanılarak olası izobarik girişimler önlenmiştir. Dahili standart olarak 500 µg L⁻¹ Sc konsantrasyonu kullanılmıştır. Ağır metal konsantrasyonları numune ağırlığına göre hesaplanmış ve µg kg⁻¹ kuru ağırlık olarak ifade edilmiştir.

Tablo 3.2. ICP MS ölçüm parametreleri

Parametre	Değer
Argon akış hızı (L dk-1)	15
Helyum akış hızı (mL dk-1)	4
Taşıyıcı gaz akış hızı (mL dk-1)	1.1
Örnekleme derinliği (mm)	10
Dahili standart	Sc

3.2.2. Sağlık Risk Değerlendirmesi

İnsanlar tarafından yaygın biçimde tüketilen buğdayın olası tüketim kaynaklı sağlık risklerini değerlendirmek amacıyla Tahmini Günlük Alım Miktarı (EDI) , Hedef Tehlike Oranı (THQ), Tehlike İndeksi (HI) ve Kanserojenik Risk (CR) değerleri hesaplanmıştır. Hesaplamalarda yetişkin bireyler için ortalama vücut ağırlığı 70 kg ve yaşam süresi 70 yıl olarak alınmış olup bu veriler US EPA (2019) esas alınarak belirlenmiştir. Çalışmada ele alınan tüm metallerin hesaplamalarında ICP-MS analiz sonuçları kullanılmıştır.

3.2.2.1. Kanserojen olmayan risk değerlendirme

EDI, gıdalardan insan vücuduna bulaşan kontaminant miktarını tahmin etmek amacıyla yaygın şekilde kullanılan bir göstergedir (µg gün⁻¹ kg vücut ağırlığı). Bu indeks; tüketilen gıda miktarı, tüketim süresi ve ilgili metalin konsantrasyon seviyesi gibi faktörlere bağlı olarak hesaplanmaktadır (Solgi vd. 2019). EDI, Birleşik Devletler Çevre Koruma Ajansı (US EPA) tarafından aşağıda verilen eşitlik kullanılarak hesaplanmıştır (US EPA, 2000):

$$EDI = \frac{CxIR}{BW} \quad (1)$$

C : Metal konsantrasyonu (µg kg⁻¹)

IR : g gün⁻¹ cinsinden günlük buğday tüketim miktarı (438 g gün⁻¹ ; TEPGE 2024)

BW : Vücut Ağırlığı, yetişkinler için ortalama (70 kg) (US EPA, 2019).

THQ, uzun süreli maruz kalma, alınan madde miktarı ve bireyin vücut ağırlığı gibi parametrelere bağlı boyutsuz bir risk göstergesidir. Bu gösterge, kimyasal kirleticiler için kronik maruziyetle ilişkili olası sağlık risklerinin değerlendirilmesi amacıyla US EPA tarafından geliştirilmiştir (US EPA, 2019). THQ, maruz kalma süresi ve sıklığı ile bireyin aldığı madde miktarının, vücut ağırlığına ve ilgili metalin oral referans dozuna oranlanmasıyla hesaplanmaktadır (Yalçın ve Çakmak, 2023). THQ, US EPA (2014, 2019) tarafından aşağıda verilen eşitlik kullanılarak hesaplanmıştır:

$$THQ = (EF \times ED \times IR \times C) / (BW \times RfD \times ATn) \times 10^{-3} \quad (2)$$

EF : maruziyet sıklığı (365 gün yıl⁻¹);

ED : ömür boyu (70 yıl) maruz kalma süresi

ATn : ortalama ömür (70 yıl x 365 gün)

Oral referans doz (RfDo), hassas gruplar da dahil olmak üzere insan popülasyonunun belirli bir süre boyunca herhangi bir olumsuz sağlık etkisi görülmeden tolere edebileceği günlük oral maruziyet miktarını ifade eder. Bu değer, değerlendirilen eser elemente özgü olup, her elementin toksikolojik özelliklerine göre değişmektedir (US EPA, 2011). RfDo değerleri; As=3.10⁻⁴, Fe=7.10⁻¹, Cu=4.10⁻², Zn=3.10⁻¹, Mn=1,4.10⁻¹, Cr=3.10⁻³, Co=3.10⁻⁴, Ni=2.10⁻², Al=1 ve Ag=3.10⁻⁴ olarak alınmıştır (US EPA, 2019, 2006, 2012, 1989).

HI, her bir gıda türü için değerlendirilen elementlerin bireysel THQ toplamı olarak hesaplanmaktadır. Bu yaklaşım, bireylerin aynı anda birden fazla toksik elemente maruz kalabileceği varsayımına dayanarak potansiyel birikimli sağlık risklerini değerlendirmeye olanak sağlamaktadır (US EPA, 1989; Antoine vd. 2017). US EPA (2019) HI değerinin THQ değerlerinin toplamına eşit olduğunu belirtmiştir. Aşağıda bu çalışmada HI değerini hesaplamak için kullanılan eşitlik verilmiştir:

$$(HI = THQ_{as} + THQ_{fe} + THQ_{cu} + THQ_{zn} + THQ_{mn} + THQ_{cr} + THQ_{co} + THQ_{ni} + THQ_{al} + THQ_{ag}) \quad (3)$$

3.2.2.2. Kanserojen risk değerlendirmesi

Karsinojenik risk (CR), bireylerin yaşamları boyunca potansiyel bir kanserojen maddeye maruz kalma olasılığını ifade eden bir göstergedir. Bu değer, bir kişinin belirli bir kirleticiye ömür boyu maruz kalması sonucunda kanser geliştirme olasılığını tahmin etmek için kullanılmaktadır. CR değerleri US EPA (2019) tarafından belirlenen eşitlik kullanılarak hesaplanmıştır:

$$CR = EDI \times CsF \times 10^{-3} \quad (4)$$

CsF : Kanser Eğim Faktörü

Yaşam boyu kanser riski hesaplamalarında, EDI ve THQ formüllerine ek olarak, CsF kullanılarak maruziyetin potansiyel kanser riski daha doğru bir şekilde tahmin edilmektedir. CR hesaplamalarında kullanılan CsF değerleri Cr, Ni ve As sırasıyla 0.5 0.91 ve 1.5 mg kg⁻¹ gün⁻¹'dür (ABD Çevre Koruma Ajansı (USEPA, 2012; Kusin vd. 2018; Zeng vd. 2015).

3.2.3. İstatistiksel Analiz

Tüm örneklerden iki tekerrür halinde elde edilen veriler %95 güven aralığında SPSS yazılımı (sürüm 20.0, Chicago, ABD) kullanılarak analiz edilmiştir. İstatistiksel analizde karayolundan olan mesafenin bağımsız değişken, buğday örneklerindeki ağır metallerin bağımlı değişken olduğu çoklu doğrusal regresyon modelleri kullanılarak test edilmiştir. Ayrıca, örnekler arası farkın önemli olduğu durumlarda ortalamalar arası farkı belirlemek için Duncan Çoklu Karşılaştırma testi kullanılmıştır. İstatistiksel olarak örnekler arası farklılıklar p<0.05 düzeyinde belirlenmiştir.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

Erzincan–Erzurum karayolu ve organize sanayi bölgesi çevresinde yer alan tarım alanlarından farklı mesafelerde (10–100 m) alınan buğday örneklerinde ağır metal birikiminin mesafeye bağlı değişimi incelenmiştir. Elde edilen bulgular, karayolu ve sanayi kaynaklı kirleticilerin buğday tanelerinde ölçülen metal konsantrasyonları üzerinde belirgin bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir (Tablo 4.1).

Tablo 4.1. Buğdaylardaki ağır metal seviyelerinin mesafeye bağlı olarak değişimi

Mesafe (m)	Ağır metal seviyeleri ($\mu\text{g kg}^{-1}$)*									
	As	Al	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ag
10	0,0289 ^a	20,19 ^a	0,250 ^a	53,19 ^a	56,47 ^a	0,120 ^a	3,10 ^a	6,30 ^a	39,01 ^a	0,00317 ^a
20	0,0249 ^b	16,91 ^b	0,224 ^b	50,18 ^{a,b}	52,63 ^b	0,112 ^b	2,94 ^a	5,75 ^{b,c}	38,94 ^a	0,00300 ^b
30	0,0227 ^c	15,64 ^c	0,210 ^c	47,72 ^{b,c}	51,00 ^b	0,098 ^c	2,46 ^b	5,52 ^{b,c}	37,84 ^a	0,00235 ^c
40	0,0198 ^d	14,34 ^d	0,166 ^d	45,62 ^{c,d}	45,57 ^c	0,096 ^c	2,00 ^c	5,15 ^{c,d}	37,83 ^a	0,00227 ^c
50	0,0175 ^e	11,25 ^e	0,145 ^e	44,82 ^{c,d}	45,05 ^c	0,093 ^c	1,97 ^{c,d}	4,85 ^{d,e}	34,21 ^b	0,00148 ^d
60	0,0168 ^{e,f}	8,74 ^f	0,132 ^f	43,48 ^{d,e}	40,76 ^d	0,085 ^d	1,88 ^{c,d,e}	4,81 ^{d,e}	33,40 ^b	0,00145 ^d
70	0,0156 ^f	8,62 ^f	0,126 ^g	40,54 ^e	37,75 ^{e,d}	0,072 ^e	1,80 ^{d,e}	4,59 ^{e,f}	30,79 ^c	0,00142 ^d
80	0,0129 ^g	7,31 ^g	0,110 ^h	33,07 ^f	36,17 ^{f,e}	0,062 ^f	1,72 ^e	4,39 ^f	29,03 ^{c,d}	0,00117 ^e
90	0,0121 ^g	5,11 ^h	0,096 ⁱ	21,34 ^g	34,12 ^f	0,054 ^g	1,48 ^f	3,77 ^g	28,06 ^d	0,00112 ^e
100	0,0117 ^g	3,66 ⁱ	0,078 ^j	18,16 ^g	32,79 ^f	0,046 ^h	1,40 ^f	2,73 ^h	26,98 ^d	0,00028 ^f

*Aynı harfle gösterilen ortalamalar istatistiksel olarak birbirinden farklıdır ($P<0.01$).

Tablo 4.1’den görüldüğü üzere, tüm metaller için genel eğilimin karayoluna yakın mesafelerde daha yüksek konsantrasyonların elde edildiği ve mesafe de arttıkça istikrarlı bir azalmanın olduğu anlaşılmaktadır. Özellikle As, Al, Cr, Co, Ni, Cu, Zn ve Ag konsantrasyonlarında, 10–30 m aralığında ölçülen değerler ile 80–100 m aralığındaki değerler arasında istatistiksel olarak anlamlı farklar ($P<0.01$) tespit edilmiştir. Bu durum, ağır metal birikiminin büyük ölçüde trafik ve sanayi kaynaklı atmosferik taşınım ve çökeltme ile ilişkili olduğunu göstermektedir. Benzer şekilde, Kul vd. (2021), Çelebi ve Gök (2016) tarafından yapılan çalışmalarda da yol kenarına yakın tarım alanlarında ağır metal birikiminin daha yüksek olduğu, mesafe arttıkça metal konsantrasyonlarının anlamlı biçimde azaldığı rapor edilmiştir.

Arsenik konsantrasyonu 10 m mesafede $0.0289 \mu\text{g kg}^{-1}$ iken, 100 m mesafede $0.0117 \mu\text{g kg}^{-1}$ seviyesine düşmüştür. Bu azalma eğilimi, arsenik kaynaklarının büyük ölçüde egzoz emisyonları, endüstriyel tozlar ve pestisit kökenli atmosferik girdiler ile ilişkili olduğunu

düşündürmektedir. Hughes vd. (1988) ve Smith vd. (2000), arsenik birikiminin özellikle endüstriyel ve trafik yoğunluğu yüksek bölgelerde yetiştirilen ürünlerde belirgin biçimde arttığını bildirmiştir. Krom ve nikel için de benzer bir eğilim gerçekleşmiştir. Krom konsantrasyonu $0.250 \mu\text{g kg}^{-1}$ 'den $0.078 \mu\text{g kg}^{-1}$ 'e, nikel konsantrasyonu ise $3.10 \mu\text{g kg}^{-1}$ 'den $1.40 \mu\text{g kg}^{-1}$ 'e düşmüştür. Bu metallerin özellikle lastik aşınması, yakıt yanması, metal alaşımlar ve sanayi faaliyetleri kaynaklı olduğu bildirilmektedir (Seven vd. 2018; Bartzas vd. 2021). Buğday gibi tahıl bitkilerinde Krom ve Nikelin kök yoluyla alımının sınırlı olmasına rağmen, yaprak yüzeyine çöken partiküllerin tane üzerine taşınabildiği ifade edilmektedir (Shahid vd. 2017).

Kobalt ve gümüş konsantrasyonlarının da mesafeye birlikte anlamlı şekilde azalması, bu elementlerin antropojenik kökenli olduğunu desteklemektedir. Özellikle gümüşün yol kenarında daha yüksek bulunmasının, sanayi ve elektronik atık kaynaklı emisyonlardan kaynaklandığı düşünülmektedir (Kobielska vd. 2018). Yol kenarı topraklarında kobalt birikiminin, çoğunlukla trafik yoğunluğuyla ilişkili olduğu çeşitli araştırmalarla ortaya konulmuştur (Özkul, 2008; Adiloğlu ve Sağlam, 2015). Karayolu çevresindeki topraklarda yapılan incelemelerde, yola olan mesafenin artmasıyla birlikte kobalt konsantrasyonlarının belirgin şekilde azaldığı rapor edilmiştir. Yan ve ark. (2013) tarafından yürütülen çalışmada, ağır tonajlı taşıtlar olmak üzere araç trafiğinin topraklardaki kobalt düzeyleri üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu gösterilmiştir. Bu bulgular, karayollarında yoğun taşımacılığın kobalt kirliliğinin temel kaynaklarından biri olduğunu ortaya koymaktadır.

