



**T. C.
SIVAS CUMHURİYET ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**MALATYA İLİ İÇME SULARINDAKİ AĞIR METAL DÜZEYLERİNİN
İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Semih BAYDOĞAN
(20219220002)**

**Çevre Mühendisliği Ana Bilim Dalı
Tez Danışmanı: Prof. Dr. Fuat ÖZYONAR**

**SİVAS
AĞUSTOS 2025**

Semih BAYDOĞAN'ın hazırladığı ve “**MALATYA İLİ İÇME SULARINDAKİ AĞIR METAL DÜZEYLERİNİN İNCELENMESİ**” adlı bu çalışma aşağıdaki jüri tarafından **ÇEVRE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı	Prof. Dr. Fuat ÖZYONAR Sivas Cumhuriyet Üniversitesi	
Jüri Üyesi	Dr. Öğr. Üyesi Onur SÖZÜDOĞRU Sivas Cumhuriyet Üniversitesi	
Jüri Üyesi	Dr. Öğr. Üyesi Hamdi MuratÇOBANOĞLU Niğde Ömer HalisDemir Üniversitesi	

Bu tez, Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak onaylanmıştır.

Prof. Dr. Nail ALTUNAY
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ MÜDÜRÜ

Bu tez, Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Senatosu'nun 20.08.2014 tarihli ve 7 sayılı kararı ile kabul edilen Fen Bilimleri Enstitüsü Lisansüstü Tez Yazım Kılavuzu (Yönerge)'nda belirtilen kurallara uygun olarak hazırlanmıştır.





Bütün hakları saklıdır.

Kaynak göstermek koşuluyla alıntı ve gönderme yapılabilir.

© Semih BAYDOĞAN 2025

ETİK

Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Tez Yazım Kılavuzu (Yönerge)'nda belirtilen kurallara uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- ✓ Bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- ✓ Görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- ✓ Başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere, bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu ve atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- ✓ Bütün bilgilerin doğru ve tam olduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- ✓ Tezin herhangi bir bölümünü, Sivas Cumhuriyet Üniversitesi veya bir başka üniversitede, bir başka tez çalışması olarak sunmadığımı; beyan ederim.

29.07.2025

Semih BAYDOĞAN

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans öğrenimim süresince değerli bilgi ve tecrübeleriyle bana her zaman yol gösteren, akademik gelişimime önemli katkılar sunan kıymetli danışmanım Prof. Dr. Fuat ÖZYONAR'a en içten teşekkürlerimi sunarım.

Mesleki donanımımı artırmamda ve çevre mühendisliği alanında yetkin bir mühendis olarak yetişmemde büyük emekleri olan Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Çevre Mühendisliği Bölümü'nün saygıdeğer akademik kadrosuna şükranlarımı sunarım.

Tez çalışmam kapsamında ihtiyaç duyduğum verilerin temininde desteklerini esirgemeyen MASKİ Genel Müdürü Sayın Sinan ÇEÇEN'e, Arıtma Tesisleri Dairesi Başkanı Sayın Faik Dinçer ERKAN'a, Laboratuvar Şube Müdürü Sayın Habibe ÖZBEN'e ve Laboratuvar Şube Müdürlüğü Teknik Personeli Orhan KARADUMAN'a katkılarından dolayı teşekkür ederim.

Akademik ve kişisel anlamda her zaman yanımda olan, Bingöl Üniversitesi Öğretim Üyesi Ahmet SAATÇI'ya destekleri için müteşekkirim.

Ayrıca, bu süreçte sabırları, anlayışları ve manevi destekleriyle her zaman yanımda olan sevgili eşime ve aileme gönülden teşekkür ederim.

ÖZET

MALATYA İLİ İÇME SULARINDAKİ AĞIR METAL DÜZEYLERİNİN İNCELENMESİ

Semih BAYDOĞAN

Yüksek Lisans Tezi

Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Fuat ÖZYONAR

2025, 88+xviii sayfa

Bu tez çalışmasında, Malatya ili Yeşilyurt Merkez ve Battalgazi ilçelerine bağlı mahallelerdeki içme suyu kaynakları, ağır metal düzeyleri bakımından değerlendirilmiştir. Alüminyum (Al), antimon (Sb), arsenik (As), bakır (Cu), baryum (Ba), berilyum (Be), bor (B), çinko (Zn), demir (Fe), kadmiyum (Cd), kurşun (Pb), krom (Cr), mangan (Mn), nikel (Ni) ve vanadyum (V) olmak üzere toplam 15 farklı metalin konsantrasyonları analiz edilmiştir. Bu kapsamda, Malatya'nın 12 mahallesinden TS ISO 5667-11 standardına uygun olarak 62 adet içme suyu numunesi Ekim 2024- Mart 2025 tarihleri arasında toplanmış ve ICP-MS cihazı ile analiz edilmiştir.

Analiz sonuçları, elde edilen ağır metal düzeylerinin Türkiye İnsani Tüketim Amaçlı Sular Hakkında Yönetmelik (TS 266), Dünya Sağlık Örgütü (WHO), Avrupa Birliği (EC) ve Birleşik Devletler Çevre Koruma Ajansı (EPA) standartları ile karşılaştırılmasını mümkün kılmıştır. Yeşilyurt ilçesinde alınan örneklerin ağır metal açısından risk oluşturmadığı belirlenmiştir. Ancak Battalgazi ilçesine bağlı Gülümuşığı, Hisartepe, Meydancık, Şişman ve Uluköy mahallelerinde arsenik ve bor düzeylerinin sınır değerlerin üzerinde olduğu saptanmıştır. Özellikle Şişman Mahallesi'nde ölçülen arsenik konsantrasyonu (96,53 µg/L), insan sağlığı açısından yüksek risk barındırmakta ve hem yetişkinler (HQ = 9,200) hem de çocuklar (HQ = 21,333) için güvenli kabul edilen eşiğin üzerindedir.

Bor düzeyleri açısından yapılan risk değerlendirmesi sonucunda en yüksek konsantrasyonun Ekim ayında Gülümuşığı Mahallesi'nde (1,886 mg/L) olduğu belirlenmiş; ancak bu değerin oluşturduğu sağlık riski, hem yetişkinler (HQ = 0,269) hem de çocuklar (HQ = 0,629) için kabul edilebilir sınırlar içinde kalmıştır. Elde edilen veriler, sadece mevcut çevresel durumu ortaya koymakla kalmayıp aynı zamanda içme suyu kaynaklarının sürdürülebilir yönetimine yönelik stratejik kararların geliştirilmesine de katkı sunmaktadır. Bu tez, çevre mühendisliği, toksikoloji

ve halk sağlığı alanlarına sayısal verilerle destek sağlamakta ve içme suyundaki ağır metal kaynaklı sağlık risklerinin bilimsel temellerle değerlendirilmesine olanak tanımaktadır.

Anahtar kelimeler: Ağır metaller, Su kalitesi, Sağlık risk değerlendirmesi, İçme suları, TS266, Toksikoloji



ABSTRACT

INVESTIGATION OF HEAVY METAL LEVELS IN DRINKING WATER OF MALATYA PROVINCE

Semih BAYDOĞAN

Master of Science Thesis

Department of Environmental Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Fuat ÖZYONAR

2025, 88+xviii pages

In this thesis, drinking water sources in the neighbourhoods of Yeşilyurt and Battalgazi districts of Malatya province were evaluated in terms of heavy metal levels. The concentrations of 15 different metals including aluminium (Al), antimony (Sb), arsenic (As), copper (Cu), barium (Ba), beryllium (Be), boron (B), zinc (Zn), iron (Fe), cadmium (Cd), lead (Pb), chromium (Cr), manganese (Mn), nickel (Ni) and vanadium (V) were analysed. In this context, 62 drinking water samples were collected from 12 neighbourhoods of Malatya between October 2024 and March 2025 in accordance with TS ISO 5667-11 standard and analysed by ICP-MS device.

The results of the analyses made it possible to compare the heavy metal levels with the Turkish Regulation on Water Intended for Human Consumption (TS 266), World Health Organisation (WHO), European Union (EC) and United States Environmental Protection Agency (EPA) standards. It was determined that the samples taken in Yeşilyurt district did not pose a risk in terms of heavy metals. However, arsenic and boron levels in Gülümuşığı, Hisartepe, Meydancık, Şişman and Uluköy neighbourhoods of Battalgazi district were found to be above the limit values. In particular, the arsenic concentration measured in Şişman Neighbourhood (96.53 µg/L) poses a high risk to human health and is well above the threshold considered safe for both yetişkins (HQ = 9,200) and çocukren (HQ = 21,333).

As a result of the risk assessment in terms of boron levels, the highest concentration was determined to be in Gülümuşığı Neighbourhood in October (1.886 mg/L); however, the health risk posed by this value remained within acceptable limits for both yetişkins (HQ = 0.269) and çocukren (HQ = 0.629). The data obtained not only reveal the current environmental situation, but also contribute to the development of strategic decisions for the sustainable management of

drinking water resources. This thesis provides support to the fields of environmental engineering, toxicology and public health with quantitative data and enables the evaluation of heavy metal-induced health risks in drinking water on a scientific basis.

Key Words: Heavy metals, Water quality, Health risk assessment, Drinking water, TS266, Toxicology.



İÇİNDEKİLER

1. GİRİŞ	17
1.1. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı	19
1.2. Çalışmanın Önemi	20
2. AĞIR METAL KİRLİLİĞİ.....	22
2.1. Ağır Metallerin Kaynakları	23
2.1.1. Endüstriyel Tesisler.....	24
2.1.2. Tarımsal Alanlar.....	25
2.1.3. Maden İşletmeleri.....	26
2.1.4. Yakma Tesisleri.....	27
2.2. Ağır Metallerin Çevresel Önemi	28
2.3. Ağır Metallerin Sağlığa Etkileri	29
2.4. Ağır Metallerin Özellikleri	30
2.4.1. Alüminyum (Al).....	30
2.4.2. Arsenik (As).....	31
2.4.3. Bor (B).....	32
2.4.4. Bakır (Cu).....	33
2.4.5. Çinko (Zn).....	34
2.4.6. Demir (Fe).....	35
2.4.7. Kadmiyum (Cd).....	36
2.4.8. Krom (Cr).....	38
2.4.9. Kurşun (Pb)	39
2.4.10. Mangan (Mn).....	41
2.4.11. Nikel (Ni).....	42
2.4.12. Vanadyum.....	43
3. ÇALIŞMA ALANINA AİT BİLGİLER.....	45
3.1. Çalışma Alanının Coğrafi Konumu	45
3.2. İklim ve Hava Şartları.....	45
3.3. İçme Suyu Kaynakları İle İlgili Mevcut Durum.....	46
3.4. Nüfus Dağılımı ve Su İhtiyacı	47
4. MATERYAL VE METOD.....	48
4.1. Numunelerin Toplanması	49
4.2. Yöntem	51
4.2.1. İndüktif Olarak Birleştirilmiş Plazma Kütle Spektrofotometresi (ICP-MS).....	51
4.2.2. Uygulama Alanları.....	52

4.2.3 Kullanılan Reaktifler Ve Standartların Hazırlanışı.....	53
4.2.4 Kalibrasyon Eğrileri	55
4.3. Sağlık Risk Değerlendirmesi	57
5. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	60
6. SONUÇ.....	77
KAYNAKLAR.....	79



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2. 1 Ağır metallerin doğaya yayılımları [36].	24
Şekil 3. 1 Çalışma alanı.	45
Şekil 4. 1 Numune alınan sondaj ve numune kabı	50
Şekil 4. 2 Numune alınan kaynakların konumu	50
Şekil 4. 3 İndüktif Olarak Birleştirilmiş Plazma Kütle Spektrofotometresi (ICP-MS) Cihazı	52
Şekil 4. 4 a) Alüminyum kalibrasyon eğrisi b) Antimon kalibrasyon eğrisi c) Arsenik kalibrasyon eğrisi d) Bakır kalibrasyon eğrisi.	55
Şekil 4. 5 a) Baryum kalibrasyon eğrisi b) Berilyum kalibrasyon eğrisi c) Bor kalibrasyon eğrisi d) Çinko kalibrasyon eğrisi	56
Şekil 4. 6 a) Demir kalibrasyon eğrisi b) Kadmiyum kalibrasyon eğrisi c) Kurşun kalibrasyon eğrisi d) Krom kalibrasyon eğrisi.	56
Şekil 4. 7 a) Manganez kalibrasyon eğrisi b) Nikel kalibrasyon eğrisi c) Vanadyum kalibrasyon eğrisi	57
Şekil 4. 8 Mahalle Bazlı Arsenik Tematik Haritası	70
Şekil 4. 9 Mahalle Bazlı Bor Tematik Haritası	71

TABLÖLER DİZİNİ

Tablo 2. 1 İnsan tarafından besin, su ve hava ile alınan metaller [32].	23
Tablo 2. 2 Metal çeşitleri [45].	28
Tablo 4. 1 İçme suyu numunelerinin toplama bilgileri	48
Tablo 4. 2 Gözlenebilirlik sınırı (LOD) ve ölçme sınırı (LOQ) değerleri ($\mu\text{g/L}$).	55
Tablo 5. 1 Ekim Ayı Ağır Metal değerleri ($\mu\text{g/L}$).	66
Tablo 5. 2 Kasım Ayı Ağır Metal değerleri ($\mu\text{g/L}$).	66
Tablo 5. 3 Aralık Ayı Ağır Metal değerleri ($\mu\text{g/L}$).	67
Tablo 5. 4 Ocak Ayı Ağır Metal değerleri ($\mu\text{g/L}$).	68
Tablo 5. 5 Şubat Ayı Ağır Metal değerleri ($\mu\text{g/L}$).	68
Tablo 5. 6 Mart Ayı Ağır Metal değerleri ($\mu\text{g/L}$).	69
Tablo 5. 7 Ulusal ve uluslararası standart, limit ve klavuz değerlerle karşılaştırma (mg/L)...	70
Tablo 5. 8 Arsenik ve bor için kabul edilebilir sınır değerler.	72
Tablo 5. 9 Sağlık risk değerlendirmesi sonucu hesaplanan EDI, HQ, HI ve CR değerleri	74
Tablo 5. 10 Arsenik kanser riski (CR).....	75
Tablo 5. 11 Arsenik kanserojen olmayan risk (HQ).....	75
Tablo 5. 12 Bor kanserojen olmayan risk (HQ)	76

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

µg	: Mikrogram
AB	: Avrupa Birliği
Ag	: Gümüş
Al	: Alüminyum
Am	: Americium
As	: Arsenik
Au	: Altın
B	: Bor
Ba	: Baryum
Be	: Berilyum
Bi	: Bismuth
BOİS	: Biyolojik Oksijen İhtiyacı
Cd	: Kadmiyum
Co	: Kobalt
Cr	: Krom
Cu	: Bakır
°C	: Santigrat derece
EC	: Europe Commission (Avrupa Konseyi)
Fe	: Demir
g	: Gram
Ge	: Germanium
Hg	: Civa
HCl	: Hidroklorik asit
HNO3	: Nitrik asit
ICP-MS	: Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometer (İndüktif Olarak Birleştirilmiş Plazma Kütle Spektrofotometresi)
ISO	: Uluslararası Standardizasyon Örgütü
İTASHY	: İnsani Tüketim Amaçlı Sular Hakkında Yönetmelik
İn	: İndium
kg	: Kilogram
L	: Litre
Li	: Lithium
MASKİ	: Malatya Su ve Kanalizasyon İdaresi
mg	: Miligram
ml	: Mililitre
Mn	: Mangan
m3	: Metreküp
Na	: Sodyum
Ni	: Nikel
Pb	: Kurşun
Pd	: Paladyum
pH	: Power of hydrogen (Hidrojen kontrasyon miktarı)
Pt	: Platin
ppb	: Parts per billion (Milyarda bir kısım)
ppm	: Parts per million (Milyonda bir kısım)
Ra	: Radyum
Ru	: Rutenyum
Sb	: Antimon

Sc	: Scandium
Sn	: Kalay
Tb	: Terbium
Th	: Taryum
TS	: Türk Standardı
TSE	: Türk Standardı Enstitüsü
U	: Uranyum
USEPA	: US Environment Protection Agency (Birleşik Devletler Çevre Koruma Ajansı)
Y	: Yttrium
V	: Vanadyum
WHO	: Dünya Sağlık Örgütü
Zn	: Çinko



1. GİRİŞ

Günümüz itibarıyla dünya genelinde insan nüfusu 8 milyar seviyesini aşmış durumdadır ve mevcut demografik eğilimler dikkate alındığında, önümüzdeki yüzyıl içerisinde bu sayının üç milyara kadar artabileceği öngörülmektedir [1–3]. Bu büyüme trendi su, gıda ve enerji gibi temel yaşam kaynaklarına olan talebi ciddi ölçüde artırmaktadır. Ancak bu artan taleplere karşılık, yeryüzündeki doğal kaynakların miktar ve erişilebilirlik bakımından sınırlı olması, kaynakların etkin kullanımı ve sürdürülebilir yönetimi konularını zorunlu hale getirmiştir. Artan nüfusun yol açtığı baskı yalnızca kaynak tüketimini artırmakla kalmayıp, aynı zamanda çevresel kirliliği de tetiklemekte; özellikle su ve gıda kaynakları kirlenme riskiyle karşı karşıya kalmaktadır. Bu nedenle doğal kaynakların korunması, çevresel risklerin önlenmesi ve sürdürülebilir kalkınma ilkeleri doğrultusunda yönetim stratejilerinin oluşturulması, günümüzün öncelikli çevresel hedefleri arasında yer almaktadır [4].

Su, dünya üzerindeki tüm canlılar için temel yaşamsal öneme sahip, renksiz, kokusuz ve tatsız bir bileşiktir. Canlı organizmaların metabolik işlevlerinin sürdürülebilmesi, hücresel işleyişin devamı ve biyokimyasal denge için suyun sürekli olarak temin edilmesi gereklidir [5] [6]. Canlı hücrelerin büyük bir bölümünün su içerdiği, suyun metabolik faaliyetlerin neredeyse tamamında rol oynadığı bilinmektedir. Su, besinlerin emilimi, atık maddelerin uzaklaştırılması, vücut sıcaklığının düzenlenmesi gibi temel işlevlerde kritik öneme sahiptir. Bu bağlamda, kanda %83, beyin ve kas dokusunda %75, kemiklerde ise %22 oranında su bulunduğu rapor edilmiştir. Böbrek fonksiyonlarının sağlıklı yürütülmesi, toksinlerin atılması ve sinir sisteminin düzenli çalışması için yeterli su tüketimi elzemdir [7]. Suyun yetersizliği; dikkat eksikliği, yorgunluk, karar verme bozuklukları ve fiziksel performansta düşüş gibi birçok fizyolojik probleme yol açabilmektedir [8].

Tarih boyunca ilk yerleşim alanlarının su kaynaklarının çevresinde şekillenmiş olması, suyun insanlık tarihi üzerindeki belirleyici etkisini açıkça göstermektedir [9]. Yerkürenin yaklaşık %70'i su ile kaplı olmasına rağmen, bu suyun yalnızca %2,5'i tatlı su kaynaklarını oluşturmaktadır [10]. Bu sınırlı miktarın ise büyük bir kısmı buzullarda ve kalıcı kar örtüsü içinde depolanmış durumdadır. İnsani kullanım açısından erişilebilir olan tatlı su oranı ise %0,05 gibi oldukça düşük bir seviyededir. Günümüzde yaklaşık 1,2 milyar insan güvenilir içme suyuna ulaşamamakta, 1,6 milyar kişi ise altyapı eksiklikleri nedeniyle temiz su kaynaklarına erişimde sıkıntı yaşamaktadır [11]. Toplamda $1,26 \times 10^{21}$ litre su rezervine sahip olan dünyada, içilebilir tatlı su oranı yalnızca $3,19 \times 10^{19}$ litre ile sınırlıdır [12]. Bu gerçeklik, su yönetimi

politikalarının bilimsel esaslara dayanması ve kaynakların sürdürülebilir kullanımının sağlanması gerekliliğini ortaya koymaktadır [13]. Nüfus artışı, kentleşme ve iklim değişikliği gibi etkenlerle birlikte kaliteli içme suyuna erişim hem bireysel sağlık hem de toplum refahı açısından temel bir mesele hâline gelmiştir [14, 15].

Artan nüfus ve hızlı kentleşme, su talebini hızlı bir şekilde artırmakta, bu da göl ve nehirlerin daha yoğun şekilde içme suyu kaynağı olarak kullanılmasına neden olmaktadır [16]. Ancak, bu doğal su kütleleri giderek artan oranda kirlenmekte ve su kaynakları ciddi tehdit altına girmektedir. Kirletici unsurlar arasında özellikle bakteriler, kimyasal kalıntılar ve ağır metaller dikkat çekmektedir [17]. Kuraklık ve kirlilik birlikte değerlendirildiğinde, su kaynaklarının korunmasının yalnızca çevresel değil aynı zamanda halk sağlığı açısından da bir öncelik olduğu görülmektedir [18].

Son yıllarda sanayileşme, kentleşme ve tarımsal faaliyetlerin artmasıyla birlikte, su kaynaklarında gözlemlenen kirlenme, insan ve çevre sağlığı açısından ciddi tehditler oluşturmaktadır. İçme suyunun kalitesini tehdit eden en önemli kirleticilerden biri ağır metallerdir. Ağır metaller, çözünmüş halde suya geçerek insanlar dahil tüm ekosistem bileşenlerinde biyoakümülyasyona neden olmaktadır [14]. Kobalt (Co), krom (Cr), çinko (Zn) gibi elementler insan sağlığı için gerekli olmasına karşın; arsenik, kadmiyum (Cd), cıva (Hg) ve kurşun (Pb) gibi elementler organizma üzerinde ciddi zararlı etkiler yaratabilmektedir [19,20]. Arsenik (As), bu metaller arasında özellikle toksik etkileri ve yaygınlığı ile öne çıkmaktadır. Arsenik, yüksek toksisitesi ve biyoyararlanımı nedeniyle Dünya Sağlık Örgütü (WHO), Uluslararası Kanser Araştırmaları Ajansı (IARC) ve Amerika Birleşik Devletleri Çevre Koruma Ajansı (USEPA) gibi kuruluşlar tarafından öncelikli kirleticiler arasında sınıflandırılmıştır [24,25]. IARC tarafından Grup 1 kanserojen olarak tanımlanan arsenik, içme suyu aracılığıyla insan vücuduna alınarak solunum, kardiyovasküler ve sinir sistemi üzerinde geri dönüşümsüz hasarlara neden olabilmektedir [23].

Dünya Sağlık Örgütü (WHO) ve Türkiye’de geçerli olan TS 266 standardına göre arsenik (As), kurşun (Pb), cıva (Hg), kadmiyum (Cd) gibi ağır metallerin içme sularındaki konsantrasyonları belirli sınırların üzerine çıktığında toksik etkiler göstermektedir [24]. Ağır metaller doğada yok edilemeyen, biyobirikim ve biyobüyüme özellikleri nedeniyle canlılarda sinir sistemi bozuklukları, karaciğer ve böbrek hasarları, bağışıklık sistemi baskılanması ve kanser gibi ciddi hastalıklara yol açmaktadır [25]. Özellikle çocuklar ve gebeler gibi hassas gruplar, düşük konsantrasyonlardaki ağır metal maruziyetine dahi daha duyarlıdır [14]. İçme sularında ağır

metal kirliliğinin kaynağı sadece endüstriyel deşarjlarla sınırlı olmayıp, tarımda kullanılan pestisit ve gübrelerin yüzey akışıyla yeraltı sularına taşınması, eski boru hatları, kanalizasyon sızıntıları ve jeolojik yapı da bu duruma katkıda bulunmaktadır [26].

Arsenik, doğal jeokimyasal süreçler kadar, insan kaynaklı etkinlikler sonucu da su kaynaklarına karışabilmektedir. Özellikle madencilik faaliyetleri, tarımsal ilaçlar, fosil yakıtlar ve ahşap koruyucular arsenik salınımının önemli antropojenik kaynaklarıdır [19, 20]. Suda çözünmüş arsenik hem inorganik hem de organik türlerde bulunmakta olup, bu türlerin toksisite düzeyleri önemli farklılıklar göstermektedir. En toksik form arsenittir (As^{3+}) ve arsenata (As^{5+}) kıyasla altı kat daha zararlıdır [21]. Bu nedenle, içme suyundaki arsenik miktarının yanı sıra, arsenik türlerinin de belirlenmesi sağlık risk değerlendirmesi açısından kritik önemdedir. Arsenik için belirlenen sınır değeri, birçok ülkede 50 $\mu g/L$ 'den 10 $\mu g/L$ 'ye indirilmiştir [22]. Türkiye'de de bu sınır 10 $\mu g/L$ olarak belirlenmiş olup, bu düzenleme arsenik kontaminasyonunun önemini daha da artırmaktadır.

Sonuç olarak, içme sularında arsenik varlığının ve türlerinin belirlenmesi, bu elementin insan sağlığı üzerindeki potansiyel risklerinin değerlendirilmesi açısından zorunludur. Risk analizleri, yaşam boyu kanser riski ve tehlike indeksi hesaplamalarıyla desteklenmekte, böylece maruziyetin halk sağlığı üzerindeki etkileri bilimsel olarak ortaya konulmaktadır [23].

1.1.Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

Bu çalışmanın temel amacı, Malatya ili sınırları içerisinde yer alan içme suyu kaynaklarında çeşitli ağır metallerin (Alüminyum (Al), Antimon (Sb), Arsenik (As), Bakır (Cu), Baryum (Ba), Berilyum (Be), Bor (B), Çinko (Zn), Demir (Fe), Kadmiyum (Cd), Kurşun (Pb), Krom (Cr), Mangan (Mn), Nikel (Ni), Vanadyum (V)) düzeylerini belirlemek ve bu değerlerin ulusal ve uluslararası içme suyu kalite standartlarına (İTASHY, EPA, EC ve WHO) uygunluğunu değerlendirmektir.

Ağır metaller; doğal jeolojik yapılarla ilişkili olarak yeraltı sularında bulunabilen ve aynı zamanda sanayi, tarım, madencilik ve kentsel faaliyetler sonucu su ortamına karışabilen toksik elementlerdir. Bu elementler, canlı organizmalarda akut veya kronik toksisiteye neden olabilecek özellikleri nedeniyle, içme sularında belirli eşik değerlerin aşılması durumunda ciddi halk sağlığı sorunlarına yol açabilmektedir [25, 26].

Bu kapsamda çalışma;

- (i) Malatya ili genelinde farklı lokasyonlardan temin edilen içme suyu örneklerinde ağır metal konsantrasyonlarının analiz edilmesini,
- (ii) Elde edilen değerlerin, Türkiye İnsani Tüketim Amaçlı Sular Hakkında Yönetmelik, Dünya Sağlık Örgütü (WHO), EPA ve Avrupa Birliği tarafından belirlenmiş olan sınır değerlerle karşılaştırılmasını,
- (iii) Tespit edilen ağır metal düzeylerinin potansiyel sağlık riskleri açısından bilimsel olarak değerlendirilmesini,
- (iv) İçme suyu kaynaklarındaki kirlilik düzeylerinin haritalandırılması ve çevresel izleme stratejileri için veri temini sağlanmasını hedeflemektedir.

Araştırma hem mevcut çevresel durumun tespiti hem de içme suyu kalitesinin izlenmesine yönelik sürdürülebilir stratejilerin geliştirilmesi açısından bilimsel bir zemin oluşturmayı amaçlamaktadır. Bu yönüyle çalışma hem çevre mühendisliği hem de halk sağlığı disiplinlerine katkı sunacak nitelikte olup, bölgesel düzeyde yürütülecek benzer analizler için referans olabilecek veriler sunmaktadır.

1.2.Çalışmanın Önemi

Tatlı su kaynakları, sınırlı miktarda olmaları ve giderek artan kirlenme riskine maruz kalmaları nedeniyle günümüzde stratejik öneme sahip doğal kaynaklar arasında yer almaktadır. Özellikle içme suyu kalitesi, toplum sağlığını doğrudan etkileyen çevresel bir faktör olup, bu suların kimyasal, mikrobiyolojik ve fiziksel özelliklerinin düzenli olarak izlenmesi büyük bir gereklilik arz etmektedir [26].