Manganez, demir, bakır ve çinko gibi esansiyel metallerin de mesafeye bağlı olarak azalma göstermesi dikkat çekicidir. Bu metaller bitkiler için gerekli olmakla birlikte, yüksek konsantrasyonlarda toksik etki gösterebilmektedir (Nagajyoti vd. 2010). Manganez ve demir için azalma eğilimi daha yavaş olmakla birlikte, özellikle bakır ve çinko konsantrasyonlarının yol kenarında anlamlı derecede yüksek olması, bu metallerin trafik kaynaklı emisyonlar (fren balataları, lastik aşınması, motor parçaları) ile ilişkili olduğunu göstermektedir. Brizio vd. (2016) ve Pirsahab vd. (2016), tahıl ürünlerinde çinko ve bakır düzeylerinin çevresel kirlilikten önemli ölçüde etkilendiğini ve yol kenarına yakın alanlarda daha yüksek konsantrasyonların rapor edildiğini belirtmiştir.

Tablo 4.1'de verilen değerler genel olarak incelendiğinde, buğday tanelerindeki ağır metal birikiminin karayoluna olan mesafeye son derece duyarlı olduğunu göstermektedir. Özellikle arsenik, krom, nikel, bakır ve çinko gibi metaller, trafik ve sanayi kaynaklı kirliliğin biyogöstergeleri olarak öne çıkmaktadır. Bu durum, karayolu ve sanayi bölgelerine yakın

tarım alanlarında üretilen buğdayın hem gıda güvenliği hem de insan sağlığı açısından düzenli olarak izlenmesi gerektiğini ortaya koymaktadır.

Ağır metal kirliliğinin en yoğun olduğu bölgenin karayolunun ilk 0-20 metresi arasında olduğu düşünülmektedir. 50-100 metreden sonra metal seviyeleri genellikle bölgenin doğal "arka plan" değerlerine düşmektedir. Bu düşüş, kirliliğin doğal değil, belirli bir noktadan yani karayolundan kaynaklandığını göstermektedir. Ürdün'deki otoyol kenarlarında yapılan bir çalışmada, Pb, Zn ve Cu gibi metallerin yol kenarında çok yüksek olduğu, ancak 20-50 metre mesafede hızla azaldığı tespit edilmiştir. Bu durum, metallerin doğrudan trafik hacmiyle (antropojenik girdi) ilişkili olduğunu doğrulamaktadır (Al-Khashman, 2004).

Buğday örneklerindeki ağır metal seviyeleri ve karayoluna olan mesafe arasındaki ilişkinin yönünü ve biçimini belirlemek için korelasyon analizi yapılmıştır (Tablo 2). Tablo 2'den görüldüğü üzere, incelenen tüm ağır metaller için mesafe ile metal konsantrasyonu arasında aynı yönde ve yüksek bir korelasyon ($r = 0.935-0.991$) olduğu anlaşılmaktadır. Korelasyon katsayılarının tamamının %1 önem düzeyinde anlamlı ($P < 0.01$) bulunması, ağır metal birikiminin mesafeye bağlı olarak istatistiksel olarak değiştiğini ortaya koymaktadır. Bu bulgu, özellikle karayolu ve sanayi kaynaklı kirliliğin, tarım alanlarında ağır metal birikimi üzerinde belirleyici bir faktör olduğunu göstermektedir.

Tablo 4.2. Ağır metal seviyeleri ve mesafe arasındaki korelasyon analizi

Ağır Metal	Korelasyon (r)	Anlamlılık *
As	0.977	Anlamlı
Al	0.990	Anlamlı
Cr	0.981	Anlamlı
Mn	0.935	Anlamlı
Fe	0.990	Anlamlı
Co	0.991	Anlamlı
Ni	0.949	Anlamlı
Cu	0.961	Anlamlı
Zn	0.981	Anlamlı
Ag	0.966	Anlamlı

* Korelasyon %1 önem seviyesinde anlamlı ($P < 0.01$)

Çok yüksek korelasyon ($r \geq 0.98$) gösteren ağır metaller (Co, Al, Fe, Cr, Zn) kirlilik kaynağına yani başka bir ifadeyle karayoluna olan mesafeye son derece duyarlı olup, özellikle trafik ve sanayi kaynaklı emisyonların güçlü göstergeleri olarak değerlendirilebilir. Tarım

alanlarında yol ve sanayi yakınlığının etkisini en net yansıtan grubun bu ağır metaller olduğu söylenebilir.

Yüksek korelasyon ($0.95 \leq r < 0.98$) gösteren ağır metallerin (As, Ag, Cu) de mesafeye önemli ölçüde bağlı olduğu, ancak birikimlerinde toprak özellikleri, atmosferik taşınım ve ilaçlama, pestisit gibi ikincil faktörlerin etkisinin daha belirgin olduğu söylenebilir. Orta-yüksek korelasyon ($0.90 \leq r < 0.95$) gösteren ağır metallerin (Ni, Mn) ise hem doğal (jeojenik) hem de antropojenik kaynaklardan etkilenebilen metaller olduğu düşünülmektedir. Karayolundan olan mesafeye duyarlılıkları diğer metallere kıyasla nispeten daha düşük olmakla birlikte, korelasyonun önemli olduğu söylenebilir. Şehir içi yol kenarı topraklarında metallerin dikey ve yatay dağılımının incelendiği bir çalışmada da, yüzeydeki yüksek metal birikiminin yola olan yakınlıkla doğrudan korelasyon gösterdiği ve kısa mesafedeki bu değişimin ilaçlama ve gübrelemeden kaynaklandığı tespit edilmiştir (Li vd. 2001).

Korelasyon analizinden ayrı olarak bağımlı (mesafe) ve bağımsız (ağır metal seviyeleri) değişkenler arasındaki ilişkinin nicel olarak ortaya konulması amacıyla regresyon analizi uygulanmıştır (Tablo 4.3). Regresyon analizi, çevresel kirlilik çalışmalarında kirlletici kaynaklara olan uzaklığın, toprak ve bitkilerdeki metal birikimi üzerindeki etkisini değerlendirmede yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Bu amaçla; ağır metal düzeyleri ile karayoluna uzaklık arasındaki ilişkinin yönünün ve büyüklüğünün nicel olarak belirlenmesinin (R^2) yanında, mesafe etkisinin ağır metaller arasındaki karşılaştırma ölçüsü (β katsayısı) ve 100 metredeki azalma oranı hesaplanmıştır.

Tablo 4.3. Ağır metallerin mesafeye bağlı olarak değişimi ve regresyon analizi

Ağır Metal	R ²	β^*	100 m'de değişim (%)**
As	0.9648	-0.0002	59.52
Al	0.9796	-0.1774	81.87
Cr	0.9541	-0.0019	68.80
Mn	0.8652	-0.3679	65.86
Fe	0.9762	-0.2694	41.93
Co	0.9758	-0.0008	61.67
Ni	0.8726	-0.0181	54.84
Cu	0.8944	-0.0323	56.67
Zn	0.9744	-0.1518	30.84
Ag	0.9085	-0.00003	91.17

*Mesafe katsayısı (β): Mesafenin 1 metre artması durumunda ağır metal seviyesindeki ortalama değişim

** P<0.05

Tablo 4.3'te verilen regresyon analizi sonuçları, buğday tanelerindeki ağır metal düzeyleri ile karayoluna olan mesafe arasında istatistiksel olarak anlamlı ve negatif yönlü bir ilişki bulunduğunu göstermektedir ($P<0,05$). Tablo 3'de görüldüğü gibi, regresyon modellerinde elde edilen yüksek R^2 değerleri (0.8652–0.9796), ağır metal seviyelerindeki değişimin önemli ölçüde karayoluna olan mesafe ile açıklandığını göstermektedir. R^2 değerlerinin yüksek olması, mesafenin ağır metal birikiminde önemli ve baskın bir değişken olduğunu ve karayolunun ağır metaller açısından kirletici kaynak olabileceğini düşündürmektedir. Özellikle Al, Fe, Co, Zn ve As gibi metallerde R^2 'nin 0.95'in üzerinde olması, bu metallerin trafik ve yol ortamı kaynaklı girdilere karşı oldukça duyarlı olduğunu göstermektedir. Literatürde de egzoz emisyonları, lastik ve fren aşınması ile yol kaplama malzemelerinden kaynaklanan metallerin yakın çevrede yoğunlaştığı ve mesafe arttıkça seyredildiği belirtilmektedir (Werkenthin vd. 2014; Vural, 2021). Benzer şekilde, yol kenarındaki tarım alanlarında yapılan birçok çalışmada Pb, Zn, Cu, Ni ve Cr gibi metallerin yol kenarına yakın bölgelerde daha yüksek olduğu ve mesafe arttıkça anlamlı biçimde azaldığı rapor edilmiştir (Wei & Yang, 2010; Kul vd. 2021).

Tablo 4.3'ten görüleceği üzere tüm metaller için mesafe katsayısı (β) negatif olarak gerçekleşmiştir. Bu bulgu da destekler nitelikte olup, karayolundan uzaklaştıkça buğdaydaki ağır metal seviyelerinin düzenli biçimde azaldığını göstermektedir. β katsayısı, mesafenin 1 m artmasıyla ağır metal düzeyindeki ortalama değişimi ifade etmektedir. Negatif β değerleri, her 1 m uzaklaşmada konsantrasyonun azaldığını göstermektedir. Örneğin alüminyum için $\beta = -0.1774$ olması, alüminyumun mesafe artışına oldukça duyarlı bir azalma eğilimi sergilediğini desteklemektedir. Benzer şekilde, Mn ($\beta = -0.3679$), Fe ($\beta = -0.2694$), Zn ($\beta = -0.1518$) gibi daha büyük mutlak β değerleri, mesafe etkisinin o metal üzerinde daha belirgin olabildiğini düşündürmektedir.

Tablo 4.3'te verilen “100 m’de değişim (%)” değerleri, herbir ağır metalin mesafeye karşı duyarlılığını açık biçimde ortaya koymaktadır ($P<0,05$). Buna göre, en belirgin azalma Ag (%91.17) ve Al (%81.87) metallerinde gerçekleşmiş olup, bu ağır metallerin karayolu kaynaklı girdilere çok duyarlı ve yakın mesafede birikimin daha belirgin olduğu söylenebilir. Yüksek azalma Cr (%68.80), Mn (%65.86), Co (%61.67), As (%59.52), Cu (%56.67) ve Ni (%54.84) metallerinde gerçekleşmiş olup, bu metallerin trafik ve çevresel çökeltme etkisini güçlü yansıtan grup olduğu söylenebilir. Daha sınırlı azalma ise Fe (%41.93) ve Zn (%30.84) metallerinde gerçekleşmiştir.

Ag, Al, Cr, Mn ve Co gibi ağır metallerde 100 m mesafede %60'ın üzerinde azalma gözlenmesi, bu metallerin büyük ölçüde antropojenik kaynaklı olduğunu ve karayolu faaliyetlerinden doğrudan etkilendiğini düşündürmektedir. Karayolu çevresinde yapılan birçok çalışmada, bu tür hızlı ve belirgin mesafe gradyanlarının trafik kaynaklı ağır metallerin ayırt edici bir özelliği olduğu vurgulanmıştır (Wei ve Yang, 2010; Werkenthin vd. 2014; Duong ve Lee, 2011). Buna karşılık Zn ve Fe gibi metallerde görece olarak daha düşük azalma oranlarının görülmesi, bu elementlerin kısmen jeojenik kökenli olabileceğini veya bitki tarafından daha güçlü fizyolojik düzenlemelere tabi tutulduğunu göstermektedir. Yapılan diğer çalışmalarda da benzer sonuçlar elde edilmiştir (Nagajyoti vd. 2010; Wuana ve Okieimen, 2011).

Bu sonuçlar genel olarak değerlendirildiğinde, regresyon analizi bulguları karayolu kaynaklı ağır metal taşınımının buğday tanelerine kadar ulaştığını ve mesafenin bu birikimi belirleyen temel faktörlerden biri olduğunu ortaya koymaktadır.

Ağır metallerin karayoluna olan mesafeye bağlı değişimi, 100 metredeki değişim oranlarına göre de değerlendirilmiştir (Tablo 4.4). Bu yaklaşımın, çevresel kirlilik çalışmalarında metallerin kaynak duyarlılığını, taşınım mekanizmalarını ve antropojenik–jeojenik katkı oranlarını ayırt etmek için faydalı olacağı değerlendirilmiştir. Özellikle karayolu kaynaklı kirlenmede, kısa mesafede yüksek oranlı düşüş gösteren metallerin antropojenik girdilerle daha güçlü ilişkili görülmektedir.

Tablo 4.4. Ağır metallerin mesafeye göre değişim oranları

Değişim Şiddeti	Ağır Metaller	Değişim Oranı
Çok Yüksek	Ag, Al	$\geq \%70$
Yüksek	Cr, Mn, Co, As, Cu, Ni	$\%50 - 69$
Orta	Fe, Zn	$\%30 - 49$
Düşük	-	$< \%30$

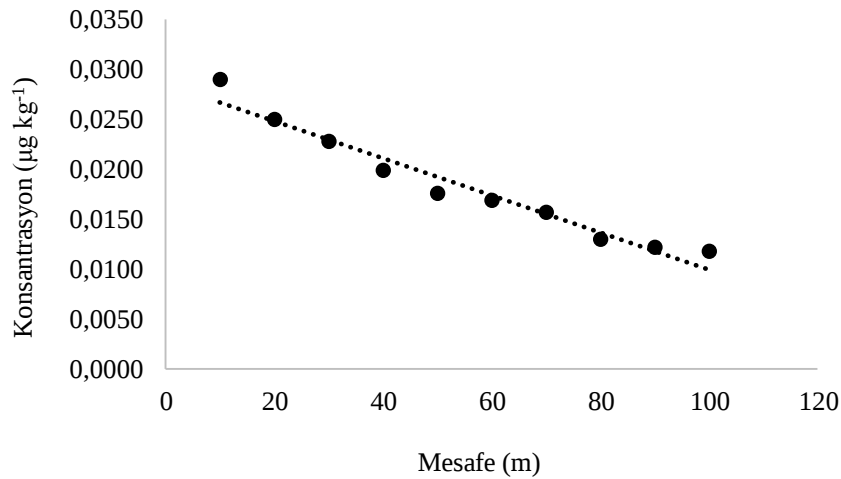
Tablo 4.4'den görüldüğü gibi, Ag ve Al mesafeye bağlı olarak %70'in üzerinde azalma göstermiş olup, söz konusu metallerin karayolu trafiği, araç aşınması, yol kaplama ve bakım malzemeleri gibi doğrudan antropojenik kaynaklara son derece duyarlı olduğuna işaret etmektedir. Cr, Mn, Co, As, Cu ve Ni ise %50–69 aralığında azalma göstermiş olup, bu ağır metallerin hem trafik kaynaklı emisyonlar (egzoz, fren–lastik aşınması) hem de kısmi jeojenik katkılar ile şekillendiğini düşündürmektedir. Cr, Cu ve Ni'in, egzoz ve egzoz dışı trafik

kaynaklı emisyonlarla ilişkili olduğu; özellikle fren balataları, metal alaşımlı araç bileşenleri ve yakıt yanma süreçleriyle bağlantılı olduğu bilinmektedir. (Thorpe ve Harrison, 2008; Pant ve Harrison, 2013; Grigoratos ve Martini, 2015).