İçme suyu sistemlerine karışma potansiyeline sahip olan ağır metaller, arsenik (As), kurşun (Pb), kadmiyum (Cd), krom (Cr), nikel (Ni), bakır (Cu), mangan (Mn), demir (Fe), çinko (Zn), vb. toksik etkileri, biyobirikim özellikleri ve canlı organizmalarda kalıcı hasarlar bırakma riskleri nedeniyle çevresel analizlerde öncelikli izleme parametreleri arasında değerlendirilmektedir [25]. Bu metallerin içme suyu yoluyla vücuda alınması, özellikle uzun süreli maruziyetlerde nörolojik bozukluklardan kansere kadar pek çok kronik sağlık sorununa neden olabilmektedir [14]. Bu çerçevede, Malatya ilinde yürütülecek ağır metal analizleri, yalnızca mevcut konsantrasyonların ölçülmesiyle sınırlı kalmayıp, bu değerlerin çevresel ve halk sağlığı açısından taşıdığı potansiyel risklerin bilimsel olarak değerlendirilmesini de gerekli kılmaktadır. Malatya'nın jeolojik yapısı, özellikle arsenik gibi bazı elementlerin doğal kaynaklardan suya geçişini kolaylaştıran özellikler göstermektedir. Aynı zamanda bölgedeki yoğun tarımsal faaliyetler, pestisit ve gübre kullanımı gibi uygulamalar su kaynakları üzerinde

ilave bir kirletici baskı oluşturmaktadır. Kentleşme, endüstriyel faaliyetler ve atık yönetimindeki eksiklikler de dikkate alındığında, içme suyu kaynaklarında ağır metal maruziyetine ilişkin kapsamlı bir değerlendirme yapılması kaçınılmaz hale gelmektedir. Bu bağlamda, gerçekleştirilen analizler ve karşılaştırmalar; bölgesel su güvenliği politikalarının geliştirilmesine, çevresel izleme stratejilerinin güncellenmesine ve kamu sağlığının korunmasına yönelik somut katkılar sağlayacaktır.

Malatya ili, hem jeolojik yapısı hem de tarımsal faaliyetlerin yoğunluğu bakımından potansiyel ağır metal kaynaklarına yakınlığı ile dikkat çekmektedir. Bu çalışma, bölgedeki içme suyu kaynaklarında arsenik varlığını belirleyerek, bölgesel halk sağlığına yönelik olası riskleri ortaya koymayı hedeflemektedir. Aynı zamanda, analiz edilen arsenik düzeylerinin ulusal (T.C. Sağlık Bakanlığı) ve uluslararası (WHO, EPA, EC) içme suyu standartlarıyla karşılaştırılması, su güvenliği açısından kritik bir değerlendirme imkânı sunmaktadır.

Bu kapsamda, çalışma yalnızca mevcut durumu ortaya koymakla kalmayıp, aynı zamanda içme suyu izleme politikalarının güncellenmesine, çevresel risk yönetimi planlarının oluşturulmasına ve yerel yönetimlerin su yönetim stratejilerine veri temelli katkı sağlamaktadır. Ayrıca, bölgesel düzeyde yapılacak sağlık risk değerlendirmelerine bilimsel zemin hazırlayarak, Malatya özelinde ama genellenebilir nitelikte bir çevresel farkındalık yaratmayı amaçlamaktadır.

2. AĞIR METAL KİRLİLİĞİ

Metaller, yüksek elektriksel iletkenlik, karakteristik parlaklık ve mekanik dayanıklılık gibi özelliklere sahip olan, aynı tür atomların oluşturduğu kimyasal elementlerdir. Bu elementler, basınç altında kırılmadan şekil değiştirebilme özellikleri nedeniyle endüstride geniş bir kullanım alanı bulmaktadır. Periyodik tabloda çoğunlukla geçiş metalleri grubunda yer alan ve atom numarası 20'nin üzerinde olan metaller "ağır metal" olarak tanımlanmakta olup bu grupta yer alan Ag, Cd, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb ve Zn gibi elementler yüksek yoğunlukları ($> 5 \text{ g/cm}^3$) nedeniyle bu sınıfa dâhil edilmektedir [38,39]. Kimyasal yönden değerlendirildiğinde ise ağır metaller; pozitif yüklü iyonlar oluşturabilen, asitlerdeki H^+ iyonları ile yer değiştirebilen, ametallerle bileşik yapabilen ancak kendi aralarında bileşik oluşturamayan, oksitleri bazik karakterde olan metallerdir [29].

Fiziksel özellikleri bakımından da ağır metaller, çoğunlukla oda sıcaklığında katı halde bulunmakta, ısı ve elektriği iletme kapasiteleri yüksek olup, tel ya da levha haline getirilebilmekte ve metalik parlaklık sergilemektedir [29]. Bu metaller doğada, özellikle yer kabuğunda doğal olarak mevcut olup, kimyasal olarak bozunamaz ve yok edilemezler. İnsan organizmasına içme suyu, solunan hava ve gıda maddeleri aracılığıyla giriş sağlayan ağır metallerin bazıları (örneğin Cu, Se ve Zn), eser elementler olarak metabolik faaliyetlerin sürdürülebilmesi için gereklidir. Bununla birlikte, yüksek konsantrasyonlarda bu elementlerin toksik etkiler göstererek ciddi sağlık sorunlarına ve biyobirikim yoluyla uzun vadeli zehirlenmelere yol açtığı bilinmektedir [30].

Ağır metal kirliliği çevresel kaynaklardan veya insan faaliyetlerinden kaynaklanabilmekte; özellikle endüstriyel üretim süreçleri, evsel atıklar, tarımsal faaliyetlerde kullanılan pestisitler ve atık su deşarjları bu kirleticilerin temel kaynaklarını oluşturmaktadır. Al, Pb, Cd, Ni, Cu, Hg, As, Cr, Co, Mn ve Zn gibi toksik metaller, endüstri ve evsel atık sular aracılığıyla sucul ortamlara geçmekte olup, bunlar arasında Hg, Cd, Bi, Sb ve Pb elementleri toksikolojik açıdan daha yüksek risk taşımaktadır. Bunun yanı sıra, Na, K, Ca, Mg ve Fe gibi metaller de topraktan suya geçerek kirlilik yaratabilmektedir [31].

Ağır metallerin sucul ortamlarda birikimi, çözünerek ya da partikül halde suyun tabanında birikme şeklinde gerçekleşebilmekte; nehir, yağmur, kar ve yüzey akış suları aracılığıyla deniz, göl, baraj gibi yeryüzü sularına taşınmakta ve hatta toprak geçirimsizliği yoluyla yeraltı sularına ulaşabilmektedir. Bu durum, özellikle içme suyu kaynaklarının kirlenmesine neden olmakta ve

halk sağlığı açısından risk oluşturmaktadır [26]. Tablo 2.1’de bu metallere ilişkin yoğunluk, ortalama günlük miktar, toksik doz, vct içi normal seviye ve yarılanma ömrü gibi bilgiler ayrıntılı şekilde sunulmuştur [32].

Tablo 2. 1 İnsan tarafından besin, su ve hava ile alınan metaller [32].

Metal	Ort. günlük alınan miktar (mg)		Zehirleyici miktar (mg)	Vcttaki normal miktar (mg)	Yarılanma mr (gün)
	Besin ve Su	Hava			
Antimon	0.100	0.0017	100	7.9	38
Bakır	1.325	0.0014	250–500	72.0	80
Baryum	0.735	0.0030	200	22	65
Berilyum	0.012	-	0.008	0.03	60
Bizmut	0.020	-	-	0.03	5
Civa	0.025	-	-	20	70
Çinko	14.500	0.0160	-	2300	933
Demir	15.000	0.0120	-	4200	500
Gümüş	0.005	-	-	-	-
Kadmiyum	0.045	0.0004	200	50	75
Kalay	3.700	-	2000	500	10
Kobalt	0.009	-	-	1.5	9.5
Kurşun	0.300	0.0015	10–25	420	1460
Krom	0.245	0.0011	200	1.8	616
Mangan	0.440	0.0288	-	12	37
Molibden	0.335	-	-	9.5	5
Nikel	0.100	0.0008	-	13.2	667
Talyum	0.003	-	-	8	360
Uranyum	0.005	-	-	6	70
Vanadyum	0.010	-	-	0.5	54
Zirkonyum	0.490	-	-	420	50

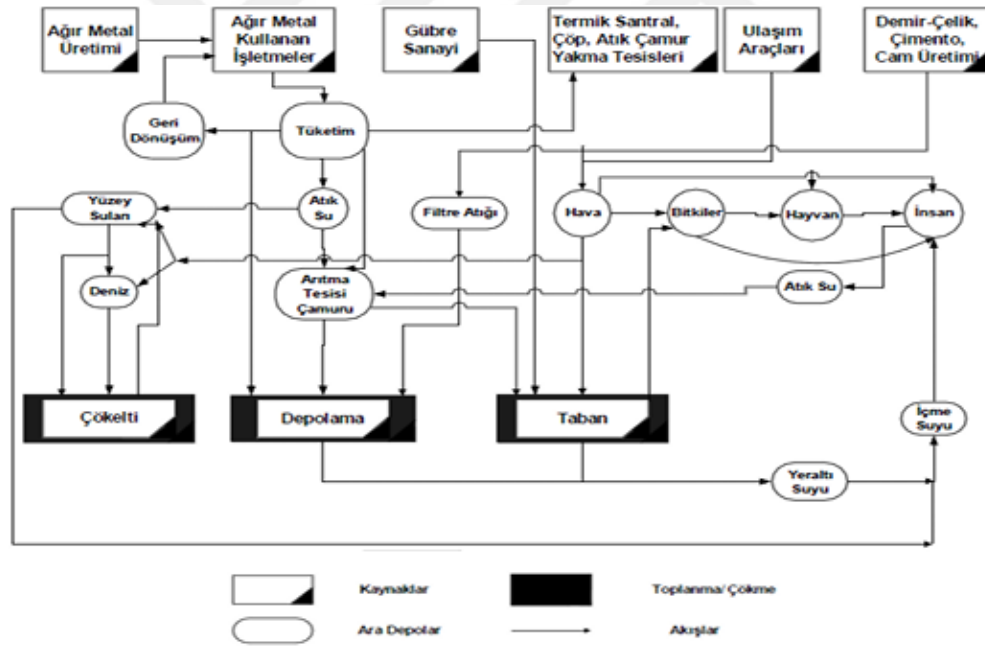
2.1. Ağır Metallerin Kaynakları

Metaller, yerkabuğunun yapısal bileşenlerinden biri olup, jeolojik süreçler sonucu farklı yoğunluklarda doğal çevrede yer alırlar. Biyosferde yaygın şekilde dağılmış olmaları, zaman içinde çevresel sistemlerde toksik etki oluşturabilecek düzeylerde birikimlerine neden olabilmektedir [33]. Özellikle son yüzyılda yaşanan hızlı nüfus artışı, kentleşmenin kontrolsüz ilerlemesi, enerji ve gıda tüketimindeki artış ve teknolojik faaliyetlerin ivme kazanmasıyla birlikte çevresel kirleticilerin yoğunluğu ciddi bir seviyeye ulaşmıştır [34]. Bu durum yalnızca insan sağlığını değil, aynı zamanda tarımsal ekosistemlerdeki bitki fizyolojisini de doğrudan etkilemekte, stres faktörü oluşturarak verim düşüklüğüne ve hatta bitki ölümüne neden olabilmektedir [35].

Ağır metallerin çevreye taşınmasında hem doğal hem de insan kaynaklı (antropojenik) etkenler rol oynamaktadır. Doğal süreçler arasında volkanik patlamalar, kaya ve toprak erozyonu,

jeolojik aşınmalar, topraktan ve sudan metal buharlaşması ve sedimentlerin yeniden süspansiyona geçmesi sayılabilir. Ancak çevre kirliliğine esas katkısı, metal madenciliği, cevher zenginleştirme, eritme ve döküm işlemleri gibi metal işleme endüstrileri sağlamaktadır. Bunun yanı sıra, sanayi tesisleri, yakma sistemleri, çöplükler, atık depolama sahaları, tarımsal alanlar, hayvancılık faaliyetleri, kanalizasyon deşarjları, ulaşım ve yol çalışmaları da ağır metal salımına katkıda bulunan önemli antropojenik kaynaklar arasında yer almaktadır. Tarım sektörü özelinde değerlendirildiğinde; pestisitler, insektisitler ve kimyasal gübreler gibi tarımsal girdiler ağır metal içeriği taşıyabilmekte ve bu yolla toprak ve yeraltı suyu sistemlerine geçebilmektedir. Bu durum uzun vadede hem çevresel hem de halk sağlığı açısından önemli bir risk unsuru teşkil etmektedir [27].

Sonuç olarak, ağır metal kirliliği çoklu kaynaklardan kaynaklanan karmaşık bir çevresel problemdir. Şekil 2.1’de, ağır metallerin endüstri, tarım, ulaşım ve evsel kaynaklardan doğrudan veya dolaylı yollarla doğaya nasıl taşındığı şematik biçimde gösterilmektedir [36].



Şekil 2. 1 Ağır metallerin doğaya yayılımları [36].

2.1.1. Endüstriyel Tesisler

Metaller, doğada yer kabuğunda doğal olarak bulunan elementler arasında yer almakta olup, bu nedenle çevresel ortamlarda varlıkları yaygındır. Ancak bu elementlerin sucul sistemlerde birikimi yalnızca doğal süreçlerle sınırlı kalmamakta, aynı zamanda insan kaynaklı faaliyetlerin

etkisiyle de su ortamlarına karışabilmektedir. Sanayi faaliyetlerinde yaygın olarak kullanılan birçok ağır metal, işlem sonrası atık formunda çevreye bırakılmakta ve bu durum, özellikle endüstriyel bölgelerde önemli düzeyde kirlenmeye yol açmaktadır [37].

Endüstriyel üretim tesisleri; atık sular aracılığıyla cıva (Hg), çinko (Zn), kobalt (Co), bakır (Cu), demir (Fe), kurşun (Pb), krom (Cr), arsenik (As) ve gümüş (Ag) gibi toksik metallerin alıcı ortama taşınmasına neden olmakta, böylece sucul yaşam alanlarının kimyasal dengesini bozarak ekolojik riskleri artırmaktadır [34]. Bu kirleticiler, yeterli arıtma süreçlerinden geçmeden doğaya verildiğinde, suda yaşayan organizmalar tarafından emilmekte ve besin zinciri aracılığıyla daha üst trofik seviyelere taşınarak biyolojik sistemlerde birikmektedir [30].