Fe ve Zn orta düzey değişim grubunda yer almakta olup, bu metallerin önemli bir bölümünün toprak kökenli olduğunu düşündürmektedir. Fe ve Zn'nin tarım topraklarında doğal olarak yaygın ve kısmen yüksek seviyelerde bulunabildiği; bu elementler için trafik kaynaklı katkının çoğu durumda toplam metal yükü içerisinde sınırlı kaldığı bildirilmektedir (Alloway, 2012; Kabata-Pendias, 2000;). Ayrıca yol kenarı ortamlarında Fe ve Zn'nin, daha belirgin antropojenik metallerle karşılaştırıldığında mesafeye bağlı olarak daha yavaş ve daha zayıf bir azalma eğilimi gösterdiği ifade edilmektedir (Wei ve Yang, 2010; Werkenthin vd. 2014).

Karayolunda farklı mesafelerden toplanan buğday örneklerinin mesafe ile ağır metal seviyeleri arasındaki dağılım davranışı regresyon analizi yapılarak incelenmiştir. Regresyon grafiklerinin tamamı değerlendirildiğinde, ağır metallerin büyük çoğunluğunda karayoluna olan mesafe ile konsantrasyonlar arasında negatif yönlü ve anlamlı ilişki olduğu anlaşılmaktadır. Ayrıca, regresyon dağılımları karayolunun buğday tanelerindeki ağır metal birikimi üzerinde belirleyici bir çevresel faktör olduğunu açıkça ortaya koymaktadır.

As dağılım grafiği, karayoluna yakın mesafelerde daha yüksek konsantrasyonların görüldüğü ve mesafe arttıkça değerlerin düzenli biçimde azaldığı belirgin negatif bir doğrusal ilişki sergilemektedir (Şekil 4.1).

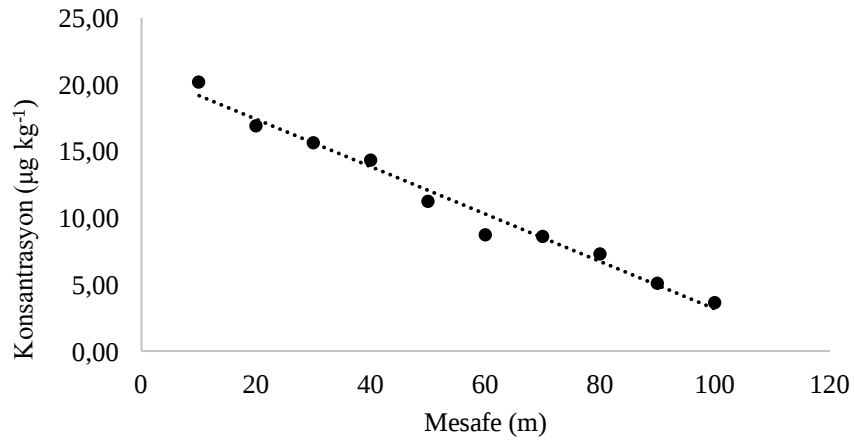


Şekil 4.1. Buğday örneklerinde As seviyesi ile mesafe arasındaki ilişki

Noktaların regresyon doğrusu etrafında nispeten dar bir düzlemde toplanması, mesafenin As birikimi üzerinde güçlü bir belirleyici olduğunu göstermektedir. Bu desen, As'ın karayolu ve

çevresel faaliyetlerden kaynaklanan atmosferik çökeltme yoluyla tarım alanlarına taşındığını düşündürmektedir (Dorjsuren, 2012).

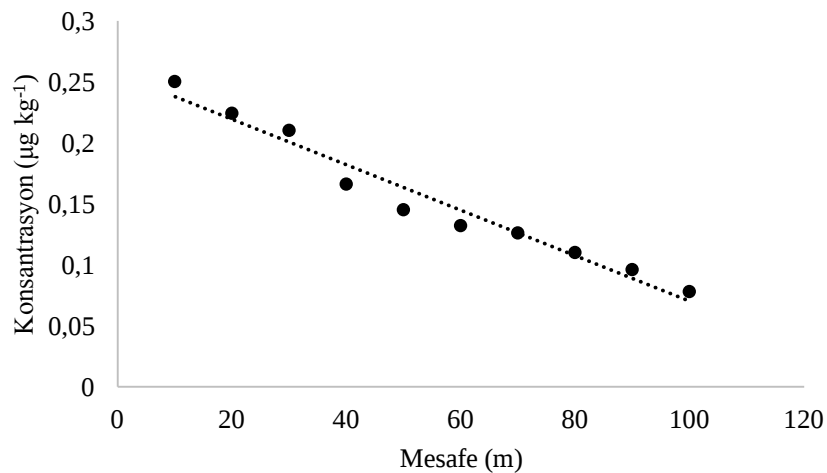
Al dağılım grafiği, en belirgin mesafe gradyanlarından birini göstermektedir (Şekil 4.2).



Şekil 4.2. Buğday örneklerinde Al seviyesi ile mesafe arasındaki ilişki

Yol kenarında yüksek değerler gözlenirken, mesafe arttıkça keskin bir düşüş meydana gelmektedir. Noktaların regresyon çizgisine oldukça yakın seyretmesi, Al için mesafe etkisinin baskın olduğunu ortaya koymaktadır. Bu durum, Al'nin yol yapım malzemeleri, asfalt agregaları (çakıl, bitüm, kırma taş vb.) ve partikül taşınımı ile ilişkili olduğunu ve karayolu kaynaklı girdilere oldukça duyarlı bir metal olduğunu göstermektedir (Özkan, 2017).

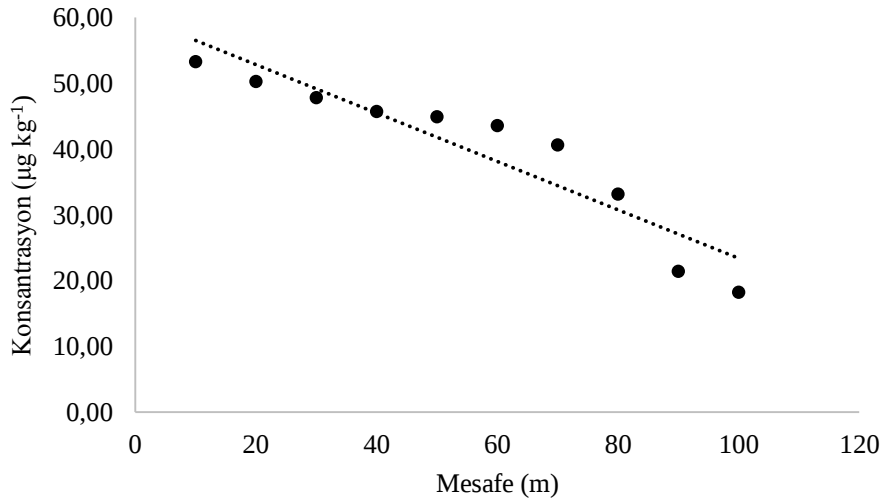
Cr için elde edilen dağılım grafiği, mesafeye bağlı olarak kademeli ancak istikrarlı bir azalma eğilimi ortaya koymaktadır (Şekil 4.3).



Şekil 4.3. Buğday örneklerinde Cr seviyesi ile mesafe arasındaki ilişki

Regresyon doğrusu ile veri noktaları arasındaki uyumun yüksek olması, Cr birikiminin karayolu kaynaklı emisyonlar ve araç aşınması ile ilişkili olduğunu desteklemektedir. Özellikle fren balataları ve metal alaşımlı araç parçalarının Cr için önemli bir kaynak olabileceği düşünülmektedir (Oca, 2021).

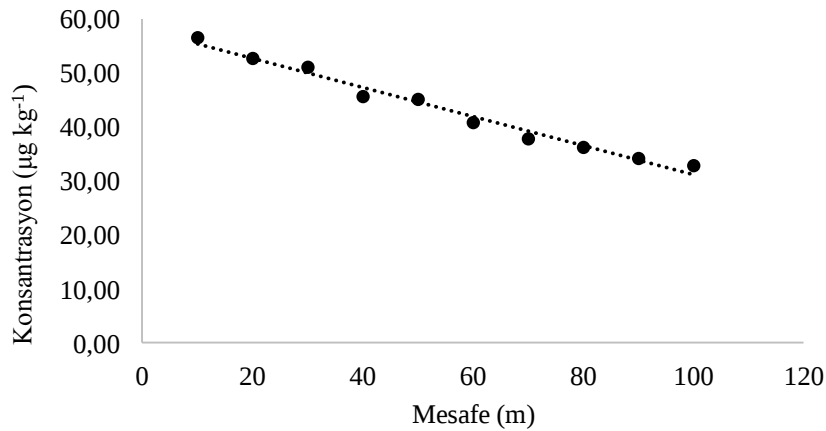
Mn dağılım grafiğinde mesafe arttıkça azalan bir eğilim görülmekle birlikte, saçılımın diğer bazı metallere göre daha geniş olduğu dikkat çekmektedir (Şekil 4.4).



Şekil 4.4. Buğday örneklerinde Mn seviyesi ile mesafe arasındaki ilişki

Bu durum, Mn'nin hem karayolu kaynaklı girdilerden hem de toprak kökenli (jeojenik) arka plan seviyelerinden etkilendiğini düşündürmektedir. Dolayısıyla Mn için gözlenen dağılım, karma kaynaklı bir etkiyi yansıtmaktadır (Küçük ve Karaoğlu, 2021).

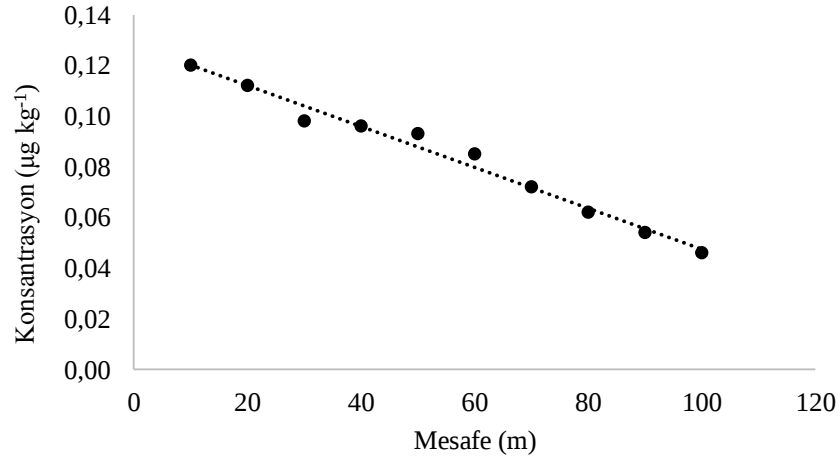
Fe için çizilen dağılım grafiği, mesafeye bağlı azalma eğilimi göstermekle birlikte, düşüş oranının görece daha sınırlı olduğunu ortaya koymaktadır (Şekil 4.5).



Şekil 4.5. Buğday örneklerinde Fe seviyesi ile mesafe arasındaki ilişki

Veri noktalarının geniş bir aralıkta dağılması, Fe'nin büyük ölçüde toprak kökenli olduğunu ve karayolu kaynaklı katkının toplam konsantrasyon üzerinde ikincil bir rol oynadığını göstermektedir (Atilla, 2017). Bu nedenle Fe'de daha zayıf bir mesafe gradyanı oluşmuştur.

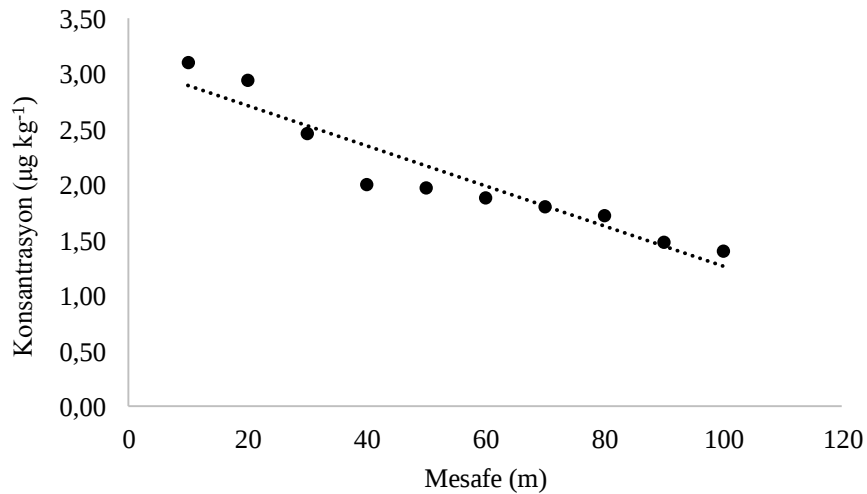
Co dağılım grafiği, mesafe ile birlikte belirgin bir azalma eğilimi göstermektedir (Şekil 4.6).



Şekil 4.6. Buğday örneklerinde Co seviyesi ile mesafe arasındaki ilişki

Regresyon çizgisine yakın dağılan veri noktaları, Co'nun karayolu ve trafik faaliyetlerinden etkilenen bir metal olduğunu düşündürmektedir (Garg vd. 2000). Bununla birlikte, Mn'de olduğu gibi Co için de jeojenik katkının tamamen göz ardı edilemeyeceği anlaşılmaktadır.