Biyoakümülyasyon ve biyobirikim süreçleri yoluyla çevresel konsantrasyonları artan bu metaller, yalnızca suda yaşayan canlılar için değil, aynı zamanda bu ortamdan dolaylı olarak etkilenen kara canlıları ve insanlar için de uzun vadeli sağlık riskleri doğurmaktadır. Ağır metallerin yoğunlaştığı topraklarda yetişen bitkiler, toksik elementlere maruz kalarak büyüme ve gelişme süreçlerinde stres faktörleriyle karşılaşmakta; bu da verim düşüşüne ve biyolojik işlev kaybına neden olmaktadır. Bu nedenle, ağır metal ile kontamine olmuş toprakların rehabilitasyonu ve verimliliğinin artırılması amacıyla çeşitli biyolojik, kimyasal ve fiziksel ıslah tekniklerine dayalı çalışmalar giderek artmaktadır. Bu stratejiler, hem çevresel riskleri azaltmayı hem de tarımsal sürdürülebilirliği sağlamayı hedeflemektedir [38].

2.1.2. Tarımsal Alanlar

Tarımsal üretimde yaygın biçimde kullanılan kimyasal girdiler, temel olarak gübreler ve pestisitler olmak üzere iki ana kategoride sınıflandırılmaktadır. Bu kimyasalların içerdiği aktif bileşenlerde klor ve çeşitli metal elementlerinin yer alması, tarım alanlarının yakın çevresinde bulunan su kaynaklarında hem metal konsantrasyonlarının hem de elektriksel iletkenliğin yükselmesine neden olmaktadır. Özellikle endüstriyel olarak üretilen gübrelerin bileşiminde yer alabilen safsızlıklar ve organik bazlı kompost gübrelerin kullanımı sonucunda, krom (Cr), nikel (Ni) ve molibden (Mo) gibi elementlerin toprak sistemine dâhil olması ve buradan yüzey veya yeraltı sularına taşınması çevresel risk oluşturmaktadır [39].

Tarımda kullanılan kimyasallar yalnızca toprak sistemini değil, aynı zamanda sucul ortamları da doğrudan etkilemektedir. Özellikle suda çözünebilen bakır (Cu) bileşikleri, zirai mücadele uygulamaları sırasında doğaya karışarak akarsulara, göletlere ve yeraltı sularına

taşınabilmektedir. Ülkemizde yaygın olarak kullanılan bakır sülfat, fungusid, herbisid ve algisid özellikleri nedeniyle geniş bir kullanım alanı bulmakta ve bu da tarımsal kökenli metal kirliliğini artıran başlıca uygulamalardan biri olarak öne çıkmaktadır [40].

Zirai kimyasallar, yağmur suyu ve sulama akışı gibi yüzeysel taşıyıcı unsurlar yoluyla hızla alıcı su ortamlarına ulaşmakta ve bu ortamlarda birikime neden olmaktadır. Metaller, kimyasal ya da biyolojik yollarla kolayca parçalanamadıkları için çevrede uzun süre kalıcı özellik gösterirler; metal iyonlarının doğal ortamlardan tamamen uzaklaştırılması ise mümkün değildir. Bu nedenle tarımsal faaliyetler, hem toprakta hem de su kaynaklarında metal kirliliğinin başlıca kaynakları arasında değerlendirilmektedir [29].

2.1.3. Maden İşletmeleri

Madencilik, doğal kaynaklardan metal cevherlerinin çıkarılması ve işlenmesi sürecinde büyük hacimli kayaçların ve yan ürünlerin taşınmasını ve ayrıştırılmasını içeren karmaşık bir üretim sistemidir. Bu süreç boyunca cevherlerin metal kazanımı için fiziksel ve kimyasal işlemlere tabi tutulması, önemli miktarda atık oluşumuna neden olmakta; bu atıklar ise zamanla çevrede kirlletici etkiler yaratmaktadır. Metalik atıkların çoğu, çevresel koşulların (özellikle yağış ve oksijen) etkisiyle çözünür hale geçerek hem yüzeysel su kaynaklarına hem de yer altı sularına karışabilmektedir [41].

Aktif veya terk edilmiş maden alanlarında sülfürlü minerallerin çözünmesi, özellikle asidofilik mikroorganizmaların etkisiyle gerçekleşmekte ve son derece düşük pH değerine sahip, metal bakımından zengin asidik maden sularının oluşumuna yol açmaktadır. Bu tür asidik akışlar, nehir sistemlerinde ciddi kirlenmelere neden olmanın yanı sıra, asidik ortama duyarlı birçok canlı türünün yaşam döngüsünü de olumsuz etkilemektedir. Bu durum, sucul biyoçeşitlilik üzerinde uzun vadeli tahribatlara yol açmakta ve ekosistem direncini azaltmaktadır [42].

Endüstriyel yoğunluğun yüksek olduğu bölgelerde madencilikle ilişkili tortular (sedimentler), hem hacimsel büyüklükleri hem de içeriklerindeki ağır metal yükü nedeniyle ekosistem sağlığı ve insan güvenliği açısından ciddi tehdit oluşturmaktadır [42]. Özellikle bu tortuların tarımsal sulama sistemlerine karışması, gıda güvenliği açısından dikkatle izlenmesi gereken bir sorundur. Nitekim Japonya’da madencilik faaliyetlerinden kaynaklanan kadmiyum (Cd) kirliliği, pirinç üretiminde önemli kontaminasyonlara neden olmuş ve uzun süreli maruziyet

sonucu “İtai-itai” hastalığı olarak bilinen kadmiyum zehirlenmesi vakaları gözlenmiştir. Bu hastalık nedeniyle yaklaşık 35 yıl içerisinde 100’e yakın ölüm kaydedilmiştir [40].

Ayrıca, kurşun (Pb) madeni işletmeleri ve akümülatör sanayi çevresinde yetişen bitkilerde yapılan analizler, bu bitkilerin dokularında 3200 mg/kg düzeyine kadar kurşun birikimi olabileceğini ortaya koymuştur [43]. Bu bulgular, madencilik kaynaklı ağır metal kirliliğinin yalnızca sucul ekosistemler için değil, aynı zamanda tarım ve insan sağlığı açısından da kritik önemde olduğunu göstermektedir.

2.1.4. Yakma Tesisleri

Günümüzde evsel atıkların yönetimi büyük ölçüde düşük maliyetli sistemlerle sağlanabilirken, tıbbi ve endüstriyel atıklar gibi tehlikeli bileşenler içeren atıkların bertarafı hâlâ önemli bir çevresel sorun teşkil etmektedir. Artan sağlık hizmetleri talebi, teknolojik gelişmeler ve tıbbi altyapının büyümesiyle birlikte, özellikle tıbbi atık miktarlarında son yıllarda belirgin bir artış gözlenmiştir. Dünya Sağlık Örgütü’nün (WHO) yayımladığı veriler, tıbbi atık oluşum düzeylerinin ülkelerin gelişmişlik seviyesi, gelir dağılımı ve sağlık kuruluşlarının yapısal özelliklerine göre değişiklik gösterdiğini ortaya koymaktadır. Tıbbi atıkların yakılarak bertaraf edilmesi, organik kirleticilerin ve patojen mikroorganizmaların etkisizleştirilmesi açısından etkili bir yöntem olmakla birlikte, bu süreçte içerdikleri ağır metaller yok edilememekte, sadece atık hacmi azaltılmaktadır. Bu yakma işlemleri sonrasında oluşan kül, diğer tür kül kalıntılarına kıyasla düşük ağır metal konsantrasyonuna sahip olsa da, çevresel açıdan daha toksik özellikler gösterebilmektedir. Türkiye’de bu tür küllerin yaygın şekilde izlenip analiz edildiği kapsamlı çalışmaların sınırlı olması, ağır metal kirliliği açısından mevcut durumu tam olarak yansıtmamaktadır [44]. Bununla birlikte, enerji üretimi amacıyla fosil yakıtların yakılması da önemli düzeyde ağır metal emisyonuna neden olmakta ve atmosfere yayılan bu kirleticiler, çevresel kaliteyi olumsuz etkilemektedir. Topraktan alınan bu metallerin bitki dokularında birikmesi, transpirasyon, fotosentez, enzim aktivitesi, nükleik asit sentezi ve çimlenme gibi temel fizyolojik süreçlerde bozulmalara yol açarak bitkisel büyümeyi ciddi ölçüde engellemektedir [40]. Bu etkiler, ağır metallerin çevresel sistemlerde parçalanamayan ve kalıcı nitelikteki varlığını gözler önüne sermekte; bu elementlerin yalnızca toksik etkilerinin azaltılabileceğini, ancak sistemden tamamen uzaklaştırılamayacağını ortaya koymaktadır. Bu bağlamda, atık yönetiminde “stabilizasyon” yaklaşımı ön plana çıkmaktadır. Stabilizasyon, toksik maddelerin çözünürlüğünü ve taşınırlığını azaltarak çevreye yayılımını önleyen kararlı yapılar oluşturmayı hedefleyen bir mühendislik uygulamasıdır. Ancak Türkiye’de sınırlı sayıda

bulunan yakma tesisleri nedeniyle, stabilizasyon sürecine giren kül kalıntılarının ağır metal içerikleri üzerine yapılan sistematik çalışmalar henüz yeterince yaygınlaşmamıştır [44].

2.2. Ağır Metallerin Çevresel Önemi

Yoğunluğu $5,0 \text{ g/cm}^3$ 'ün üzerinde olan metaller, fiziksel niteliklerine göre “ağır metal” sınıfında değerlendirilmektedir. Bu gruba dâhil olan elementler, toksisite özellikleri ve çevresel davranışlarına göre farklı kategorilerde sınıflandırılmaktadır ve bu sınıflama Tablo 2.1'de detaylı şekilde sunulmuştur [45].

Tablo 2. 2 Metal çeşitleri [45].

Zehirli Metaller	Hg, Cr, Pb, Zn, Cu, Ni, Cd, As, Co, Sn
Değerli Metaller	Pd, Pt, Ag, Au, Ru
Radyonüklitler	U, Th, Ra, Am

Ağır metallerin çevre ve canlı sağlığı açısından oluşturduğu riskler birkaç başlık altında özetlenebilir. Öncelikle, bu tür elementlerin toksik etkileri doğada uzun süre kalıcılığını sürdürebilmekte ve çevresel koşullara bağlı olarak yıllarca aktif kalabilmektedir. Bazı ağır metaller ise, çevre koşullarındaki değişimlerle daha toksik formasyonlara dönüşerek toksisite düzeylerini artırabilmektedir. Ayrıca, bu metallerin canlı organizmalar tarafından biyoakümüasyonu fizyolojik işleyişi bozmakta ve besin zinciri aracılığıyla insan sağlığını tehdit edecek düzeye ulaşabilmektedir. Bu bağlamda, ağır metaller yalnızca kimyasal formlarını değiştirebilmekte; biyolojik ya da kimyasal yollarla tamamen yok edilememektedirler. Ağır metallerin çevresel etkileri çoğu zaman çok düşük derişimlerde bile kendini göstermektedir. Örneğin cıva (Hg) ve kadmiyum (Cd) gibi metallerin 0,001–0,1 mg/L gibi son derece düşük konsantrasyonlarda dahi yüksek toksisiteye sahip olduğu bilinmektedir [46]. Bu özellikleri nedeniyle, endüstriyel faaliyetlerden kaynaklanan atık suların içeriğindeki ağır metal iyonları, küresel düzeyde çevresel risk oluşturan başlıca kirleticilerden biri haline gelmiştir [47].

Ağır metal içeren atık sular, genellikle düşük biyokimyasal oksijen ihtiyacı (BOİ₅) değerine ve asidik pH seviyelerine sahiptir. Bu nitelikteki atıkların doğal su kaynaklarına ulaşması, suda yaşayan canlıların yaşam koşullarını olumsuz etkilemekte, bu suların içme suyu amaçlı

kullanımında ise gelişmiş ve maliyetli arıtma teknolojilerinin uygulanmasını zorunlu kılmaktadır. Eğer bu atıklar uygun şekilde arıtılmadan doğrudan göl, akarsu, deniz ya da okyanus gibi alıcı ortamlara deşarj edilirse, yalnızca sucul organizmalar için değil, bu suyu kullanan tüm ekosistem bileşenleri için zehirli etki meydana getirmektedir [34].

Ağır metaller, biyolojik arıtma süreçlerinde önemli görev üstlenen mikroorganizmalar üzerinde de toksik etki göstermektedir. Çok düşük konsantrasyonlarda bile aktif çamur gibi biyolojik arıtım sistemlerinde mikrobiyal faaliyetleri inhibe ederek arıtım verimini düşürmekte, hatta arıtımı işlevsiz hale getirmektedir. Bu nedenle, sucul organizmalar üzerinde toksik etki gösteren hemen her metal, yüksek maruziyet seviyelerinde insanlar için de zararlı olabilmekte ve bu iyonların ortamdan uzaklaştırılması çevresel ve halk sağlığı açısından zorunluluk arz etmektedir. Ağır metallerin atık sulardaki varlığı yalnızca su kalitesini değil, aynı zamanda bu sulardan elde edilen çamurun özelliklerini de etkilemektedir. Ağır metal yüklü çamurların tarımsal amaçlarla kullanılabilirliği kısıtlanmakta; bu nedenle bu tür atıkların kanalizasyon sistemlerine veya doğal alıcı ortamlara doğrudan boşaltılmaması büyük önem taşımaktadır [48].