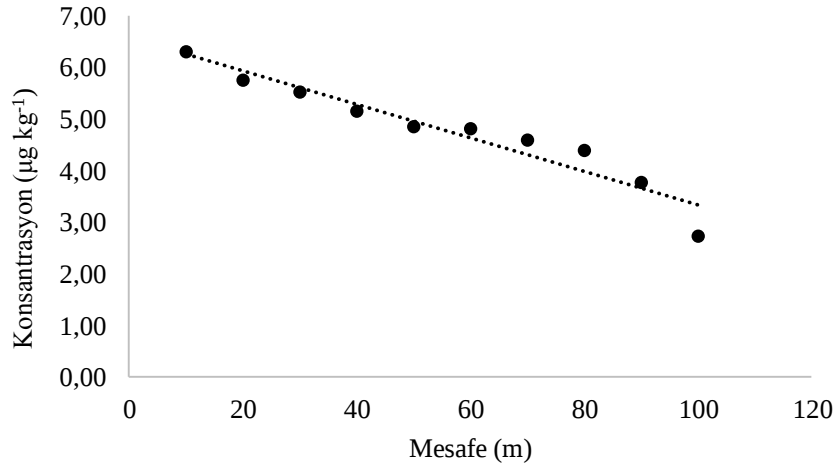
Ni için dağılım grafiği, mesafeye bağlı düzenli bir düşüş sergilemekte ve regresyon doğrusu ile iyi bir uyum göstermektedir (Şekil 4.7).



Şekil 4.7. Buğday örneklerinde Ni seviyesi ile mesafe arasındaki ilişki

Bu durum, Ni'nin özellikle yakıt yanması, yağlayıcılar ve metal alaşımlı araç parçaları ile ilişkili olduğunu desteklemektedir (Iskan vd. 2015). Saçılımın sınırlı olması, mesafenin Ni birikimi üzerinde anlamlı bir kontrol sağladığını göstermektedir.

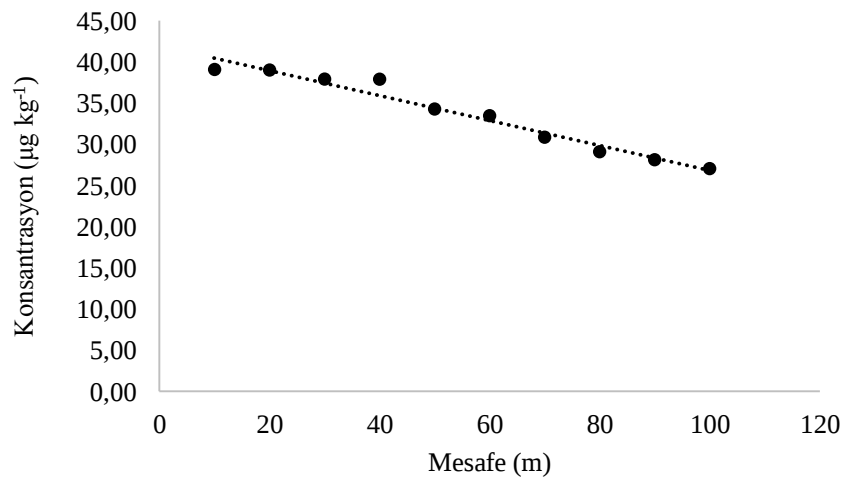
Cu dağılım grafiği, karayoluna yakın noktalarda yüksek değerler ve mesafe arttıkça belirgin bir azalma ile karakterizedir (Şekil 4.8).



Şekil 4.8. Buğday örneklerinde Cu seviyesi ile mesafe arasındaki ilişki

Noktaların regresyon doğrusu etrafında yoğunlaşması, Cu'nun mesafeye oldukça duyarlı bir metal olduğunu ortaya koymaktadır. Bu desen, Cu'nun fren balataları aşınmasının güçlü bir göstergesi olduğu yönündeki literatürle uyumludur (Hulskotte vd. 2007).

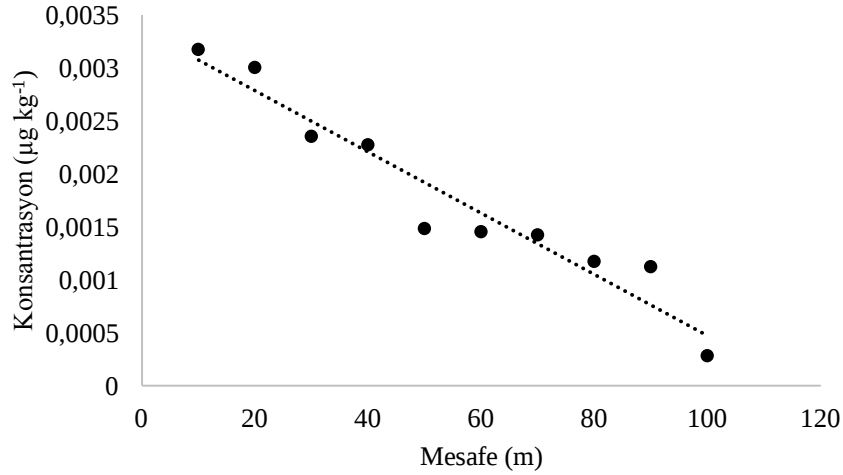
Zn için dağılım grafiği, mesafeye bağlı azalma eğilimi göstermekle birlikte, düşüş oranının Cr, Cu veya Al kadar keskin olmadığı görülmektedir (Şekil 4.9).



Şekil 4.9. Buğday örneklerinde Zn seviyesi ile mesafe arasındaki ilişki

Saçılımın görece geniş olması, Zn'nin hem trafik kaynaklı emisyonlardan hem de toprak kökenli arka plan seviyelerinden etkilendiğini düşündürmektedir (Hmeer ve Şevik, 2025). Bu nedenle Zn, orta düzey mesafe duyarlılığı gösteren metaller arasında yer almaktadır.

Ag dağılım grafiği, en keskin mesafe gradyanlarından birini ortaya koymaktadır (Şekil 4.10).



Şekil 4.10. Buğday örneklerinde Ag seviyesi ile mesafe arasındaki ilişki

Yol kenarında yüksek konsantrasyonlar görülürken, mesafe arttıkça hızlı bir düşüş gerçekleşmektedir. Veri noktalarının regresyon çizgisine yakın olması, Ag'nin büyük ölçüde antropojenik kaynaklı olduğunu ve karayolu ile ilişkili girdilere son derece duyarlı bir metal olduğunu göstermektedir (Çelebi ve Gök, 2016).

Bu çalışmada, karayoluna olan mesafenin buğday örneklerindeki ağır metal seviyeleri üzerine etkisinden ayrı olarak sağlık risk değerlendirmeleri de yapılmıştır. Bu kapsamda, buğday örneklerinde belirlenen ağır metal seviyelerinin insan sağlığı üzerindeki olası etkilerini değerlendirmek amacıyla Tahmini Günlük Alım (Estimated Daily Intake, EDI), Hedef Tehlike Katsayısı (Target Hazard Quotient, THQ) ve Karsinojenik Risk (Cancer Risk, CR) değerleri hesaplanmıştır. EDI, bireylerin gıda tüketimi yoluyla maruz kaldığı metal miktarını ortaya koyarken; THQ değeri, söz konusu maruziyetin kanser dışı sağlık etkileri açısından risk oluşturup oluşturmadığını değerlendirmede kullanılmaktadır. Karsinojenik metaller için hesaplanan CR değerleri ise yaşam boyu kanser riskinin kabul edilebilir sınırlar içerisinde olup olmadığını belirlemeye olanak sağlamaktadır. Bu kapsamda elde edilen bulgular Tablo 4.5'te sunulmuş ve uluslararası sağlık otoriteleri tarafından önerilen sınır değerler doğrultusunda değerlendirilmiştir.

Tablo 4.5. Buğday örneklerinin tahmini günlük alım miktarı (EDI), hedef tehlike katsayısı (THQ) ve karsinojenik risk (CR) değerleri

Ağır Metal	EDI ($\mu\text{g kg}^{-1} \text{ gün}^{-1}$)	THQ	CR
As	0,114	0,382	$1,71 \times 10^{-4}$
Cr	0,961	0,320	$4,80 \times 10^{-4}$
Mn	249,11	1,779	-
Fe	270,50	0,386	-
Co	0,524	1,746	-
Ni	12,97	0,648	$1,18 \times 10^{-2}$
Cu	29,93	0,808	-
Zn	210,28	0,700	-
Al	68,22	0,068	-
Ag	0,010816	0,036	-

Tablo 4.5'te sunulan EDI değerleri incelendiğinde, buğday tüketimi yoluyla en yüksek günlük alımın Fe ($270.50 \mu\text{g kg}^{-1} \text{ gün}^{-1}$), Mn ($249.11 \mu\text{g kg}^{-1} \text{ gün}^{-1}$) ve Zn ($210,28 \mu\text{g kg}^{-1} \text{ gün}^{-1}$) için gerçekleştiği görülmektedir. Bu durum, Fe ve Mn'in bitkiler için esansiyel elementler olması ve tarım topraklarında doğal olarak yüksek seviyelerde bulunabilmesi ile açıklanabilir. Benzer şekilde, Al ve Cu için hesaplanan EDI değerleri de bu metallerin esansiyel elementler olmasına bağlı olarak görece yüksek bulunmuştur. Literatürde, tahıl ve tahıl ürünlerinin özellikle Fe, Mn ve Zn alımında önemli bir diyet kaynağı olduğu yaygın olarak bildirilmektedir (Alloway, 2019; Kabata-Pendias, 2020).

Arsenik (As), krom (Cr), nikel (Ni), kobalt (Co) ve gümüş (Ag) için hesaplanan EDI değerleri ise mutlak olarak daha düşük olmasına rağmen, bu metallerin toksik ve/veya karsinojenik potansiyelleri nedeniyle sağlık açısından dikkatle değerlendirilmesi gerekmektedir. Özellikle As ve Ni'nin, düşük alım düzeylerinde dahi uzun süreli maruziyetlerde sağlık riski oluşturabildiği bilinmektedir (EFSA, 2012; USEPA, 2011).

THQ değerlerinin 1'in altında olması, söz konusu metal için kanser dışı sağlık etkileri açısından önemli bir risk bulunmadığını; 1'in üzerinde olması ise potansiyel bir sağlık riskine işaret etmektedir (USEPA, 2011). Tablo 4.5'e göre Mn (1.779) ve Co (1.746) için hesaplanan THQ değerleri 1'in üzerinde olup, bu metaller açısından uzun süreli buğday tüketiminin potansiyel kanser dışı sağlık riski oluşturabileceğini göstermektedir. Mn ve Co'nun esansiyel elementler olmasına karşın yüksek alımlarda nörotoksik ve sistemik etkilere yol açabildiği literatürde rapor edilmiştir (ATSDR, 2016).

Buna karşılık As, Cr, Fe, Ni, Cu, Zn, Al ve Ag için THQ değerlerinin 1'in altında kaldığı görülmektedir. Bu durum, söz konusu metaller açısından mevcut maruziyet düzeylerinin kanser dışı sağlık etkileri bakımından kabul edilebilir sınırlar içerisinde olduğunu göstermektedir. Benzer sonuçlar, farklı bölgelerde yetiştirilen tahıllar üzerinde yapılan risk değerlendirme çalışmalarında da rapor edilmiştir (Pirsaheb vd. 2016; Skendi vd. 2019).

Karsinojenik metaller için hesaplanan CR değerleri incelendiğinde, As (1.71×10^{-4}), Cr (4.80×10^{-4}) ve Ni (1.18×10^{-2}) için yaşam boyu kanser riskinin, USEPA tarafından kabul edilen 10^{-6} – 10^{-4} aralığının üst sınırına yaklaştığı veya bazı durumlarda bu aralığı aştığı görülmektedir. Pirinç ve pirinç ürünleri ile ilgili sağlık risk analizine yönelik yapılan bir çalışmada da, benzer şekilde As için karsinojenik risk değeri değeri 10^{-4} eşik değerinin altında bulunmuştur (Bielecka vd. 2020). Tahıllarla ilgili yapılan başka bir çalışmada ise, Cr için tespit edilen karsinojenik risk değeri değeri (3.96×10^{-3}) bizim çalışmamızda elde edilen değerden (4.80×10^{-4}) yüksek bulunmuştur (Zhao vd. 2014). Özellikle Ni için hesaplanan CR değerinin kısmen yüksek olması, bu metalin uzun süreli maruziyetlerde karsinojenik risk açısından önemli bir unsur olabileceğini göstermektedir. USEPA ve EFSA raporlarında, As, Cr(VI) ve Ni'nin diyet yoluyla alımında kanser riskinin göz ardı edilmemesi gerektiği vurgulanmaktadır (USEPA, 2011; EFSA, 2012).

Bu bağlamda, her ne kadar buğdaydaki ağır metal konsantrasyonları mevzuat sınırlarının altında kalsa da, kronik maruziyet ve birikim etkisi dikkate alındığında özellikle As, Cr ve Ni için uzun dönemli sağlık risklerinin izlenmesi gerektiği söylenebilir. Tablo 4.5'te sunulan EDI, THQ ve CR değerleri birlikte değerlendirildiğinde, buğday tüketimi yoluyla ağır metallere maruziyetin genel olarak kabul edilebilir düzeylerde olduğu, ancak Mn ve Co için kanser dışı risk, As, Cr ve Ni için ise karsinojenik risk açısından dikkatli olunması gerektiği ortaya çıkmaktadır. Bu sonuçlar, tarım alanlarında çevresel kirlilik kaynaklarının kontrol altına alınmasının ve özellikle karayolu ve sanayi bölgelerine yakın alanlarda yetiştirilen ürünlerin düzenli olarak izlenmesinin önemini vurgulamaktadır.

EDI, THQ ve CR değerlerine paralel olarak bir de HI (Hazard Index) değeri hesaplanmıştır ($HI = \sum THQ = 6.8742$). Bu sonuç, risk değerlendirmesinde birden fazla metalin toplam kanser olmayan etkisini birlikte ifade eden kritik bir göstergedir (Chien vd. 2002). HI, buğday tüketimi üzerinden birden fazla ağır metalin hedef organ/sistemler üzerindeki toplam kanser olmayan riskini değerlendirmek için THQ değerlerinin toplanmasıyla hesaplanmaktadır. HI'nin 1'in üzerinde olması, tek tek bazı metallerin THQ'su 1'in altında kalsa bile, birlikte maruziyetin potansiyel sağlık riski oluşturabileceğine işaret etmektedir. Bu nedenle, HI =

6.8742 değeri, buğday tüketimi yoluyla ağır metallere toplam maruziyetin kabul edilebilir eşik değerinin belirgin biçimde üzerinde olduğunu ve özellikle hassas gruplar (çocuklar, hamileler, kronik hastalığı olanlar) için dikkat gerektirdiğini göstermektedir. Bu yaklaşım ve eşik yorumları, çevresel sağlık risk değerlendirmesinde yaygın olarak kullanılan USEPA çerçevesiyle uyumlu bulunmuştur (USEPA, 2011).

Bu çalışmada HI'nin 1'in oldukça üzerinde çıkması, toplam riskin birkaç metal tarafından baskın faktör olduğunu düşündürmektedir. Nitekim Tablo 4.5'te Mn (THQ=1.779) ve Co (THQ=1.746) değerlerinin tek başına 1'in üzerinde olması, HI'nin yükselmesinde temel belirleyicilerin bu metaller olabileceğine işaret etmektedir. Buğdaylarda ağır metallerin sağlık riski açısından değerlendirildiği bir çalışmada da benzer şekilde, HI değerine en yüksek katkıyı Mn elementinin sağladığı belirlenmiştir (Tong vd. 2022). Diğer metallerin THQ değerleri 1'in altında olsa dahi, toplam etkiyi artırarak HI'yi büyötmektedir. Çoklu kirlenici maruziyetlerinde bu durum beklenen bir sonuçtur; çünkü HI, farklı elementlerin benzer toksikolojik özellikler üzerindeki birleşik etkisini oluşturmaktadır. Bu nedenle HI'nin yüksek bulunması, buğdayın tek başına "tehlikeli" olduğu anlamına gelmekten ziyade, çalışma alanında yetiştirilen ürünlerdeki metal yükünün uzun dönemli tüketim senaryolarında sağlık açısından izlenmesi gerektiğini ortaya koymaktadır (USEPA, 2011; ATSDR, 2012; ATSDR, 2019).

Buğdaylarda metallerin toksik potansiyelini değerlendirmek için yapılan bir çalışmada, THQ değerleri Cd için 0.07, Pb için 0.11, Cu için 0.09, Zn için 0.05 ve Ni için 0.08 olarak bulunmuştur. Tüm metallerin toplam etkisi olan toplam tehlike indeksi (HI) ise 0.40 olarak hesaplanmıştır. HI değerinin 1'in altında olması, buğday tüketimi yoluyla toplam metal maruziyetinin hem yetişkinler hem de çocuklar için belirgin toksik etkiler oluşturma olasılığının düşük olduğunu göstermektedir (Tawfeeq ve Hakeem, 2025).

Yapılan bir başka çalışmada, Varanasi (Hindistan) kentinde yaygın olarak tüketilen ticari pirinç tanelerinde Cd, Cr, Pb, As, Ni, Cu ve Zn gibi ağır metal kontaminasyonu incelenmiş ve pirinç tüketimi yoluyla metal alımına ilişkin risk değerlendirmesi yapılmıştır. Cd dışındaki metallerin uluslararası izin verilen sınır değerleri dahilinde olduğu tespit edilmiştir. THQ değerlendirmesinde, Cd, Cr ve Cu için yüksek maruziyet senaryolarında bazı pirinç çeşitlerinde THQ değerlerinin 1'in üzerine çıktığı gözlemlenmiştir. Bu, söz konusu metaller için potansiyel kanser dışı sağlık risklerinin bulunduğunu göstermektedir (Singh vd. 2025).

Pirinç, buğday, kinoa ve mısır gibi tahıllar ve tahıl bazlı işlenmiş ürünlerde ağır metallerin insan sağlığı üzerindeki potansiyel risklerinin değerlendirildiği bir çalışmada da, özellikle

pirinç ve pirinç ürünlerinde HI değerleri 1 ile 10 arasında bulunmuş ve bu durum karsinojen olmayan olumsuz sağlık etkilerine işaret etmiştir. Ayrıca Toplam Hedef Kanseri Riski değerlerinin birçok pirinç ve kinoa ürünü için kabul edilebilir risk eşiği olan 10^{-4} 'ü aştığı belirlenmiştir; bu da uzun süreli tüketim altında kanser riskinin artabileceğini göstermektedir (Román-Ochoa vd. 2021).

5. SONUÇ

Bu çalışmada, Erzincan-Erzurum karayolu ve organize sanayi bölgesi çevresinde yer alan tarım alanlarından farklı noktalardan toplanan ekmeklik buğday (*Triticum aestivum*) örneklerinde bazı ağır metallerin (As, Cr, Al, Co, Mn, Ni, Cu, Fe, Zn ve Ag) düzeyleri belirlenmiş ve bu metallerin karayoluna olan mesafeye bağlı olarak değişimi incelenmiştir. Elde edilen bulgular, ağır metal konsantrasyonlarının genel olarak karayoluna yakın alanlarda daha yüksek olduğunu ve mesafe arttıkça belirgin bir azalma eğilimi gösterdiğini ortaya koymuştur.

İncelenen tüm metaller arasında özellikle demir (Fe), manganez (Mn) ve çinko (Zn) konsantrasyonlarının diğer metallere kıyasla daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Bununla birlikte, arsenik (As), krom (Cr), nikel (Ni) ve kobalt (Co) gibi toksik potansiyele sahip metallerin de karayoluna yakın örnekleme noktalarında daha yüksek değerler aldığı tespit edilmiştir. Bu durum, trafik kaynaklı emisyonlar, lastik ve fren aşınması, yakıt yanma ürünleri ile yol yüzeyinden kaynaklanan partiküllerin tarım alanları üzerinde etkili olduğunu göstermektedir.

Karayoluna olan mesafe ile ağır metal birikimi arasındaki ters yönlü ilişki, mesafenin ağır metal kirliliği üzerinde belirleyici bir faktör olduğunu ortaya koymuştur. Özellikle yol kenarına yakın alanlarda yetiştirilen buğdaylarda metal birikiminin daha yüksek olması, trafik kaynaklı kirliliğin tarımsal ürünler üzerindeki etkisini açık biçimde göstermektedir. Bu bulgular, literatürde yer alan benzer çalışmalarla uyumlu olup, karayolları çevresindeki tarım alanlarının ağır metal kirliliği açısından risk altında olduğunu doğrulamaktadır.

Ayrıca, elde edilen ağır metal düzeyleri insan sağlığı açısından değerlendirildiğinde, özellikle buğday gibi temel bir gıda maddesi aracılığıyla uzun süreli maruziyet durumunda potansiyel sağlık risklerinin oluşabileceğini göstermektedir. Arsenik, krom ve nikel gibi metallerin kronik alımı; kanserojen, nörotoksik ve organ hasarına yol açabilen etkilerle ilişkilendirilmektedir. Her ne kadar çalışmada belirlenen konsantrasyonlar kısa vadede akut bir risk oluşturmuyor gibi görünse de, buğdayın günlük ve sürekli tüketilen bir gıda olması

nedeniyle düşük düzeyli maruziyetin uzun vadede birikimsel sağlık etkileri oluşturabileceği göz ardı edilmemelidir. Bu bağlamda, karayoluna yakın alanlarda üretilen buğdayların insan sağlığı üzerindeki olası etkilerinin yalnızca çevresel kirlilik açısından değil, aynı zamanda gıda güvenliği ve halk sağlığı perspektifinden de değerlendirilmesi gerektiği sonucuna varılmıştır.

Karayoluna farklı mesafelerde yer alan tarım alanlarından elde edilen buğday örnekleri için hesaplanan sağlık risk indeksleri, mesafeye bağlı olarak ağır metal kaynaklı risklerin anlamlı biçimde değiştiğini ortaya koymuştur. Karayoluna 10 m mesafede yer alan tarım alanlarında özellikle Mn ve Co için THQ değerlerinin 1'in üzerinde olması, bu alanlarda üretilen buğdayın uzun süreli tüketimi durumunda potansiyel sağlık riskine işaret etmektedir. Mesafenin 100 m'ye çıkarılmasıyla birlikte THQ değerlerinde belirgin bir azalma gözlenmiş, ancak bazı metallerde riskin tamamen ortadan kalkmadığı belirlenmiştir. Benzer şekilde, karayoluna 10 m mesafede hesaplanan HI değerinin 1'in oldukça üzerinde olması, özellikle Mn ve Co başta olmak üzere çoklu ağır metal maruziyetinin uzun süreli tüketim halinde potansiyel sağlık riski oluşturduğunu göstermektedir. Mesafenin 100 m'ye çıkarılmasıyla birlikte HI değerinde belirgin bir azalma gözlenmiş olsa da, HI'nin hâlen 1'in üzerinde bulunması, trafik kaynaklı ağır metal kirliliğinin bu mesafede dahi tamamen ortadan kalkmadığını ortaya koymaktadır. Elde edilen bulgular, karayollarına yakın tarım alanlarında yetiştirilen ürünlerin düzenli olarak izlenmesi gerektiğini ve özellikle insan tüketimine sunulan tahıllar için minimum güvenli mesafe kriterlerinin yeniden değerlendirilmesinin önemini vurgulamaktadır.

Bu çalışma paralelinde şu öneriler sunulabilir:

- Karayollarına yakın tarım alanlarında yetiştirilen buğday ve benzeri temel gıda ürünlerinde ağır metal birikiminin düzenli olarak izlenmesi ve periyodik sağlık risk analizlerinin yapılması önerilmektedir. Özellikle tahmini günlük alım (EDI), hedef tehlike katsayısı (THQ) ve toplam tehlike indeksi (HI) gibi risk değerlendirme yaklaşımlarının kullanılması, insan sağlığı üzerindeki potansiyel etkilerin daha net ortaya konulmasına katkı sağlayacaktır.
- Trafik yoğunluğunun yüksek olduğu karayolu kenarlarında tarımsal üretim alanları ile yol arasında tampon bölgelerin oluşturulması, ağır metal taşınımının azaltılması açısından önemlidir. Ağaçlandırma ve yeşil kuşak uygulamaları, hem çevresel kirliliğin azaltılmasında hem de tarım alanlarının korunmasında etkili bir yöntem olarak değerlendirilebilir.

- Karayoluna çok yakın mesafelerde gıda amaçlı tarım yerine, ağır metal birikimine daha dayanıklı bitki türlerinin tercih edilmesi ya da bu alanların gıda üretimi dışında kullanılması önerilmektedir. Bu yaklaşım, insan sağlığına yönelik potansiyel risklerin azaltılmasına katkı sağlayacaktır.
- Gelecekte yapılacak çalışmalarda, yalnızca bitki örnekleri değil, aynı zamanda toprak ve sulama suyu örneklerinin de birlikte değerlendirilmesi ve bu verilerin sağlık risk analiziyle entegre edilmesi önerilmektedir. Ayrıca farklı yaş grupları ve tüketim senaryoları dikkate alınarak risk değerlendirmelerinin yapılması, sonuçların daha kapsamlı yorumlanmasına olanak sağlayacaktır.



KAYNAKLAR

- Ab Rhaman, S. M. S., Naher, L., & Siddiquee, S. (2021). Mushroom quality related with various substrates' bioaccumulation and translocation of heavy metals. *Journal of Fungi*, 8(1), 42.
- Adiloğlu, S., & Sağlam, M. T. (2015). Karayolu kenarlarındaki tarım arazilerindeki topraklarda ekstrakte edilebilir kobalt (Co) içerikleri. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 15(3), 24–29.
- Adriano, D. C. (2001). *Trace elements in terrestrial environments: Biogeochemistry, bioavailability, and risks of metals* (2nd ed., Vol. 860). New York, NY: Springer.
- Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR). (2012). *Toxicological profile for cadmium*. U.S. Department of Health and Human Services, Public Health Service, Atlanta, GA.
- Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR). (2016). *Toxicological profile for arsenic*. Agency for Toxic Substances and Disease Registry, Division of Toxicology, Atlanta, GA, 37184170.
- Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR). (2019). *Toxicological profile for lead*. U.S. Department of Health and Human Services, Public Health Service, Atlanta, GA.
- Aiqing, Z., Zhang, L., Ning, P., Chen, Q., Wang, B., Zhang, F., Zhang, Y., vd. (2022). Zinc in cereal grains: Concentration, distribution, speciation, bioavailability, and barriers to transport from roots to grains in wheat. *Critical reviews in food science and nutrition*, 62(28), 7917-7928.
- Al Sidawi, R., Ghambashidze, G., Urushadze, T. & Ploeger, A. (2021). Heavy Metal Levels in Milk and Cheese Produced in the Kvemo Kartli Region, Georgia. *Foods*, 10 (9), 2234.
- Alengebawy, A., Abdelkhalek, S. T., Qureshi, S. R., & Wang, M. Q. (2021). Heavy metals and pesticides toxicity in agricultural soil and plants: Ecological risks and human health implications. *Toxics*, 9(3), 42.
- Algan, F. T. K., & Bilen, S. (2005). Toprak kirlenmesi ve biyolojik çevre. *Atatürk Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 36(1), 83-88.
- Al-Khashman, O.A., (2004). Heavy metal distribution in dust, street dust and soils from the workplace in Karak Industrial Estate, Jordan. *Atmospheric Environment*, 38(39), 6803–6812.
- Alloway, B. J. (Ed.). (2012). *Heavy metals in soils: trace metals and metalloids in soils and their bioavailability* (Vol. 22). Springer Science & Business Media.
- Altuner, F., Oral, E., & Ülker, M. (2019). Van ili buğday tarımının Türkiye ve bölgedeki yeri, sorunları ve çözüm önerileri. *Yüzüncü Yıl University Journal of Agricultural Sciences*, 29(2), 339–351.