2.3. Ağır Metallerin Sağlığa Etkileri

Ağır metallerin insan vücudunda biyotransformasyonu ve atılımı oldukça yavaş ve sınırlı düzeydedir. Bunun başlıca nedeni, bu elementlerin biyolojik sistemler üzerinde son derece toksik etkilere sahip olmaları ve homeostatik dengeyi bozarak organizmanın asidik yönde pH sapmasına yol açmalarıdır. Bu fizyolojik tehdit karşısında organizma, dolaşım sistemindeki metal iyonlarını etkisizleştirmek amacıyla karaciğer aracılığıyla bunları yağ dokularına veya dokular arası sıvı birikimleri (ödem) şeklinde izole etmeye çalışır. Bu süreç, vücudu akut toksik etkilerden koruma amacı taşıırken, metal iyonlarının uzun süreli depolanmasına da zemin hazırlar. Söz konusu savunma mekanizmasının bir örneği, kronik alkol tüketiminde görülen karaciğer yağlanması olgusudur. Alkol fazla kalori alımına yol açmasa da, karaciğerin toksik maddeleri uzaklaştırmaya çalışması sonucu çevresel yağ birikimleri oluşabilir. Ağır metallerin vücut üzerindeki toksik etkileri, temel olarak metalin türü, çözünürlük durumu ve maruz kalınan doz ile doğrudan ilişkilidir. Hücre düzeyinde ağır metallerin toksik etkisi, temel metabolik süreçlerin işleyişini bozmasıyla kendini gösterir. Bu bozulmalar arasında DNA'nın yapısal bütünlüğünün zedelenmesi, oksidatif stres seviyelerinin yükselmesi, protein yapılarının degradasyonu, proteinlerin üç boyutlu yapısal düzenlenmesinde bozukluklar (misfolding), mitokondriyal disfonksiyon ve nihayetinde programlanmış hücre ölümü (apoptozis) yer almaktadır. Bu mekanizmalar, hücresel düzeyde geri dönüşü olmayan biyokimyasal hasarlara

neden olabilmektedir. Eğer organizma, uzun süre boyunca belirli ağır metallerin eşik konsantrasyonlarının üzerinde bir maruziyete maruz kalırsa, bağışıklık sisteminin aşırı tepki vermesiyle otoimmün hastalıklar ortaya çıkabilir veya DNA hasarlarının birikmesi sonucunda kanser gelişimi gözlenebilir. Bunun yanı sıra, ağır metallerin yalnızca fizyolojik değil, aynı zamanda psikolojik etkiler de yaratabileceği bildirilmektedir. Ağır metallerin beyin-kimya dengesine müdahale ederek, stres toleransı, problem çözme becerileri ve öfke kontrol mekanizmaları üzerinde olumsuz etkiler oluşturduğu; bu durumun özellikle sigara kullanan bireylerde daha belirgin olduğu ifade edilmektedir [49].

2.4. Ağır Metallerin Özellikleri

Bu kısımda çalışmada araştırılan; bor (B), alüminyum (Al), krom (Cr), mangan (Mn), nikel (Ni), bakır (Cu), çinko (Zn), arsenik (As), selenyum (Se), kadmiyum (Cd) ve kurşun (Pb) metallerinin özellikleri yer almaktadır.

2.4.1. Alüminyum (Al)

Alüminyum (Al), yer kabuğunda yaklaşık %8 oranında bulunan ve bu yönüyle doğada en bol bulunan üçüncü elementtir. Yüksek ısı iletim kapasitesi, uzun ömürlülüğü, amfoter karakteri, kimyasal olarak aktif yapısı ve çevresel etkilere karşı gösterdiği direnç gibi özellikleri sayesinde çok çeşitli endüstriyel ve teknolojik uygulamalarda tercih edilmektedir. Bu çok yönlü fiziksel ve kimyasal özellikleri nedeniyle alüminyum, 21. yüzyılın karakteristik metali olarak tanımlanmaktadır. Alüminyumun yaygın kullanım alanları arasında inşaat sektörü, ulaşım araçları, elektronik devreler, makine parçaları, gıda ambalajları, mutfak eşyaları, sağlık ekipmanları ve bilgisayar çipleri yer almaktadır. İnsan vücuduna alüminyumun alınma yolları ise çoğunlukla solunum, cilt teması ve sindirim sistemidir. Özellikle diş hekimliğinde kullanılan metal dolgular ve teller, alüminyum içeren tencere ve mutfak gereçleri, deodorant ve parfümler, bazı ilaçlar, diyaliz solüsyonları, gıda katkı maddeleri ile konserve ve meşrubat kutuları bu metale maruziyetin başlıca kaynakları arasında sayılmaktadır [50]

Su, alüminyumun taşınmasında en etkili vektörlerden biridir; bu nedenle içme sularındaki alüminyum düzeyi, maruziyetin izlenmesinde kritik rol oynamaktadır. İnsan vücudunda bulunması gereken fizyolojik alüminyum düzeyi yaklaşık 30-40 mg arasında olup, esas olarak mide asidi ve proksimal ince bağırsaklardan sınırlı düzeyde emilir. Emilim oranının düşük

olması nedeniyle sistemik dolaşıma geçen alüminyum miktarı oldukça azdır; dolayısıyla serum düzeyi yalnızca kısa süre önce alınmış alüminyum yansıtmaktadır [51]

Nörotoksik etkileri açısından değerlendirildiğinde, alüminyumun merkezi sinir sistemi üzerindeki potansiyel zararları çeşitli çalışmalarda vurgulanmıştır. Guam adasında yapılan bir araştırma, yüksek alüminyum içeriğine sahip suyun motor nöronların dejenerasyonuna yol açarak nöromüsküler hasarı önemli ölçüde artırdığını ortaya koymuştur. Ek olarak, alüminyumun nehir sularından toprağa, oradan bitkilere ve nihayetinde besin zinciri aracılığıyla canlılara taşındığı; bu süreçte nörodejeneratif etkilere neden olduğu ve özellikle kabuklu deniz canlılarının kabuklarında yüksek oranda biriktiği rapor edilmiştir [52]

2.4.2. Arsenik (As)

Arsenik, Türkiye'de içme ve sulama sularında en sık tespit edilen toksik elementlerden biri haline gelmiş ve ulusal ölçekte en kritik metalik kirleticilerden biri olarak tanımlanmıştır. Bu durum hem doğal jeokimyasal süreçler, özellikle de arsenik içeren minerallerin çözünmesi yoluyla, hem de yoğun endüstriyel faaliyetlerin artmasıyla ilişkilendirilmektedir. Gerek doğal gerekse insan kaynaklı bu süreçlerin kontrolsüz ilerlemesi, arsenik düzeylerinin çevresel eşik değerleri aşmasına neden olmuş; yeraltı suları, nehir sistemleri ve içme suyu altyapıları bu kirlilikten ciddi şekilde etkilenmiştir.

Özellikle İzmir ilinde son yıllarda yürütülen izleme çalışmaları, bazı kuyu sularındaki arsenik konsantrasyonlarının Dünya Sağlık Örgütü'nün (WHO) içme suyu için belirlediği maksimum sınır değeri aştığını ortaya koymuştur. Bu durum üzerine 29 içme suyu kuyusu hizmet dışı bırakılmıştır. Günümüzde, İzmir ilinde arsenik seviyesi yüksek olan su kaynakları, düşük arsenik içeren sularla karıştırılarak seyreltme yöntemiyle dağıtılmaktadır. İzmir'in yanı sıra, Türkiye'nin pek çok ilinde de arsenik düzeylerinin kritik eşiğe yaklaştığı ya da bu sınırı aştığı bildirilmektedir [53].

Arsenik kirliliğinin yaygın olarak görüldüğü başlıca alanlar arasında kurşun-çinko maden işletmeleri ilk sırada yer almakta, bu alanları bakır madenciliği faaliyetleri takip etmektedir [54]. Arsenik, çevresel sistemlerde çok sayıda kimyasal forma sahip olması nedeniyle toksikoloji açısından karmaşık bir yapı sergilemektedir. Bu elementin en yaygın oksidasyon basamakları arasında arsenit (As^{3+}) ve arsenat (As^{5+}) türleri bulunmaktadır; bunlardan arsenit formu, genellikle daha toksik ve biyoyararlanımı yüksek olarak bilinmektedir [55].

Tıbbi ve epidemiyolojik çalışmalar, arsenik maruziyetinin çok çeşitli sağlık sorunlarına yol açtığını ortaya koymaktadır. Uzun süreli arsenik tüketimi mesane ve akciğer kanserleri başta olmak üzere kanserojen etki oluşturmakta; ayrıca sinir sistemi hasarları, kognitif fonksiyonlarda azalma (zeka ve hafıza bozuklukları), bebek ölümleri, diyabet ve kardiyovasküler hastalıklar gibi birçok sağlık problemine neden olabilmektedir [55]. Bu bulgular, arsenik kirliliğinin yalnızca çevresel bir tehdit değil, aynı zamanda toplum sağlığı açısından da stratejik öneme sahip bir sorun olduğunu göstermektedir.

2.4.3. Bor (B)

Bor elementi doğada hem doğal jeolojik süreçlerle hem de antropojenik faaliyetlerle çevresel ortamlarda bulunabilmektedir. Yüzey sularındaki varlığı çoğunlukla endüstriyel boşaltımlar yoluyla gerçekleşirken, toprak ve kayalardaki doğal oluşumları da önemli bir kaynak teşkil etmektedir. Türkiye’de özellikle tarımda kullanılan sulama sularındaki bor kirliliği, diğer toksik elementlere kıyasla daha yaygın olup, tarımsal üretkenlik üzerinde belirgin olumsuz etkiler yaratmaktadır. Bitki gelişiminde düşük dozlarda bor metabolik süreçler için gerekli olsa da, sınır değerlerin aşılması durumunda bitki dokularında toksik etkiler gözlenmekte, verim düşmekte ve ürün kalitesi olumsuz yönde etkilenmektedir [56].

İnsan vücuduna bor maruziyeti çoğunlukla solunum, su ve besin yoluyla gerçekleşmektedir. Emilimin ardından borun yaklaşık %60’ı böbrekler aracılığıyla idrarla atılmakta, geri kalanı ise kemik dokusu, karaciğer ve dalakta birikmektedir. Bor maruziyetinin üreme sağlığı üzerindeki etkileri de bilimsel çalışmalarla desteklenmiştir. Bor madenlerinde çalışan işçilerde sperm sayısında düşüş saptanmış; benzer şekilde bor üretim tesislerinde çalışan kadınların eşlerinde düşük ve ölü doğum oranlarının genel topluma göre daha yüksek olduğu raporlanmıştır. Ayrıca, yüksek doz bor alımına bağlı olarak meydana gelen intihar vakalarının adli tıp incelemelerinde, kanda 42 mg/dL düzeyinde bor tespit edildiği bildirilmiştir [49,57]

Türkiye’nin en zengin bor rezervleri Kütahya ve Balıkesir illerinde yer almakta olup, bu bölgelerde açık ocak madenciliği yoluyla gerçekleştirilen üretim sonucunda ortaya çıkan atıklar çevre topraklarına dağılmakta, yağış yoluyla su kaynaklarına taşınmaktadır. Bu durum, maden havzalarının yakın çevresinde bulunan ekosistemlerin toksik seviyede bor birikimine maruz kalmasına neden olmaktadır. Doğal süreçlerde de borun çevreye yayılımı; kayaların aşınması, volkanik aktiviteler, deniz tuzlarının buharlaşması ve küresel ısınmaya bağlı atmosferik yoğunlaşma yoluyla gerçekleşmektedir. İklim değişikliği, bu süreci daha da şiddetlendirmekte

ve artan atmosferik sıcaklık, deniz ve okyanuslarda aşırı buharlaşmaya yol açarak ani ve yoğun yağış olaylarını tetiklemektedir. Bu ani taşkınlar, normal yağmur suyuna kıyasla daha yüksek ağır metal içerikleri taşımakta ve çoğu zaman yer altı su sistemlerine nüfuz etmeden yüzeyde geniş alanlara yayılmaktadır. Bu da ağır metallerin, başta bor olmak üzere, atmosferik yollarla çok geniş bir coğrafi alana taşınmasına zemin hazırlamaktadır. Bor, karbonhidrat metabolizması ve hücre zarı stabilitesi gibi biyolojik süreçlerde işlevsel rol üstlenmesine rağmen, çevresel düzeydeki birikimi ve biyokümülayasyonu özellikle üreme sağlığı üzerinde ciddi tehditler oluşturmaktadır. Bor bileşikleri, asidik ortamlarla reaksiyona girerek atmosferde stabil tuzlar oluşturmakta; bu tuzlar da biyosferde birikerek besin zincirine katılmaktadır. Dünya genelinde artan infertilite oranları ve cinsel sağlık bozukluklarının temel nedenleri arasında, bor başta olmak üzere ağır metallerin besin zinciri yoluyla insan biyolojisine ulaşması gösterilmektedir [58].

2.4.4. Bakır (Cu)

Bakır (Cu), dünyada en yaygın şekilde kullanılan üçüncü metal olup, özellikle elektrik-elektronik sanayisi, ısı eşanjörleri, motor bileşenleri, sıhhi tesisat sistemleri, bina ve çatı inşaatları, kimya ve denizcilik sektörü, mutfak eşyaları, ahşap koruyucular, boya formülasyonları (anti-fouling ajanlar) ve hayvancılık sektöründe yem katkısı olarak çok çeşitli alanlarda kullanılmaktadır [59]. Bu çok yönlü kullanım alanları, bakırın çeşitli yollarla çevresel ortamlara yayılmasına neden olmakta ve özellikle sucul sistemlerde kirlilik yaratmaktadır.

Endüstriyel süreçlerde, özellikle tel üretimi, savunma sanayi, inşaat ve elektrik ekipmanları üretimi sırasında bakırın su kaynaklarına karışması kolaylaşmakta; bunun en belirgin örneklerinden biri Çin'deki Dexing Bakır Madeni'ne bağlı olarak Le'an Nehri ve çevresindeki göllerde oluşan yüksek düzeyde bakır kirliliği nedeniyle bu kaynakların kapatılması olayıdır. Aynı bölgedeki yerleşim yerlerinde bakır kirliliğine bağlı kanser oranlarının ciddi ölçüde arttığı rapor edilmiştir. Bakırın yaygınlığı, düşük maliyetli oluşuyla ilişkilendirilmekte ve bu nedenle neredeyse tüm endüstri alanlarında kullanılmaktadır. Ancak bu elementin sudan uzaklaştırılması oldukça zordur ve insan sağlığı üzerinde ciddi toksik etkiler gösterebilir. Aşırı bakır maruziyetine bağlı zehirlenme klinikte "metal ateşi" olarak bilinen grip benzeri semptomlarla seyretmektedir [60].

Tarım sektöründe de bakır önemli bir kontami-tür. Özellikle pestisitlerin yapısında yer alması ve hayvan yem katkısı olarak kullanılması, toprağa ve ardından su kaynaklarına taşınımını

kolaylaştırmaktadır. Hayvanların tükettiği yemlerdeki bakır, gübre yoluyla toprakta birikmekte, bu da toprak ve yer altı su sistemlerinde bakır yükünü artırmaktadır [61].