- Aneyo, I. A., Doherty, F. V., Adebesein, O. A., & Hammed, M. O. (2016). Biodegradation of pollutants in waste water from pharmaceutical, textile and local dye effluent in Lagos, Nigeria. *Journal of Health & Pollution*, 6(12), 34.
- Antoine, J. M., Fung, L. A. H., & Grant, C. N. (2017). Assessment of the potential health risks associated with the aluminium, arsenic, cadmium and lead content in selected fruits and vegetables grown in Jamaica. *Toxicology reports*, 4, 181-187.
- Aslan, G., & Esen, A. (2010). Minilaparotomi İle Sinir Koruyucu Radikal Prostatektomi: İlk Deneyimler. *Dokuz Eylül Üniversitesi Tıp Fakültesi Dergisi*, 24(3), 125-129.
- Asri, F. Ö., & Sönmez, S. (2006). Ağır metal toksisitesinin bitki metabolizması üzerine etkileri. *Derim*, 23(2), 36-45.
- Atak, M., (2017). Buğday ve Türkiye buğday köy çeşitleri. *Mustafa Kemal Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 22(2), 71-88.
- Atayese, M. O., Eigbadon, A. I., & Adesodun, J. K. (2008). Heavy metal contamination of Amaranthus grown along major highways in Lagos, Nigeria. *African Crop Science Journal*, 16(4).
- Atilla, E., Haldenbilen, S., & Koralay, T. (2017). Denizli ilinde tarım arazilerinde ulaşım kaynaklı kirlenme. *TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası*, 12.
- Bakar, C., & Baba, A. (2009). Metaller ve insan sağlığı: Yirminci yüzyıldan bugüne ve geleceğe miras kalan çevre sağlığı sorunu.
- Bartzas, G., Tsakiridis, P. E., & Komnitsas, K. (2021). Nickel industry: Heavy metal (loid) s contamination-sources, environmental impacts and recent advances on waste valorization. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 21, 100253.
- Baykanoğlu, B. (2024). *Kahramanmaraş il merkezi çevresindeki orman topraklarında ağır metal kirliliğinin incelenmesi* (Yüksek lisans tezi). Bartın Üniversitesi, Orman Mühendisliği Anabilim Dalı.
- Bielecka., , J., Markiewicz-Żukowska, R., Nowakowski, P., Grabia, M., Puścion-Jakubik, A., Mielcarek, K., Socha, K., vd. (2020). Content of toxic elements in 12 groups of rice products available on Polish market: *Human health risk assessment. Foods*. 9(12), 1906.
- Bilen, S. (2017). *Su kirliliği ve topraklar üzerine etkileri. İşte Sağlık*, (23). Retrieved from <https://www.istesaglikdergisi.com.tr/index.php/2017/04/19/su-kirliligi-ve-topraklar-uzerine-etkileri/>
- Bilge, U., & Çimrin, K. M. (2013). Viranşehir-Kızıltepe karayolu kenarındaki topraklarda motorlu taşıtlardan kaynaklanan ağır metal kirliliği. *Tarım Bilimleri Dergisi*, 19(4), 323-329.

- Binesh, A., & Venkatachalam, K. (2024). Copper in human health and disease: A comprehensive review. *Journal of Biochemical and Molecular Toxicology*, 38(11), e70052.
- Blust, R. (2011). Cobalt. In *Fish physiology* (Vol. 31, pp. 291-326). Academic Press.
- Bornhorst, J., Ebert, F., Hartwig, A., Michalke, B., & Schwerdtle, T. (2010). Manganese inhibits poly (ADP-ribosyl) ation in human cells: a possible mechanism behind manganese-induced toxicity. *Journal of Environmental Monitoring*, 12(11), 2062-2069.
- Bradl, H. (2005). *Heavy Metals in the Environment: Origin, Interaction and Remediation*. Elsevier.
- Brizio, P., Benedetto, A., Squadrone, S., Curcio, A., Pellegrino, M., Ferrero, M. ve Abete, M.C., (2016). Heavy metals and essential elements in Italian cereals. *Food Additives & Contaminants: Part B*, 9(4), 261–267.
- Bwatanglang, I. B., Alexander, P., & Timothy, N. A. (2019). Vehicle-derived heavy metals and human health risk assessment of exposure to communities along Mubi-Yola highway in Adamawa State (Nigeria). *Journal of Scientific Research and Reports*, 23(1), 1-13.
- Canadian Food Inspection Agency. (2020). *Levels of arsenic in foods*. <https://www.inspection.gc.ca>
- Carson, D. (2009). *Argyria: the pharmacology of silver*. *Journal of the American Academy of Dermatology*, 61(5), 848-854.
- Centers for Disease Control and Prevention. (2017a). Agency for Toxic Substances and Disease Registry.(2017). *SVI 2014 Documentation*.
- Centers for Disease Control and Prevention. (2017b). Agency for Toxic Substances and Disease Registry.(2017). *SVI 2014 Documentation*.
- Cheng, H., Villahoz, B. F., Ponzio, R. D., Aschner, M., & Chen, P. (2023). Signaling pathways involved in Manganese-Induced neurotoxicity. *Cells*, 12(24), 2842.
- Chiroma, T., Ebewe, R., & Hymore, F. (2014). Comparative assessment of heavy metal levels in soil, vegetables and urban grey waste water used for irrigation in Yola and Kano. *International refereed journal of engineering and science*, 3(2), 01-09.
- Chien, L. C., Hung, T. C., Choang, K. Y., Yeh, C. Y., Meng, P. J., Shieh, M. J., & Han, B. C. (2002). Daily intake of TBT, Cu, Zn, Cd and As for fishermen in Taiwan. *Science of the Total Environment*, 285(1–3), 177–185.
- Ciociola, A. A., Karlstadt, R. G., Pambianco, D. J., Woods, K. L., Ehrenpreis, E. D., & FDA-Related Matters Committee of the American College of Gastroenterology. (2014). The Food and Drug Administration advisory committees and panels: How they are applied to the drug regulatory process. *Official journal of the American College of Gastroenterology| ACG*, 109(10), 1508-1512.

- Coşkun, B. (2022). *Şehir merkezi bahçelerinde yetiştirilen karalahana ve rokanın ağır metal kirlilikleri, polifenolik profilleri ve bazı diğer kalite parametrelerinin değerlendirilmesi* (Yüksek lisans tezi). Biruni Üniversitesi.
- Çatak, E., Çolak, G., Tokur, S. ve Bilgiç, O. (2000). Bazı domates ve tütün genotiplerinde kadmiyum etkilerini inceleyen istatistiksel bir çalışma. *BAÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 2(1), 13-41.
- Çelebi, H., & Gök, G. (2016). Topraklarda otoyol ve trafik kaynaklı ağır metal kirliliğinin değerlendirilmesi. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 24(6), 1169-1178.
- Dawson, A. (Ed.). (2008). *Water in road structures: movement, drainage & effects* (Vol. 5). Springer Science & Business Media.
- Deveci, D., (2015). *Mısır (Zea mays L.) bitkilerinde kadmiyumun toksitesi ile nitrik oksit arasındaki ilişkinin incelenmesi* (yüksek lisans tezi). Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Dilbilir, G., & Gülser, F. (2024). Van Organize Sanayi Bölgesi çevresindeki topraklarda ağır metal kirliliğinin araştırılması. *Toprak Bilimi ve Bitki Besleme Dergisi*, 12(1), 46-58.
- Dorjsuren, U. (2012). *İstanbul Üniversitesi Avcılar Yerleşkesi'nde solunabilir partikül maddenin boyut dağılımının ve element içeriğinin incelenmesi* (Yüksek lisans tezi). İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Duong, T. T., & Lee, B. K. (2011). Determining contamination level of heavy metals in road dust from busy traffic areas with different characteristics. *Journal of Environmental Management*, 92(3), 554–562.
- Ediene, V. F., & Umoetok, S. B. A. (2017). Concentration of heavy metals in soils at the municipal dumpsite in Calabar Metropolis. *Asian Journal of Environment & Ecology*, 3(2), 1–11.
- EFSA Panel on Contaminants in the Food Chain (CONTAM). (2010). *Scientific opinion on lead in food*. *EFSA Journal*, 8(4), 1570.
- EFSA Panel on Contaminants in the Food Chain (CONTAM). (2012). Scientific opinion on cadmium in food. *EFSA Journal*, 10(1), 2551.
- EFSA Panel on Dietetic Products, Nutrition and Allergies (NDA). (2009). *Scientific opinion on the substantiation of health claims related to copper and protection of DNA, proteins and lipids from oxidative damage; function of the immune system; maintenance of connective tissues; energy-yielding metabolism; function of the nervous system; maintenance of skin and hair pigment; iron transport; cholesterol metabolism; and glucose metabolism pursuant to Article 13(1) of Regulation (EC) No 1924/2006*. *EFSA Journal*, 7(9), 1211.
- EFSA Panel on Dietetic Products, Nutrition and Allergies (NDA). (2005). *Opinion of the Scientific Panel on Dietetic Products, Nutrition and Allergies on a request from the Commission related to the tolerable upper intake level of nickel*. *EFSA Journal*, 3(2), 146.

- EFSA Panel on Food Additives, Flavourings, Processing Aids and Food Contact Materials (AFC). (2008). *Scientific opinion on the safety of aluminium from dietary intake*. *EFSA Journal*, 6(7), 754.
- Eroğlu, G., & Şahiner, M. (2020). Üretimden ticarete manganez. *MTA Doğal Kaynaklar ve Ekonomi Bülteni*, 30, 99-109.
- Ertugay, M. F., Ertugay, N., & Özdokur, K. V. (2025). Doğu Anadolu Bölgesi'nde Erzincan-Erzurum Karayolu boyunca şeker pancarı (*Beta vulgaris*) bitkisinde ağır metal kirliliğinin değerlendirilmesi. *Erzincan Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 18(1), 264–273.
- European Commission. (2015). *Commission Regulation (EU) No 2015/1006 of 25 June 2015 amending Regulation (EC) No 1881/2006 as regards maximum levels of inorganic arsenic in foodstuffs*. *Official Journal of the European Union*.
- European Food Safety Authority. (2009). *Assessment of the public health significance of methicillin-resistant Staphylococcus aureus (MRSA) in animals and foods* (EFSA Journal 2009;7(10):993).
- Fakri, S., Al-Azzawi, A., & Al-Tawil, N. (2006). Antiperspirant use as a risk factor for breast cancer in Iraq. *Eastern Mediterranean health journal*, 12(3/4), 478.
- FAO, W. (2001). *Condex alimentarius commission, food additives and contaminants*. Joint FAO. WHO. *Food Standards Progr Alinorm*, 10(12A), 1-289.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations & World Health Organization. (2018). *Codex Alimentarius Commission: Joint FAO/WHO Food Standards Programme. Codex Committee on Contaminants in Foods—Working document for information and use in discussions related to contaminants and toxins in the GSCTFF (Twelfth session, Utrecht, The Netherlands, 12–16 March 2018)*. FAO/WHO.
- Food and Agriculture Organization,. (2017). *FAO Cereal Supply and Demand Brief*. [Online].
- Food and Drug Administration (FDA). (2013). *Guidance for industry: Nutrition labeling manual*. U.S. Department of Health and Human Services.
- Gaetke, L. M., & Chow, C. K. (2003). Copper toxicity, oxidative stress, and antioxidant nutrients. *Toxicology*, 189(1-2), 147-163.
- Garg, B. D., Cadle, S. H., Mulawa, P. A., Groblicki, P. J., Laroo, C., & Parr, G. A. (2000). Brake wear particulate matter emissions. *Environmental Science & Technology*, 34(21), 4463-4469.
- Ge, D., Gao, H., Guo, N., Jiang, M., Ma, H., Li, Y., Lv, S., vd. (2020). Heavy metals in grains from Jilin Province, China, and human health risk. *Journal of Food Protection*, 83(12), 2193-2199.

- Genchi, G., Carocci, A., Lauria, G., Sinicropi, M. S., & Catalano, A. (2020). Nickel: Human health and environmental toxicology. *International journal of environmental research and public health*, 17(3), 679.
- Ghani, A. (2011). Effect of chromium toxicity on growth, chlorophyll and some mineral nutrients of *Brassica juncea* L. *Egyptian Academic Journal of Biological Sciences, H. Botany*, 2(1), 9-15.
- Govind P., ve Madhuri S. (2014). Heavy metals causing toxicity in animals and fishes. *Research Journal of Animal, Veterinary and Fishery Sciences*, 2(2):17-23.
- Gönültaş, H., & Kızılaslan, H. (2021). Tarımsal üreticilerce algılanan çevre sorunları ve nedenleri (TR83 bölgesi araştırması). *Gaziosmanpaşa Bilimsel Araştırma Dergisi*, 10(1), 70–82.
- Grazuleviciene, R., Nadisauskiene, R., Buinauskiene, J., & Grazulevicius, T. (2009). Effects of elevated levels of manganese and iron in drinking water on birth outcomes. *Polish journal of environmental studies*, 18(5).
- Grigoratos, T., & Martini, G. (2015). Brake wear particle emissions: A review. *Environmental Science and Pollution Research*, 22(4), 2491–2504. <https://doi.org/10.1007/s11356-014-3696-8>
- Gruszecka-Kosowska, A. (2020). Human health risk assessment and potentially harmful element contents in the cereals cultivated on agricultural soils. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(5), 1674.
- Guo, J., Dai, X., Xu, W., & Ma, M. (2008). Overexpressing GSH1 and AsPCS1 simultaneously increases the tolerance and accumulation of cadmium and arsenic in *Arabidopsis thaliana*. *Chemosphere*, 72(7), 1020-1026.
- Gülada, O., (2015) *Karaman ilinde yetiştirilen bazı tahılların ağır metal içeriklerinin araştırılması* (Yüksek Lisans Tezi), Karamanoğlu Mehmet Bey Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Güneş, M., & Çilali, E. (2018). Tokat- Amasya Karayolu Çevresinde Doğal Olarak Yetişen Kuşburnunda (*Rosa* sp) Mesafeye Bağlı Olarak Kirliliğin Belirlenmesi. *Gaziosmanpaşa Bilimsel Araştırma Dergisi*, 7(3), 118-129.
- Güngör, S. S., Çakırlar-Altuntaş, E., & Yılmaz, M. (2022). Çevre Kirliliğinin Tarımsal Üretime Etkilerine İlişkin Öğretmen Adayı Görüşlerinin İncelenmesi. *Uluslararası Güncel Eğitim Araştırmaları Dergisi*, 8(1), 88–105.
- Güzelsoy, N. A. (2013). *ICP-MS ile bazı gıda takviyelerinde element analizleri ve analitik problemler* (Yüksek lisans tezi). Bursa Uludağ Üniversitesi. Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Hadrup, N., Sharma, A. K., & Loeschner, K. (2018). Toxicity of silver ions, metallic silver, and silver nanoparticle materials after in vivo dermal and mucosal surface exposure: A review. *Regulatory Toxicology and Pharmacology*, 98, 257-267.

- Herndon, T. M., Deisseroth, A., Kaminskas, E., Kane, R. C., Koti, K. M., Rothmann, M. D., Habtemariam, B., Bullock, J., Bray, J. D., & Hawes, J. (2013). US Food and Drug Administration approval: Carfilzomib for the treatment of multiple myeloma. *Clinical cancer research*, 19(17), 4559-4563.
- Hmeer, A. I. A., & Şevik, H. (2025). Bazı Bitkilerin Farklı Organlarındaki Çinko Konsantrasyonlarına Trafik Yoğunluğunun Etkisi. *Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 16(1), 46-52.
- Hughes, J. P., Polissar, L., & Van Belle, G. (1988). Evaluation and synthesis of health effects studies of communities surrounding arsenic-producing industries. *International Journal of Epidemiology*, 17(2), 407–413. <https://doi.org/10.1093/ije/17.2.407>.
- Hui, Z., Caiqiu, W., Jiping, G., Xuyin, Y., Qiao, W., Wenming, P., Hanpei, Z., vd. (2017). Assessment of Heavy Metal Contamination in Roadside Soils Along the Shenyang-Dalian Highway in Liaoning Province, China. *Polish Journal of Environmental Studies*, 26(4).
- Hulskotte, J. H. J., Denier van der Gon, H. A. C., Visschedijk, A. J. H., & Schaap, M. (2007). Brake wear from vehicles as an important source of diffuse copper pollution. *Water Science & Technology*, 56(1), 223–231.
- Hussain, S., Rengel, Z., Qaswar, M., Amir, M., & Zafar-ul-Hye, M. (2019). Arsenic and heavy metal (cadmium, lead, mercury and nickel) contamination in plant-based foods. In *Plant and Human Health, Volume 2: Phytochemistry and Molecular Aspects* (pp. 447-490). Cham: Springer International Publishing.
- Ifeoma, E. L., Awotoye Olusegun, O., & Ogbonna Princewill, C. (2014). Spatial distribution of heavy metals in soil and plant in a quarry site in Southwestern Nigeria. *Research Journal of Chemical Sciences*.
- Iskan, B., Sıdal, H. C., & Malak, U. (2015). Çimento sektörü, döner fırın bacalarından çıkan ağır metal sonuçlarının incelenmesi; yakıtlara göre değişimlerin incelenmesi (6. *Ulusal Hava Kirliliği ve Kontrolü Sempozyumu*, 7–9 Ekim 2015, İzmir).
- Islam, M. S., Nur-E-Alam, M., Iqbal, M. A., Khan, M. B., Al Mamun, S., Miah, M. Y., Salam, M. A. vd. (2024). Spatial distribution of heavy metal abundance at distance gradients of roadside agricultural soil from the busiest highway in Bangladesh: A multi-index integration approach. *Environmental Research*, 250, 118551.
- Jaishankar, M., Tseten, T., Anbalagan, N., Mathew, B. B., & Beeregowda, K. N. (2014). Toxicity, mechanism and health effects of some heavy metals. *Interdisciplinary toxicology*, 7(2), 60.
- Jaradat, Q. M., & Momani, K. A. (1999). Contamination of roadside soil, plants, and air with heavy metals in Jordan, a comparative study. *Turkish Journal of Chemistry*, 23(2), 209-220.

- Jiang, J., Liu, M., Parvez, F., Wang, B., Wu, F., Eunus, M., Chen, Y., vd. (2015). Association between arsenic exposure from drinking water and longitudinal change in blood pressure among HEALS cohort participants. *Environmental health perspectives*, 123(8), 806.
- Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives. Meeting & World Health Organization. (2013). *Evaluation of Certain Food Additives and Contaminants: Seventy-Seventh Report of the Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives* (C. 983). World Health Organization.
- Kabata-Pendias, A. (2020). *Trace elements in soils and plants* (5th ed.). CRC Press.
- Kadioğlu, B. (2021). Toprak kirliliği ile kimyasal gübre kullanımı arasındaki olası bağlantıların incelenmesi. *Muş Alparslan Üniversitesi Tarım ve Doğa Dergisi*, 1(2), 26-38.
- Kahvecioğlu, Ö., Kartal, G., Güven, A., & Timur, S. (2003). Metallerin çevresel etkileri-I. *Metallurji dergisi*, 136, 47-53.
- Kalkan, İ., ve Özarık, B. (2016). Tam buğday ekmeği ve sağlık üzerine etkisi. *Aydın Gastronomy*, 1(1), 37-46.
- Kalkınma Bakanlığı. (2018). *Tarımsal gelişme ve verimlilik raporu*. Kalkınma Bakanlığı.
- Kambe, T., Tsuji, T., Hashimoto, A., & Itsumura, N. (2015). The physiological, biochemical, and molecular roles of zinc transporters in zinc homeostasis and metabolism. *Physiological reviews*.
- Kaptan, B. (2022). *Covid 19 sürecinde dezenfektan amaçlı kullanılan kollodial gümüşün bitkiler üzerindeki etkileri ve hücresel değişimlerinin incelenmesi*. (Yüksek Lisans tezi). Üsküdar Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Moleküler Biyoloji ve Genetik Bölümü.
- Kara, E. E., & Kara, E. (2018). Toprakta ağır metal kirliliğinin insan sağlığına etkileri ve çözüm önerileri. *Türk Bilimsel Derlemeler Dergisi*, 11(1), 56-62.
- Khan, Z. I., Arshad, N., Ahmad, K., Nadeem, M., Ashfaq, A., Wajid, K., Bashir, H., Munir, M., Huma, B., & Memoona, H. (2019). Toxicological potential of cobalt in forage for ruminants grown in polluted soil: A health risk assessment from trace metal pollution for livestock. *Environmental Science and Pollution Research*, 26(15), 15381-15389.
- Khan, Z. I., Nisar, A., Ugulu, I., Ahmad, K., Wajid, K., Bashir, H., & Dogan, Y. (2019). Determination of cadmium concentrations of vegetables grown in soil irrigated with wastewater: Evaluation of health risk to the public. *Egyptian Journal of Botany*, 59(3), 753-762.

- Kiknadze, N., Nakashidze, N., Jashi, D., Tavdgiridze, G. M. N., & Megrelidze, N. (2019). Concentration of Heavy Metals in Some Types of Soils of Georgia and Their Influence to Qualitative Parameters of Agricultural Crops. *Monograph). Kosice (Slovakia)*, 1-91.
- Kobielska, P. A., Howarth, A. J., Farha, O. K., & Nayak, S. (2018). Metal–organic frameworks for heavy metal removal from water. *Coordination chemistry reviews*, 358, 92-107.
- Koca, Y. K., Sungur, A., & Özcan, H. Yerleşim yeri uzaklığına bağlı olarak kiraz bahçesi topraklarında ağır metal durumunun incelenmesi (Lapseki-Çanakkale). *COMU Journal of Agriculture Faculty*, 7(1), 21-28.
- Kul, S., Gül, V., & Cengiz, İ. (2021). Toprak ve bitkilerde ağır metal kirliliğinin araştırılması: Bayburt ili örneği. *Journal of Anatolian Environmental and Animal Sciences*, 6(2), 195-203.
- Kumar, V., & Dwivedi, S. K. (2021). Bioremediation mechanism and potential of copper by actively growing fungus *Trichoderma lixii* CR700 isolated from electroplating wastewater. *Journal of Environmental Management*, 277, 111370.
- Kurt, Ç. (2012). *Buğday işleme fabrikasındaki işlem akışı ve enerji sarfıyatı*. (Yüksek lisans tezi), Namık Kemal Üniversitesi. Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Kusin, F. M., Azani, N. N. M., Hasan, S. N. M. S., & Sulong, N. A. (2018). Distribution of heavy metals and metalloid in surface sediments of heavily-mined area for bauxite ore in Pengerang, Malaysia and associated risk assessment. *Catena*, 165, 454-464.
- Küçük, C., & Karaoğlu, M. (2021). Heavy metal pollution in the agricultural soils alongside highway 080 of Iğdir province. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (25), 325-333.
- Lansdown, A. B. G. G. (2006). Silver in health care: antimicrobial effects and safety in use. *current problems in dermatology-basel-*, 33(R), 17.
- Li, X., Poon, C. S., & Liu, P. S. (2001). Heavy metal contamination of urban soils and street dusts in Hong Kong. *Applied geochemistry*, 16(11-12), 1361-1368.
- Magaye, R., Zhao, J., Bowman, L., & Ding, M. I. N. (2012). Genotoxicity and carcinogenicity of cobalt-, nickel-and copper-based nanoparticles. *Experimental and therapeutic medicine*, 4(4), 551-561.
- Mahey, S., Kumar, R., Sharma, M., Kumar, V., & Bhardwaj, R. (2020). A critical review on toxicity of cobalt and its bioremediation strategies. *SN Applied Sciences*, 2(7), 1279.
- Mani-López, E., Ramírez-Corona, N., & López-Malo, A. (2023). Advances in probiotic incorporation into cereal-based baked foods: Strategies, viability, and effects—A review. *Applied Food Research*, 3(2), 100330.
- Matsumoto, S. T., Mantovani, M. S., Malagutti, M. I. A., Dias, A. L., Fonseca, I. C., & Marin-Morales, M. A. (2006). Genotoxicity and mutagenicity of water contaminated with tannery

- effluents, as evaluated by the micronucleus test and comet assay using the fish *Oreochromis niloticus* and chromosome aberrations in onion root-tips. *Genetics and Molecular Biology*, 29, 148-158.
- Mengoni, A., Gonnelli, C., Galardi, F., Gabbrielli, R., & Bazzicalupo, M. (2000). Genetic diversity and heavy metal tolerance in populations of *Silene paradoxa* L.(Caryophyllaceae): a random amplified polymorphic DNA analysis. *Molecular ecology*, 9(9), 1319-1324.
- Mohanty, M., Pattnaik, M. M., Mishra, A. K., & Patra, H. K. (2023). Phytoefficacy of *Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms-Laub for aqua-remediation of hexavalent chromium in chromite mine effluent of South Kaliapani, Odisha, India. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(15), 43927-43931.
- Monsivais, H., Yeh, C. L., Edmondson, A., Harold, R., Snyder, S., Wells, E. M., Dydak, U., vd. (2024). Whole-brain mapping of increased manganese levels in welders and its association with exposure and motor function. *NeuroImage*, 288, 120523.
- Nachana'a, T. (2019). Determination of heavy metals in soils and plants along a major road in Hong Local Government Area, Adamawa State, Nigeria. *International Journal of Chemical Sciences*, 25(4), 1–10.
- Nagajyoti, P.C., Lee, K.D., & Sreekanth, T.V.M. (2010). Heavy metals, occurrence and toxicity for plants: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 8(3): 199-216.
- Naser, H. M., Sultana, S., Gomes, R., & Noor, S. (2012). Heavy metal pollution of soil and vegetable grown near roadside at Gazipur. *Bangladesh journal of agricultural research*, 37(1), 9-17.
- NIOSH. (2015). *Silver (Metallic and Compounds)*. National Institute for Occupational Safety and Health.
- Nizamlioğlu, F., & Nizamlioğlu, M. (2023). Alüminyum maruziyeti ve sağlık. *Istanbul Gelisim University Journal of Health Sciences*, (20), 735-747.
- O'Brien, T., Xu, J., & Patierno, S. R. (2001a). Effects of glutathione on chromium-induced DNA crosslinking and DNA polymerase arrest. *Molecular and Cellular Biochemistry*, 222(1), 173–182.
- O'Brien, T., Xu, J., & Patierno, S. R. (2001b). Effects of glutathione on chromium-induced DNA crosslinking and DNA polymerase arrest. *Molecular and Cellular Biochemistry*, 222(1), 173–182.
- Oca, R. (2021). *Şanlıurfa ilini Diyarbakır-Akçakale'ye bağlayan karayolu kenarındaki topraklarda motorlu taşıtlardan kaynaklanan bazı ağır metal kirliliğinin belirlenmesi* (Yüksek Lisans Tezi). Harran Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Toprak Bilimi ve Bitki Besleme Ana Bilim Dalı, Şanlıurfa, Türkiye.

- Ogundele, D. T., Adio, A. A., & Oludele, O. E. (2015). Heavy metal concentrations in plants and soil along heavy traffic roads in North Central Nigeria. *Journal of environmental & analytical toxicology*, 5(6), 1.
- Okcu, M., Tozlu, E., Metin Kumlay, A., & Pehlivan, M. (2009). Ağır metallerin bitkiler üzerine etkileri. *Alinteri Journal of Agriculture Science*, 17(2), 14-26.
- Onyedikachi, U. B., Belonwu, D. C., & Wegwu, M. O. (2018). Human health risk assessment of heavy metals in soils and commonly consumed food crops from quarry sites located at Isiagwu, Ebonyi State. *Ovidius University Annals of Chemistry*, 29(1), 8-24.
- Önder S., (2012), *Atıksular ile sulanan zirai alanlardaki ağır metal kirliliğinin araştırılması*, (Yüksek Lisans Tezi). Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Özberk, F., Karagöz, A., Özberk, İ., & Atılı, A. (2016). Buğday genetik kaynaklarından yerel ve kültür çeşitlerine; Türkiye’de buğday ve ekmek. *Tarla Bitkileri Merkez Araştırma Enstitüsü Dergisi*, 25(2), 218–233.
- Özkan, A. (2017). Antakya-Cilvegözü karayolu etrafındaki tarım arazilerinde ve bitkilerdeki ağır metal kirliliği. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 32(3), 9-18.
- Özkan, G. (2009). *Endüstriyel bölge komşuluğunda kıyasal kırsal alandaki hava kalitesi: Muallimköy’de partikül maddede ve topraktaki ağır metal kirliliği* (Yüksek lisans tezi). Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü.
- Özkul, C. (2008). İzmit civarında endüstrileşmenin toprak ağır metal derişimine etkisi. *Uygulamalı Yerbilimleri*, 2, 1–9.
- Pant, P., & Harrison, R. M. (2013). Estimation of the contribution of road traffic emissions to particulate matter concentrations from field measurements: A review. *Atmospheric environment*, 77, 78-97.
- Pirsaheb, M., Fattahi, N., Sharafi, K., Khamotian, R., & Atafar, Z. (2016). Essential and toxic heavy metals in cereals and agricultural products marketed in Kermanshah, Iran, and human health risk assessment. *Food Additives & Contaminants: Part B*, 9(1), 15-20.
- Lisha, K. P., Anshup, & Pradeep, T. (2009). Towards a practical solution for removing inorganic mercury from drinking water using gold nanoparticles. *Gold Bulletin*, 42(2), 144-152.
- Rahimi, E., & Gheysari, E. (2016). Evaluation of lead, cadmium, arsenic and mercury heavy metal residues in fish, shrimp and lobster samples from Persian Gulf. *Kafkas Üniversitesi Veteriner Fakültesi Dergisi*, 22(2).
- Ratner, M. H., & Fitzgerald, E. (2017). Understanding of the role of manganese in parkinsonism and Parkinson disease. *Neurology*, 88(4), 338-339.