Bakır toksisitesi, klinik literatürde "koperiyedus" olarak tanımlanmakta olup, gıdalardan veya içme suyundan yüksek dozda alınması durumunda ciddi sağlık problemlerine yol açmaktadır. ABD Çevre Koruma Ajansı (EPA), içme suyunda izin verilen maksimum bakır konsantrasyonunu 1.3 mg/L olarak belirlemiştir. Dünya Sağlık Örgütü (WHO) ise bu değeri 50 µg/L olarak raporlamıştır [62]. Bakır zehirlenmesinin klinik belirtileri arasında kusma, hipotansiyon, sindirim sistemi bozuklukları, sarılık, hematemez (kan kusma), koma ve ölüm gibi ciddi durumlar yer almaktadır.

Doğal ortamlarda bakır çeşitli oksidasyon formlarında bulunur; özellikle Cu (IV), Cu(V) ve Cu (VI) türleri biyolojik sistemlerde farklı toksikolojik özellikler sergilemektedir. Cu (VI) formu, düşük düzeylerde zararsız olarak kabul edilse de, vücutta askorbik asit, glutatyon redüktaz ve hidrojen peroksit gibi indirgen ajanlarla etkileşime girerek daha toksik olan Cu(IV) ve Cu(V) formlarına indirgenebilir. Bu aktif bakır türleri, hücresel düzeyde DNA zincirlerine doğrudan zarar verebilmekte; bu zararlar ise mutasyonlara yol açarak çeşitli kanser türlerinin gelişimine zemin hazırlayabilmektedir.

2.4.5. Çinko (Zn)

Çinko (Zn), doğada yaygın olarak bulunan ve atmosfer, toprak ve su döngülerine hem doğal yollarla hem de insan faaliyetleri sonucu karışabilen bir mikroelementtir. Sanayi faaliyetleri, metal işleme süreçleri, fosil yakıt kullanımı, tarımsal gübreleme ve pestisit kalıntıları gibi çeşitli kaynaklardan çevresel ortamlara taşınmaktadır. Jeokimyasal olarak periyodik tablonun IIB grubunda yer alan çinko, kadmiyum ve cıva ile birlikte sınıflandırılmakla birlikte, nispeten daha düşük toksisiteye sahip olması nedeniyle insan sağlığı açısından daha az tehlikeli kabul edilmektedir. Yüksek pH koşullarında (özellikle pH > 7.7) çinko iyonları hidrolize olmakta ve ardından çevredeki inorganik ve organik maddelerle bileşik oluşturarak çevresel biyoyararlanımını azaltmaktadır. Bununla birlikte, aşırı maruziyet durumlarında çinko toksisitesi gözlemlenebilmektedir. Dünya Sağlık Örgütü (WHO), günlük alınabilir maksimum çinko miktarını 60 mg olarak belirlemiştir [63].

Çinko, hücresel düzeyde birçok biyolojik süreçte işlev üstlenmektedir. DNA ve RNA sentezi, protein üretimi, yara iyileşmesi, hücre bölünmesi, bağışıklık sistemi fonksiyonları ve A

vitamini taşınımı gibi hayati süreçlerde doğrudan rol alır. Ayrıca beyindeki öğrenme ve hafıza bölgelerinde nörolojik fonksiyonların desteklenmesinde etkili olduğu bilinmektedir. Bebeklik döneminde eksikliği, büyüme geriliği, hipogonadizm, deri bozuklukları ve bağışıklık zayıflığı gibi sorunlara yol açabilir. Anne sütü, içerdiği yüksek biyoyararlanıma sahip çinko formuyla, yenidoğanlar için temel bir kaynaktır. Çevresel olarak, özellikle İngiltere gibi yoğun metal madenciliği yapılan bölgelerde yüzey sularında çinko konsantrasyonunun oldukça yüksek değerlere ulaştığı belirlenmiştir. Bu bölgelerde madencilik şaftlarından yayılan noktasal deşarjlar nedeniyle çinko birikimi ciddi bir çevresel sorun haline gelmiştir. İçme suyu sistemlerinde kullanılan metal tanklar da zamanla çinkonun çözünmesine neden olmakta, bu da su kaynaklarında aşırı çinko birikimine yol açmaktadır. Çinkonun suda bulunan çözünür formları sülfat, nitrat, klorür ve klorat tuzlarıdır; çözünmeyen türleri ise oksit, karbonat, fosfat ve silikat yapıdadır [64].

Endüstriyel faaliyetler (çelik üretimi, metal kaplama, boya ve kozmetik sanayi, kanalizasyon sistemleri) ve tarımsal uygulamalar (eski pestisitler ve hayvansal gübreler) çinkonun doğaya salımına katkıda bulunmaktadır. Tarımda geçmişte kullanılan bazı pestisitlerin bileşiminde %10'a kadar çinko bulunmaktaydı. Bu kalıntılar, günümüzde hâlâ toprakta kalarak su kaynaklarına taşınabilmektedir. Hayvancılıkta büyüme destekleyici olarak verilen çinko, dışkı yoluyla çevreye geçmekte ve toprakta birikim göstermektedir [59].

Bitki metabolizmasında çinko, özellikle fosfat metabolizması, enzim aktivasyonu ve insülin sistemi üzerinde etkilidir. Ancak yüksek dozlarda çinko, bitki büyümesinde gecikme, klorofil sentezinde azalma ve yaşlanma süreçlerinde hızlanma gibi fitotoksik etkiler doğurabilir. Ek olarak, çinkonun çevresel suda biyolojik olarak kabul edilebilir seviyesi ökaryotik hücreler için yaklaşık 10 ng/L'dir. Ancak sinir hücrelerinde bu değer 600–800 ng/L'yi aşarsa, hücre içinde metabolik disfonksiyonlar ortaya çıkabilir [49,65].

Tüm bu nedenlerle, çinko her ne kadar yaşamsal bir element olarak görülse de, endüstriyel salımların ve çevresel maruziyetin kontrol altında tutulmaması durumunda insan, hayvan ve bitki sağlığı üzerinde ciddi etkiler yaratabilmektedir. Bu bağlamda çinkonun özellikle suda ve toprakta analitik olarak izlenmesi çevre yönetimi açısından önem arz etmektedir.

2.4.6. Demir (Fe)

Demir (Fe), yerkabuğunda bulunan metallerin yaklaşık %5'ini oluşturarak, doğal ortamda en fazla bulunan ikinci metal konumundadır. Küresel ölçekte yaygın olarak kullanılan bu element, özellikle demir-çelik endüstrisinde kritik bir rol üstlenmekte; buna bağlı olarak demir üretim süreçleri, çevresel etkiler açısından yüksek öneme sahiptir. Demir üretimi yalnızca yüksek enerji tüketimini gerektirmekle kalmaz, aynı zamanda madencilik faaliyetlerini, atık yönetimi uygulamalarını ve endüstriyel yan ürünlerin arıtımını da kapsamaktadır. Bu faaliyetler sonucunda atmosfere yayılan emisyonlar, oluşan katı atıklar ve arıtma tesislerinden çıkan atık su çamurları, hava, su ve toprak sistemleri üzerinde ciddi kirlilik oluşturabilmektedir.

Demir esaslı kirlilik yalnızca lokal etkilerle sınırlı kalmayıp, atmosfere salınan parçacıklar ve gazlar yoluyla bölgesel ve hatta küresel ölçekte yayılım gösterebilir. Özellikle çelik üretimi süreçleri, hem sucul hem atmosferik ortamlar açısından potansiyel kirleticiler arasında yer almaktadır. Bu bağlamda, demir endüstrisinin çevresel sürdürülebilirliği, günümüzde giderek artan bir şekilde tartışılmakta ve yönetim stratejileri geliştirilmektedir. Biyolojik sistemlerde demir, fizyolojik işlevler açısından vazgeçilmez bir elementtir. İnsan vücudunda en yüksek oranda bulunan metallerden biri olan demir, başta hemoglobinin sentezi olmak üzere oksijen taşınımı, enerji metabolizması ve hücre solunumu gibi yaşamsal işlevlerde rol oynamaktadır. Vücutta bulunan demirin yaklaşık %70'i eritrositlerde yer alan hemoglobinin moleküllerinde bulunur. Demir iyonları doğada ve biyolojik yapılarda genellikle +2 (Fe^{2+}) ve +3 (Fe^{3+}) oksidasyon basamaklarında yer almakta ve bu formlar farklı biyokimyasal süreçlerde görev üstlenmektedir. Her ne kadar esansiyel bir element olsa da, demirin aşırı düzeyde alınması toksik etkilere yol açabilmektedir. Özellikle çocuklar gibi hassas gruplarda, yüksek demir alımı ciddi klinik belirtilere ve sağlık komplikasyonlarına neden olabilmektedir. Vücut ağırlığına göre değerlendirildiğinde, oral yolla alınan 60 mg/kg'dan fazla demir, zehirlenme belirtilerine yol açabilirken; 100–200 mg/kg aralığı ölümcül sonuçlar doğurabilecek düzeyde kabul edilmektedir [66,67].

Dünya Sağlık Örgütü (WHO), içme sularında bulunan demir için kabul edilebilir maksimum sınır değerini 0.3–0.6 mg/L olarak bildirmiştir. Bu sınırın üzerindeki demir konsantrasyonları yalnızca tat ve renk gibi duyuşal değişikliklere değil, aynı zamanda gastrointestinal rahatsızlıklar ve organ toksisitesi gibi sağlık sorunlarına da yol açabilmektedir. Demir kaynaklı toksik etkiler, maruziyet süresine bağlı olarak ilerleyici bir karakter sergilemekte ve zamanla kronik sağlık risklerine dönüşebilmektedir.

2.4.7. Kadmiyum (Cd)

Kadmiyum (Cd), doğrudan çinko üretim süreçlerinin yan ürünü olarak elde edilen, çevresel yayılımı yüksek ve toksisite düzeyi son derece yüksek olan bir ağır metaldir. Endüstride özellikle nikel-kadmiyum pillerde, tuzlu suya karşı koruyucu kaplamalarda (örneğin gemi gövdeleri), PVC ürünlerinde stabilizatör olarak ve elektronik bileşenlerde yaygın şekilde kullanılmaktadır. Bununla birlikte, kadmiyumun çevreye yayılımında en büyük etkenlerden biri de petrol rafineleri ve ağır sanayi tesisleridir. Küresel ölçekte yıllık kadmiyum salınımı 25.000–30.000 ton civarındadır ve bu miktarın %70'i doğrudan insan kaynaklı faaliyetlerden kaynaklanmaktadır. Kadmiyum, çinko ile benzer kimyasal özelliklere sahip olduğundan doğal olarak birlikte bulunur ve biyolojik sistemlerde çinko reseptörlerine bağlanarak çinkonun yerini alabilir. Bu durum özellikle çinko eksikliği ile kadmiyum birikimi arasında ters ilişkiye yol açmakta; bu da bağlayıcı proteinlerin ve taşıyıcı mekanizmaların aynı olmasından kaynaklanmaktadır. Rafine edilmiş tahıllarda çinko azalması, kadmiyum biyoyararlanımını artırabilmektedir [49].

Kadmiyumun en dikkat çekici özelliklerinden biri, suda yüksek çözünürlük göstermesi ve bu sayede hem sucul organizmalara hem de insan besin zincirine kolaylıkla geçebilmesidir. Bu özelliği nedeniyle kadmiyum, çevresel su kirliliğinde en etkili elementlerden biri olarak değerlendirilmektedir. Özellikle deniz ürünleri, içme suyu boruları ve sigara dumanı gibi maruziyet yolları aracılığıyla insan vücuduna alınabilmektedir. Kadmiyum vücutta en çok böbrek dokusunda birikir ve uzun süreli maruziyet durumlarında böbrek fonksiyonlarının bozulmasına neden olur. Ayrıca akciğerler de bu elementten doğrudan etkilenmektedir. 0.01 mg/m³ konsantrasyonunda kadmiyuma 14 günden fazla süreyle maruz kalmak, kronik akciğer hastalıkları ve nefrotoksisiteye yol açabilir. Akut zehirlenme durumlarında ise halsizlik, baş ağrısı, ateş, kas ağrısı, terleme ve kusma gibi belirtiler ortaya çıkar; semptomlar birkaç gün içinde şiddetlenir ve yeni maruziyet olmadığında genellikle bir hafta içinde hafifler [47].

Kadmiyumun sistemik toksisitesi zamanla artar; yaşla birlikte karaciğerin depolama kapasitesi dolduğu için yaşlı bireylerde daha belirgin etkiler gözlemlenebilir. Özellikle 50 yaş üstü bireylerde metalin dolaşımdan uzaklaştırılması zorlaşmakta ve dokularda biriken kadmiyum ciddi patolojik tablolara neden olabilmektedir. Uzun süreli maruziyetin en ciddi sonuçları arasında akciğer ve prostat kanseri yer almakta olup, bu etkiler kadmiyumun kanserojen potansiyeline işaret etmektedir. Ayrıca kemik mineral yoğunluğunun azalması, osteoporoz, kansızlık, diş kaybı ve koku alma duyusunda bozulmalar gibi çok çeşitli semptomlar da kronik kadmiyum toksisitesine eşlik edebilmektedir [36,49].

Tarihte kadmiyuma bağlı en bilinen çevresel toksisite vakası, Japonya’da II. Dünya Savaşı sonrası dönemde meydana gelen İtai-itai hastalığıdır. Jinzu Nehri boyunca faaliyet gösteren madencilik işletmeleri nedeniyle çevreye salınan kadmiyum, pirinç tarlalarına geçmiş ve tüketilen kontamine ürünler sonucunda halkta ciddi kemik ve eklem ağrıları, osteomalazi ve kırıklarla seyreden bu hastalık ortaya çıkmıştır [51].

2.4.8. Krom (Cr)

Krom (Cr), doğada yaygın şekilde bulunan ve hem doğal hem de endüstriyel süreçlerle çevresel sistemlere taşınabilen bir ağır metaldir. Fransız kimyager L.N. Vauquelin tarafından keşfedilen krom elementi, adını Yu-cada "renk" anlamına gelen chroma kelimesinden almıştır; çünkü bileşiklerinin parlak ve farklı renklerde olmasıyla tanınmaktadır. Günümüzde özellikle alaşımların üretiminde önemli bir yapı taşı olarak kullanılmaktadır [49].