- Rodríguez, M. C., Barsanti, L., Passarelli, V., Evangelista, V., Conforti, V., & Gualtieri, P. (2007). Effects of chromium on photosynthetic and photoreceptive apparatus of the alga *Chlamydomonas reinhardtii*. *Environmental research*, 105(2), 234-239.
- Román-Ochoa, Y., Delgado, G. T. C., Tejada, T. R., Yucra, H. R., Durand, A. E., & Hamaker, B. R. (2021). Heavy metal contamination and health risk assessment in grains and grain-based processed food in Arequipa region of Peru. *Chemosphere*, 274, 129792.
- Santos, A. F., Almeida, P. V., Alvarenga, P., Gando-Ferreira, L. M., & Quina, M. J. (2021). From wastewater to fertilizer products: Alternative paths to mitigate phosphorus demand in European countries. *Chemosphere*, 284, 131258.
- Segura, F. R., Franco, D. F., da Silva, J. J. C., & Batista, B. L. (2020). Variations in total As and As species in rice indicate the need for crop-tracking. *Journal of Food Composition and Analysis*, 86, 103392.
- Senarathna, S., Mel, R., & Malalgoda, M. (2024). Utilization of cereal-based protein ingredients in food applications. *Journal of cereal science*, 116, 103867.
- Seven, T., Can, B., Darende, B. N., & Ocak, S. (2018). Hava ve toprakta ağır metal kirliliği. *Ulusal Çevre Bilimleri Araştırma Dergisi*, 1(2), 91–103.
- Sevgi, K., & Leblebici, S. (2022). Bitkilerde ağır metal stresine verilen fizyolojik ve moleküler yanıtlar. *Journal of Anatolian Environmental and Animal Sciences*, 7(4), 528-536.
- Shahid, M., Dumat, C., Khalid, S., Schreck, E., Xiong, T., & Niazi, N. K. (2017). Foliar heavy metal uptake, toxicity and detoxification in plants: A comparison of foliar and root metal uptake. *Journal of hazardous materials*, 325, 36-58.
- Singh, N., Kumar, D., & Sahu, A. P. (2007). Arsenic in the environment: effects on human health and possible prevention. *Journal of environmental biology*, 28(2), 359.
- Singh, P., Sharma, R. K., & Singh, P. K. (2025). Heavy Metal Analysis of Commercial Rice Grains from Varanasi City of India: Insight into Contamination Level, Daily Intake and Associated Health Risks. *Biological Trace Element Research*, 1-14.
- Skendi, A., Irakli, M., Chatzopoulou, P. ve Papageorgiou, M., (2019). Aromatic plants of Lamiaceae family in a traditional bread recipe: Effects on quality and phytochemical content. *Journal of Food Biochemistry*, 43(11), e13020.
- Smith, A. H., Lingas, E. O., & Rahman, M. (2000). Contamination of drinking-water by arsenic in Bangladesh: a public health emergency. *Bulletin of the world health organization*, 78(9), 1093-1103.

- Solgi, E., Alipour, H., & Majnooni, F. (2019). Investigation of the concentration of metals in two economically important fish species from the Caspian Sea and assessment of potential risk to human health. *Ocean Science Journal*, 54(3), 503-514.
- Sürücü, A., & Elaltuntaş, E. (2018, April). Cobalt, chromium, copper and manganese pollution in the soil near the Bingöl-Erzurum Highway. 1. In *International gap agriculture & livestock congress* (pp. 25-27).
- Swaileh, K. M., Hussein, R. M., & Abu-Elhaj, S. (2004). Assessment of heavy metal contamination in roadside surface soil and vegetation from the West Bank. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 47(1), 23–30.
- Tarım ve Orman Bakanlığı. (2024). *Buğday tarım ürünleri piyasaları raporu (Temmuz)*. T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı.
- Tawfeeq, N. N., & Hakeem, I. M. (2025, April). Investigation the Levels of Heavy Metals in Wheat Grain Grown in Iraq and Evaluate Potential Healthing Risks. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 1487, No. 1, p. 012122). IOP Publishing.
- Tayfur, M., Ünlüoğlu, İ., & Bener, Ö. (2002). Alüminyum ve sağlık. *Gıda*, 27(4).
- Thorpe, A., & Harrison, R. M. (2008). Sources and properties of non-exhaust particulate matter from road traffic: A review. *Science of the Total Environment*, 400(1–3), 270–282.
- Tong, S., Yang, L., Gong, H., Wang, L., Li, H., Yu, J., Men, Z., vd. (2022). Bioaccumulation characteristics, transfer model of heavy metals in soil-crop system and health assessment in plateau region, China. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 241, 113733.
- Turkish Statistical Institute. (2025). *Buğday — Tarım Ürünleri Piyasaları Raporu* [PDF]. Tarım ve Orman Bakanlığı Araştırma ve Politikalar Genel Müdürlüğü.
- U.S. Environmental Protection Agency. (1988). *Integrated Risk Information System (IRIS): Copper; carcinogenicity assessment (Group D)*. U.S. Environmental Protection Agency.
- U.S. Environmental Protection Agency. (1989). *Integrated Risk Information System (IRIS)*. U.S. Environmental Protection Agency.
- U.S. Environmental Protection Agency. (1993). *Iron (Fe): Environmental health criteria / fact sheet*. U.S. Environmental Protection Agency.
- U.S. Food and Drug Administration. (2016). *Code of Federal Regulations Title 21, Part 109.30: Arsenic in food. Federal Register*, 81(63), 15523–15528.
- Ugulu, I., Ahmad, K., Khan, Z. I., Munir, M., Wajid, K., & Bashir, H. (2021). Effects of organic and chemical fertilizers on the growth, heavy metal/metalloid accumulation, and human health risk of wheat (*Triticum aestivum* L.). *Environmental Science and Pollution Research*, 28(10), 12533-12545.

- Ugulu, I., Akhter, P., Khan, Z. I., Akhtar, M., & Ahmad, K. (2021). Trace metal accumulation in pepper (*Capsicum annuum* L.) grown using organic fertilizers and health risk assessment from consumption. *Food Research International*, 140, 109992.
- United States Environmental Protection Agency. (1989). *Risk assessment guidance for Superfund: Volume I—Human health evaluation manual (Part A)* (Interim final; EPA/540/1-89/002). U.S. Environmental Protection Agency, Office of Emergency and Remedial Response.
- United States Environmental Protection Agency. (2011). *Exposure factors handbook: 2011 edition* (EPA/600/R-09/052F). U.S. Environmental Protection Agency, National Center for Environmental Assessment. <https://www.epa.gov/ncea/exposure-factors-handbook>
- U.S. Environmental Protection Agency. (2012). *Integrated Risk Information System (IRIS)*. U.S. Environmental Protection Agency.
- U.S. Environmental Protection Agency. (2000). *Guidance for assessing chemical contaminant data for use in fish advisories: Volume II—Risk assessment and fish consumption limits* (EPA 823-B-00-008). U.S. Environmental Protection Agency.
- U.S. Environmental Protection Agency. (2014). *Regional screening level (RSL) summary table (November 2011)*. Washington, DC: U.S. Environmental Protection Agency. Retrieved from <https://www.epa.gov/risk/regional-screening-levels-rsls>
- U.S. Environmental Protection Agency. (2019). *Regional screening level (RSL) summary table (TR = 1E-06; THQ = 1.0)*. Washington, DC: U.S. Environmental Protection Agency. Retrieved from <https://semspub.epa.gov/work/HQ/197414.pdf>
- U.S. Environmental Protection Agency. (2006). *Integrated Risk Information System (IRIS)*. U.S. Environmental Protection Agency. <https://www.epa.gov/iris>
- Valko, M. M. H. C. M., Morris, H., & Cronin, M. T. D. (2005). Metals, toxicity and oxidative stress. *Current medicinal chemistry*, 12(10), 1161-1208.
- Viard, B., Pihan, F., Promeyrat, S., & Pihan, J. C. (2004). Integrated assessment of heavy metal (Pb, Zn, Cd) highway pollution: Bioaccumulation in soil, Graminaceae and land snails. *Chemosphere*, 55(10), 1349–1359.
- Vuori, K. M. (1995). Direct and indirect effects of iron on river ecosystems. *Annales Zoologici Fennici*, 32, 317–329.
- Vural, H. (2021). Trafik Kaynaklı Ağır Metal Kirliliğinin Belirlenmesinde Peyzaj Bitkilerinin Biyomonitor Olarak Kullanılabilirliği. *Turkish Journal of Agricultural and Natural Sciences*, 8(4), 1174-1186.
- Wei, B., & Yang, L. (2010). A review of heavy metal contaminations in urban soils, urban road dusts and agricultural soils from China. *Microchemical journal*, 94(2), 99-107.

- Werkenthin, M., Kluge, B., & Wessolek, G. (2014). Metals in European roadside soils and soil solution—A review. *Environmental pollution*, 189, 98-110.
- Wiseman, C. L., Zereini, F., & Püttmann, W. (2013). Traffic-related trace element fate and uptake by plants cultivated in roadside soils in Toronto, Canada. *Science of the Total Environment*, 442, 86-95.
- Wolińska, A., Stępniewska, Z., & Włosek, R. (2013a). The influence of old leather tannery district on chromium contamination of soils, water and plants. *Natural Science*, 5(2), 253-258.
- Wolińska, A., Stępniewska, Z., & Włosek, R. (2013b). The influence of old leather tannery district on chromium contamination of soils, water and plants. *Natural Science*, 5(2), 253-258.
- World Health Organization. (2002). *The world health report 2002: Reducing risks, promoting healthy life*. World Health Organization.
- World Health Organization. (2011). *Evaluation of certain food additives and contaminants: Seventy-third report of the Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives (JECFA)* (WHO Technical Report Series No. 960). World Health Organization.
- Wuana, R. A., & Okieimen, F. E. (2011). Heavy metals in contaminated soils: a review of sources, chemistry, risks and best available strategies for remediation. *International Scholarly Research Notices*, 2011(1), 402647.
- Yalçın, H., & Çakmak, T. (2023). Dondurulmuş Karides Örneklerinde Ağır Metal Miktarı ve Sağlık Risk Değerlendirmeleri. *Kocatepe Veterinary Journal*, 16(3), 277-286.
- Yaldız, G., & Şekeroğlu, N. (2012). Tıbbi ve aromatik bitkilerin bazı ağır metallere tepkisi. *Türk Bilimsel Derlemeler Dergisi*, (1), 80-84.
- Yan, X., Gao, D., Zhang, F., Zeng, C., Xiang, W., & Zhang, M. (2013). Relationships between heavy metal concentrations in roadside topsoil and distance to road edge based on field observations in the Qinghai-Tibet Plateau, China. *International journal of environmental research and public health*, 10(3), 762-775.
- Yasotha, A., Dabadé, D. S., Singh, V. P., & Sivakumar, T. (2021). Risk assessment of heavy metals in milk from cows reared around industrial areas in India. *Environmental geochemistry and health*, 43(5), 1799-1815.
- Yassine, A., Taoufik, E. R., Rachid, H., Driss, D., Mohamed, N., Abdelmajid, H., & Hanane, H. (2021). Assessing the contamination of trace toxic elements in the soils of sugar beet field (Beni-Mellal, Morocco). *Arabian Journal of Geosciences*, 14(9), 822.
- Yerli, C., Çakmakçı, T., Sahin, U., & Tüfenkçi, Ş. (2020). Ağır metallerin toprak, bitki, su ve insan sağlığına etkileri. *Türk Doğa ve Fen Dergisi*, 9(Özel Sayı), 103-114.
- Yıldız, N. (2011). Tarımsal faaliyetlerin etkileri. *Atatürk Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 27(2)

- Yıldız, N. (2004). *Toprak ve bitki ekosistemindeki ağır metaller* (Yüksek lisans ders notları, ZT-531). Erzurum: Atatürk Üniversitesi.
- Yläraanta, T. (1995). Effect of road traffic on heavy metal concentrations of plants. *Agricultural and Food Science*, 4(1), 35-48.
- Yurdakök, K., & İnce, T. (2008). Aşı adjuvanları. *Çocuk Sağlığı ve Hastalıkları Dergisi*, 51(4), 225-239.
- Yurdakul, İ., Kalınbacak, K., Terzi, D., & Peker, R. M. (2017). Ağır metallerin tarla şartlarında buğday (*Triticum Aestivum* L.) verimine toksik etkisinin belirlenmesi. *Nevşehir Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 6(2), 580-593.
- Zeng, F., Wei, W., Li, M., Huang, R., Yang, F., & Duan, Y. (2015). Heavy metal contamination in rice-producing soils of Hunan province, China and potential health risks. *International journal of environmental research and public health*, 12(12), 15584-15593.
- Zhang, N., Yang, S., Yang, J., Deng, Y., Li, S., Li, N., vd. (2020). Association between metal cobalt exposure and the risk of congenital heart defect occurrence in offspring: a multi-hospital case-control study. *Environmental health and preventive medicine*, 25(1), 38.
- Zhao, Q., Wang, Y., Cao, Y., Chen, A., Ren, M., Ge, Y., vd. (2014). Potential health risks of heavy metals in cultivated topsoil and grain, including correlations with human primary liver, lung and gastric cancer, in Anhui province, Eastern China. *Science of the Total Environment*. 470, 340-347.