Kromun evreye yayılımı başlıca endüstriyel faaliyetlerden kaynaklanmaktadır. Kimyasal retim prosesleri, cam sanayi, fosil yakıtların yanması, metalurjik işlemler, atık yakma tesisleri ve demir–elik üretimi bu elementin başlıca salım kaynaklarını oluşturunur. Krom minerali olan kromit (FeCr_2O_4), bu elementin ana cevher kaynağı olup, kromit cevherinden saf Cr elde edilmesi sırasında yan ürün olarak çevreye çeşitli krom bileşikleri salınabilmektedir. Yeryüzü kabuğında doğal olarak düşük miktarlarda bulunan krom, yağmur suyu yoluyla yer altı su kaynaklarına karışabilir. Ayrıca, krom içeren pestisitlerin tarımda kullanımı, kromun toprağa ve oradan su sistemlerine taşınmasına neden olmaktadır. Bunun yanında çiftlik gübreleri, belediye arıtma çamurları ve kompost gibi biyosolidlerin aşırı ya da kontrolsüz uygulanması, toprakta Cr birikimine yol açabilmektedir [68].

Krom doğada başlıca iki farklı oksidasyon durumu ile bulunur: Üç değerlikli krom (Cr^{3+}) ve altı değerlikli krom (Cr^{6+}). Cr^{3+} formu insan vücudu için gerekli bir iz element olup, insülin fonksiyonunu düzenleyen süreçlerde görev alırken, Cr^{6+} formu yüksek toksisiteye sahiptir ve evre sağlığı açısından ciddi bir tehdit oluşturmaktadır. Altı değerlikli krom, özellikle yanma ve oksidasyon süreçleri sırasında açığa çıkar; evre koşullarına bağlı olarak Cr^{3+} formuna indirgenebilir. Ancak Cr^{6+} formunun adsorpsiyon kapasitesi, Cr^{3+} formuna göre 3–5 kat daha yüksektir [49].

Günlük 250 μg ’a kadar olan krom alımı genellikle toksik etki göstermemektedir; buna rağmen Cr^{6+} formuna kronik maruziyet, oksidatif stres, DNA hasarı, mutasyon ve kansere neden olabilir

(Suikkala vd., 2008). Özellikle solunum yoluyla alınan Cr^{6+} partikülleri; burun akıntısı, kaşıntı, solunum yollarında inflamasyon, polip oluşumu ve ileri vakalarda astım gibi sağlık sorunlarına yol açmaktadır. Yetişkin bir birey için tahmini ölümcül doz 50–150 mg/kg olarak belirlenmiştir [69].

Beslenme yoluyla krom alımı da insan sağlığı açısından önemlidir. Et, baklagiller ve baharatlar krom açısından zengin iken; sebzeler, meyveler ve süt ürünleri daha az krom içerir. Vücutta absorbe edilen kromun büyük bir kısmı böbrekler yoluyla idrarla atılmakta; kalan kısmı ise dokularda, özellikle karaciğer ve dalakta depolanmaktadır. Kromat bileşikler, bazı bireylerde alerjik reaksiyonlara yol açan histamin benzeri etkiler gösterebilir; buna karşın Cr doğrudan cilt kanseri ile ilişkilendirilmemiştir. Ancak, içme suyu ile alınan Cr^{6+} , mesane ve akciğer kanserine yol açma potansiyeli nedeniyle Dünya Sağlık Örgütü (WHO) tarafından kanserojen madde olarak sınıflandırılmış ve içme suyundaki maksimum sınır değeri 0.05 mg/L olarak belirlenmiştir. Ayrıca, krom boya, çimento, kâğıt, lastik, deri ve tekstil sanayilerinde de yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu maddelerden çevresel sistemlere sızan krom, fotosentez süreçlerini engelleyerek bitki gelişimini sınırlandırmakta ve sucul ortamda yüksek birikim potansiyeli nedeniyle özellikle kentsel bölgelerde avlanan balıkların vücut dokularında yoğun olarak birikmektedir. Bu bağlamda, sağlıklı bir gıda kaynağı olarak kabul edilen balıkların, ağır metal kirliliği nedeniyle günümüz koşullarında riskli bir besin haline geldiği değerlendirilmektedir [49].

2.4.9. Kurşun (Pb)

Kurşun (Pb), periyodik tablonun 4A grubunda yer alan ve doğada galenit (PbS), serüsit (PbCO_3) ve anglesit (PbSO_4) gibi çeşitli bileşikler halinde bulunan ağır bir metaldir. Dört stabil izotopu bulunan bu element, kimyasal yapısı gereği biyolojik sistemlerde herhangi bir metabolik göreve sahip olmamakla birlikte, toksik etkileri nedeniyle ciddi sağlık ve çevre sorunlarına yol açmaktadır. Kurşun çevreye hem doğal hem de antropojenik yollarla yayılmaktadır. Doğal kaynaklar arasında volkanik faaliyetler, orman yangınları ve deniz tuzu aerosolleri yer alırken, esas çevresel yük sanayi kaynaklı emisyonlardan ileri gelmektedir. Özellikle metal işleme, fosil yakıt kullanımı, kurşun-asitli akü üretimi, boya sanayi, lehimleme işlemleri ve radyasyon kalkanı gibi birçok endüstriyel uygulamada yüksek miktarda kurşun kullanımı söz konusudur [70].

Kurşun hem inorganik hem de organik formda çevrede bulunmaktadır. İnorganik formları özellikle havada partikül halinde bulunurken; tetraetil kurşun gibi organik türevleri geçmişte akaryakıtlarda anti-vuruntu katkı maddesi olarak yaygın biçimde kullanılmış ve bu kullanım atmosferik ve dolaylı yollardan ciddi çevre kirliliğine neden olmuştur [71].

Kurşun maruziyeti başlıca inhalasyon (solunum), gastrointestinal emilim (besin ve içme suyu yoluyla) ve deri yoluyla emilim yollarıyla gerçekleşmektedir. Solunumla alınan kurşun, doğrudan kana karışır; sindirim sisteminden emilim ise yaşa, beslenme durumuna ve bireysel fizyolojiye göre değişkenlik gösterir. Yetişkinlerde gastrointestinal emilim oranı yaklaşık %10 iken, çocuklarda bu oran daha yüksek düzeydedir. Vücuda alınan kurşunun yaklaşık %90'ı eritrositlere bağlanarak dolaşımda taşınır; yalnızca %1'lik kısmı serbest formda kalır. Kurşun, kandaki dolaşım süresi sonunda yumuşak dokulara ve daha sonra kemik dokusuna depolanır. Özellikle kemik ve dişlerde uzun yıllar boyunca (yaklaşık 20–27 yıl) biyolojik olarak birikim gösterebilir [36].

Kurşunun toksisitesinin temelinde, kalsiyumla yapısal benzerlik göstermesi yatmaktadır. Bu benzerlik, kurşunun kalsiyum taşıyıcıları aracılığıyla sinir dokularına taşınmasına neden olmakta ve sinir iletiminde görevli asetilkolin metabolizmasında aksamalara yol açmaktadır. Kurşun zehirlenmesinin klinik etkileri; anemi, kognitif fonksiyon bozuklukları, kas zayıflığı, diş ve kemik deformiteleri, renal hasarlar, karaciğer yetmezliği ve ileri vakalarda koma ve ölüme kadar gidebilmektedir. Özellikle 1–5 yaş aralığındaki çocuklar yüksek risk altındadır. Toprak, toz veya boyayla kontamine olmuş yüzeylerle temas eden çocuklarda hızlı birikim görülmekte ve belirtiler birkaç gün içinde ortaya çıkabilmektedir. Bu yaş grubundaki çocuklarda gelişimsel gerilik, IQ düşüşü (her 10 µg/dL artışa karşılık 2–4 puan azalma), dikkat eksikliği ve davranış bozuklukları literatürde sıklıkla rapor edilmiştir [72].

Kurşun emilimi; düşük kalsiyum ve demir içerikli diyetlerde artış göstermekte ve kemiklere daha fazla birikimle sonuçlanmaktadır. Erişkinlerde alınan kurşunun %94'ü, çocuklarda ise %73'ü kemik dokuda depolanmaktadır. Kemiklerde biriken kurşun, yıllar sonra tekrar dolaşıma katılarak böbrek ve sinir sisteminde geri dönülmez hasarlara neden olabilmektedir. Ayrıca bu ağır metal, plasentayı geçerek anne karnındaki fetüse ve emzirme yoluyla anne sütüne de geçebilmektedir. Bu yönüyle gelişimsel toksisite açısından da ciddi tehdit oluşturmaktadır. Tarihsel olarak da kurşun zehirlenmesinin etkileri dramatik örneklerle açıklanmıştır. Örneğin, Roma İmparatorluğu döneminde su taşıma boruları, saklama kapları ve kozmetik ürünlerde yoğun kurşun kullanımı, aristokrasi sınıfında davranış bozuklukları, doğurganlıkta azalma ve

zihinsel gerilemeye neden olmuş ve bu durum imparatorluğun zayıflamasında dolaylı bir rol oynamıştır. Günümüzde birçok ülkenin sağlık otoritesi, içme suyundaki kurşun seviyesinin 5 µg/L'yi geçmemesi gerektiğini belirtmektedir. Ancak endüstriyel yayılımın önlenmesindeki güçlükler nedeniyle bu sınır değerin çoğu bölgede aşıldığı bildirilmektedir [71].

Son yıllarda yapılan çevresel izleme çalışmalarında, özellikle tarımsal faaliyetlerin, turizm baskısının ve evsel atıkların yoğun olduğu bölgelerde, kurşun başta olmak üzere Zn, Cu, Cd gibi ağır metallerin hem su hem de sediment örneklerinde anlamlı düzeylerde tespit edildiği bildirilmektedir. Kurşun, doğal ortamlarda kalıcılığı ve biyolojik birikim kapasitesi yüksek olan bir metal olup, sucul ekosistemlerde tür çeşitliliğini azaltmakta ve ekolojik dengeyi tehdit etmektedir [70].

2.4.10. Mangan (Mn)

Mangan (Mn), hem doğal çevrede hem de endüstriyel faaliyetler sonucu çevreye karışabilen önemli bir eser elementtir. Doğal olarak yer kabuğunda, özellikle kil tipi topraklarda ve oksijensiz ortamlarda (örneğin bazı yeraltı suyu kaynaklarında ve denizaltı çökeltilerinde) yüksek konsantrasyonlarda bulunabilir. Bununla birlikte, madencilik, metal işleme, tren yolları ve pestisit üretimi gibi insan kaynaklı etkinlikler de manganın çevresel yayılımını artırmaktadır. Mangan, endüstriyel açıdan çelik üretiminde paslanma direncini artırmak ve mekanik mukavemeti geliştirmek amacıyla yaygın olarak kullanılmaktadır. Özellikle demiryolu hatlarına yakın bölgelerde nehir sistemlerine taşınımı yaygındır. Ayrıca, mangan bileşikleri; potasyum permanganat (antiseptik ve dezenfektan), mangan dioksit (kibrit ve havai fişek üretimi), mangan sülfat (tarımsal gübreler) ve mangan klorür (pil üretimi) gibi çeşitli ürünlerde ticari olarak yer almaktadır. Metal işleme tesisleri ve bu bileşikleri kullanan endüstriyel alanlar, manganın en önemli yapay salım kaynaklarını oluşturmaktadır [73].

Biyolojik sistemler için mangan temel bir elementtir. İnsan vücudunda başta mitokondriler olmak üzere hücresel enerji üretim merkezlerinde yoğunlaşmakta; ayrıca tiroid fonksiyonları, kıkırdak ve kemik gelişimi ile sinir sisteminin sağlıklı işleyişi için kritik öneme sahiptir. Eksiklik durumlarında yorgunluk, infertilite, büyüme geriliği ve bilişsel fonksiyon kaybı gibi etkiler gözlemlenebilir. Örneğin epilepsi tanısı almış çocukların yaklaşık üçte birinde serum mangan düzeylerinin düşük olduğu rapor edilmiştir. Öte yandan, vücutta manganın fazla miktarda bulunması çeşitli sağlık sorunlarına neden olabilir. Günlük güvenli alım düzeyi 2.5–5 mg arasında önerilmektedir. Serumda sağlıklı bireylerde bulunması gereken mangan seviyesi

0.05–0.12 µg/dL aralığında tanımlanmıştır. Bu aralığın üzerine çıkıldığında toksik etkiler baş gösterebilir. Mangan, iyonik formda kolayca beyin-kan bariyerini geçebildiğinden, içme suyu veya gıdalarla aşırı alımı beyin dokusunda birikime neden olmakta ve nörolojik hasar riskini artırmaktadır. Kronik mangan maruziyetine bağlı olarak gelişen durumlar arasında baş ağrısı, davranış bozuklukları, psikoz benzeri belirtiler ve motor koordinasyon bozuklukları bulunmaktadır. Özellikle madencilik gibi mangan yoğun ortamlarda çalışan bireylerde bu tip nörotoksik etkiler daha sık görülmektedir. Ayrıca manganın çevreyle ilişkili en önemli taşıma yollarından biri sedimente bağlanarak nehir sistemlerinde çözünmesidir. Bu özelliği nedeniyle suda kolayca taşınabilir, yayılabilir ve birikebilir [49,73].

Tarımsal üretimde kullanılan pestisitlerin yapısında yer alan mangan, gübreleme süreçleri sonucunda toprakta birikmekte ve zamanla yağış veya sulama yoluyla yeraltı sularına geçiş göstermektedir. Bu durum içme suyu kaynaklarında mangan kirliliği riskini artırmaktadır. Öte yandan, manganın çevre kirliliği bakımından yüksek riskli bir ağır metal olmadığı, ancak belli konsantrasyonların üzerinde biyolojik sistemlerde toksik etki gösterebildiği bilinmektedir. Sonuç olarak mangan hem çevresel hem de fizyolojik bağlamda önemli bir eser element olup, doz-aşımı durumunda sağlık ve çevre açısından dikkate alınması gereken bir toksikolojik profile karakterize edilmektedir.

2.4.11. Nikel (Ni)

Nikel (Ni), yerkabuğunda doğal olarak bulunan ve özellikle endüstriyel faaliyetler sonucunda çevreye salınan bir geçiş metalidir. Doğal kaynaklardan çevreye karışabildiği gibi, esas olarak metalürjik işlemler, kömür ve petrol yanması, fosseptik sızıntılar ve endüstriyel atıklarla çevresel sistemlere dahil olmaktadır. Sediment ortamlarında genellikle karbonatlarla kompleksleşmiş formda bulunmaktadır. Toprakta ise eser miktarda bulunmakla birlikte, tarımsal faaliyetlerde kullanılan alanlarda genellikle düşük konsantrasyonlarda tespit edilmektedir. Nikel, modern endüstride çok çeşitli kullanım alanlarına sahiptir. Başlıca kullanım alanları arasında çelik ve süperalaşım üretimi, paslanmaz çatal-bıçak takımları, cerrahi ekipmanlar, elektro-kaplamalar, zırh kaplamaları, otomotiv parçaları (örneğin kapı kolları), haberleşme altyapısında kullanılan yüksek hızlı iletişim kabloları ve bozuk paralar yer almaktadır. Ayrıca, nikelin uzaydan meteor çarpması sonucu yeryüzüne ulaştığına dair jeolojik teoriler de mevcuttur [74].

Biyolojik sistemlerde eser miktarda bulunması gereken nikel, bazı enzimatik faaliyetlerin düzenlenmesinde ve özellikle karbonhidrat metabolizmasında işlevsel roller üstlenmektedir. Ayrıca, insülin metabolizmasını düzenlemede ve demir emilimini artırarak anemi gelişimini önlemede destekleyici etkiler gösterebilmektedir. Nükleik asit yapılarında da yer alarak hücresel düzeydeki biyokimyasal süreçlerde görev almaktadır. Ancak nikelin biyolojik sistemler üzerindeki etkileri yalnızca faydayla sınırlı değildir. Kronik maruziyet durumunda, başta solunum ve sindirim sistemi olmak üzere çeşitli organ ve dokularda toksik etkilere neden olabilir. Uzun süreli nikel maruziyeti, akciğer fonksiyon bozuklukları, kardiyovasküler rahatsızlıklar, böbrek hasarı ve kanser oluşumu gibi ciddi sağlık problemleriyle ilişkilendirilmiştir. Nikelin özellikle alerjik kontakt dermatit ve anafilaktik reaksiyonlar gibi cilt hastalıklarına neden olma potansiyeli yüksektir. Ayrıca altı değerlikli nikel bileşikler, en toksik form olarak kabul edilmekte ve genotoksik etkileri nedeniyle insan sağlığı açısından özel önem taşımaktadır [73].

Çevresel açıdan değerlendirildiğinde, nikelin su ekosistemlerindeki yayılımı dikkat çekicidir. Özellikle balıkçılık ekipmanlarının uzun süreli su içi temasları, nikelin suda çözünmesine ve biyoakкумуляasyon potansiyelinin artmasına neden olmaktadır. Bu bağlamda, nikel madenlerinin çevresel etkilerinin izlenmesi ve atıklarının etkin biçimde arıtılması, sucul yaşam ve genel ekosistem sağlığı açısından kritik bir zorunluluktur. Sonuç olarak, nikel hem biyolojik sistemler için gerekli bir mikroelement hem de yüksek konsantrasyonlarda toksik ve çevreye zararlı bir ağır metal olarak değerlendirilmelidir. Bu nedenle endüstriyel uygulamalarda kontrolsüz salımların önüne geçilmesi ve nikel bazlı atıkların çevresel yönetimi titizlikle yürütülmelidir.

2.4.12. Vanadyum

Vanadyum (V), atom numarası 23 olan, periyodik tablonun 4. periyot 5B grubunda bulunan grimsi bir metaldir. Doğada ^{50}V ve ^{51}V olmak üzere iki kararlı izotopu bulunur. Bu element, $-1, 0, +2, +3, +4$ ve $+5$ gibi geniş bir oksidasyon durumları aralığına sahiptir; ancak en sık görülenleri $+3, +4$ ve $+5$ değerlikli formlarıdır.

Kimyasal özelliklerine bakıldığında, vanadyumun sulu çözeltilerde ve asitlerde çözünerek bazik karakterdeki bileşiklerle vanadatlar oluşturduğu görülür. Özellikle $+3$ oksidasyon durumundaki vanadyum, oksijenle birleşerek vanadyum oksit (V_2O_3) adı verilen bazik bir bileşik oluşturur. Bu vanadyum oksit, asidik ortamlarda çözündüğünde yeşil renkli heksa-aquo

iyonları meydana getirir. Ayrıca, vanadyum tuzlarının güçlü indirgeyici maddeler olduğu bilinmektedir [75].

Vanadyumun madencilik açısından ana bileşikleri karnatit ve vanadinit olsa da, büyük yataklarda vanadyum açısından zengin minerallerin azlığı nedeniyle, daha düşük vanadyum içeriğine sahip cevherler dahi ticari olarak değerli kabul edilmektedir [76]. Çevresel kirlilik açısından, havaya salınan vanadyumun başlıca kaynakları, fosil yakıtlara (kömür ve petrol gibi) dayalı enerji santralleri ve ısıtma tesisleridir. Madencilik bölgelerinde, kömür atıklarının veya kömür tozu depolama alanlarının yakılması da atmosfere vanadyum salımına neden olur. Ayrıca, petrol, kömür, katran, bitüm ve yüksek vanadyum içeren asfaltit gibi fosil yakıtlardan vanadyum elde edilmesi, yaygın bir tedarik yöntemidir [77].

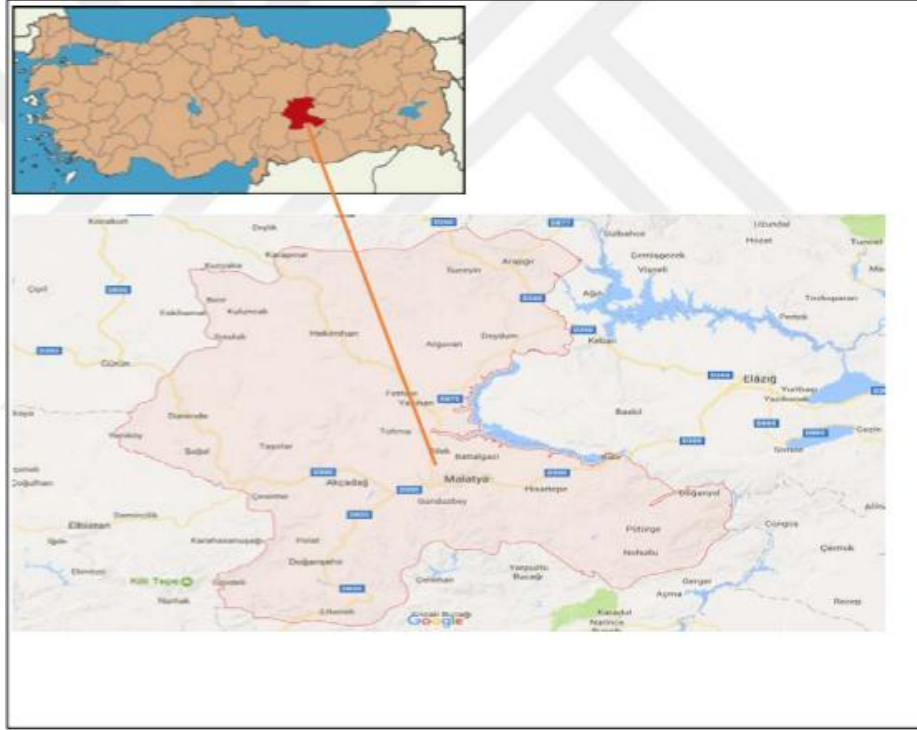
Demir metalürjisinde vanadyum, çeşitli çelik türlerinin temel alaşım elementi olarak (yaklaşık %75-85 oranında) büyük önem taşır. Nükleer enerji, uçak üretimi ve uzay teknolojisi gibi sektörlerde de kritik bir rol oynar. Kimya endüstrisinde ise vanadyum pentoksit ve metavanadatlar, sülfürik asit ve plastik üretiminde önemli birer katalizör olarak kullanılır [78]. Bunların yanı sıra, vanadyumun farklı sektörlerde küçük ölçekli uygulama alanları da bulunmaktadır [75]. Vanadyum emisyonları özellikle çelik alaşımı üreten büyük tesislerin çevresinde artış göstermektedir. Ayrıca, vanadyum cüruflarının kavrulması ve ferrovanadyum üretimi için elektrikli fırınlarda vanadyum pentoksitin eritilmesi süreçlerinde de vanadyumun atmosfere yayıldığı rapor edilmiştir [79].

Vanadyum, biyokimyasal süreçler için gerekli bir eser element olarak bilinir ve kan-beyin bariyerini geçebilir. Ayrıca anne sütünde de bulunur [80]. Ortam havasındaki yüksek vanadyum konsantrasyonlarının kalp ve solunum sistemi üzerindeki olumsuz etkilerle, hatta ölümlerle ilişkilendirildiği gözlemlenmiştir. Ancak, bu tür çalışmalarda vanadyum ile hastalıklar arasında kesin bir neden-sonuç ilişkisi kurulamamıştır [51]. İnsanlar üzerindeki olumsuz etkileri hakkında bildiklerimizin çoğu, kontrollü çalışmalar ve tedavi amaçlı kullanımlardan elde edilmiştir. Vanadyuma maruz kalmak, gözlerde ve solunum yollarında tahrişe yol açabilir [81].

3. ÇALIŞMA ALANINA AİT BİLGİLER

3.1. Çalışma Alanının Coğrafi Konumu

Malatya ili içme sularındaki ağır metal düzeylerinin incelenmesine yönelik bu çalışmada, uygulama alanı olarak Battalgazi ve Yeşilyurt ilçeleri seçilmiştir. Doğu Anadolu Bölgesi'nin batısında yer alan Malatya; doğuda Elazığ ve Diyarbakır, güneyde Adıyaman, batıda Kahramanmaraş, kuzeyde ise Sivas ve Erzincan illeri ile komşudur. İl topraklarının yüzölçümü 12.313 km² olup, 2024 yılı Adrese Dayalı Nüfus Kayıt Sistemi verilerine göre toplam nüfusu 750.491 kişidir. Bu tez kapsamında çalışma alanı, merkez ilçeler olan Battalgazi ve Yeşilyurt'a bağlı 12 mahalleden oluşmaktadır. Uygulama alanına ilişkin harita Şekil 3.1'de sunulmaktadır.



Şekil 3. 1 Çalışma alanı

3.2. İklim ve Hava Şartları

Malatya, karasal iklimin hüküm sürdüğü bir bölgede yer alır. Bu iklim tipi, genellikle yaz ve kış mevsimleri arasında belirgin sıcaklık farklarına sahiptir. Yaz ayları oldukça sıcak ve kurak geçerken, kışlar soğuk ve kar yağışlı olabilir. Yazın sıcaklıklar genellikle 30 °C üzerine çıkar ve bazen 40 dereceye kadar ulaşabilir. Bu yüksek sıcaklıklar, özellikle temmuz ve ağustos aylarında zirveye ulaşır. Kış aylarında ise sıcaklık sıfır derecenin altına düşebilir, özellikle ocak ve şubat ayları en soğuk dönemleridir.

Nem oranı genellikle düşük olup, bu da yaz aylarında sıcak havanın daha katlanılır hale gelmesini sağlar. Ancak, düşük nem oranı cilt kuruluğu ve solunum yolları üzerinde bazı sağlık sorunlarına yol açabilir. Yağışlar genellikle ilkbahar ve sonbahar aylarında görölür, yazları oldukça kurak geçer. Yıllık yağış miktarı oldukça düşüktür ve bu durum tarım faaliyetlerini sulama ihtiyacını artırır.

Rüzgarlar, Malatya'da mevsimlere göre değişiklik gösterir. Yaz aylarında genellikle kuzey ve batı yönlerinden esen rüzgarlar serinletici bir etki yaparken, kışın doğu ve güneydoğu yönlerinden esen rüzgarlar soğuk hava dalgalarını beraberinde getirebilir. Bu rüzgarlar, özellikle yüksek kesimlerde yaşayan insanlar için daha sert kış koşulları anlamına gelir.

Bu iklim koşulları, Malatya'nın sosyal ve ekonomik yaşamını doğrudan etkiler. Sıcak ve kurak yazlar, su kaynaklarının yönetimini önemli hale getirirken, özellikle tarım sektöründe sulama ihtiyacını artırır. Kış aylarında yaşanan soğuk ve karlı hava, ısınma ihtiyacını artırır ve bu durum enerji tüketiminde mevsimsel dalgalanmalara neden olur. Ayrıca, soğuk hava koşulları nedeniyle kış turizmi aktiviteleri gibi bazı ekonomik faaliyetler de olumlu yönde etkilenebilir. Özetle, Malatya'nın iklimi, sıcak yazlar ve soğuk kışlar ile karakterize edilir, bu da şehrin yaşam koşullarını ve ekonomik faaliyetlerini şekillendiren önemli bir faktördür [82].

3.3. İçme Suyu Kaynakları İle İlgili Mevcut Durum

Malatya ili merkez ilçeleri olan Battalgazi ve Yeşilyurt'un içme suyu ihtiyacı, Yeşilyurt ilçesi Gündüzbey mevkiinde, şehir merkezine yaklaşık 19 km mesafede ve 1.208 metre rakımda bulunan Malatya'nın ana su kaynağı tarafından karşılanmaktadır. Bu su kaynağı, Kozluk Köyü sınırları içerisinde, Beydağı eteklerinden çıkmaktadır. Kaptajın tarihi Roma İmparatorluğu dönemine kadar uzanmakta olup, o dönemden günümüze kadar şehrin ana içme suyu kaynağı olarak kullanılmaktadır. Yüzyıllardır Malatya'nın su ihtiyacını karşılayan bu kaptaj, kentin su altyapısının temel taşlarından biri olmuştur.

Malatya Büyükşehir Belediyesi tarafından inşa edilerek MASKİ Genel Müdürlüğü tarafından işletilen kaptaj tesisi, şehrin su temininde hayati bir rol üstlenmektedir. 1995 yılından itibaren, kaptajdan elde edilen suyun tamamı içme suyu olarak kullanılmakta ve doğrudan şehir şebekesine verilerek halkın kullanımına sunulmaktadır.

1946 yılından bu yana içme suyu temininde kullanılan bu kaptajdan elde edilen su, kendi cazibesiyle (pompaj gerektirmeden) şehir merkezine ulaştırılmaktadır. Su, herhangi bir arıtma

işlemine tabi tutulmaksızın yalnızca klorlama işlemi ile dezenfekte edilerek içme suyu olarak sunulmaktadır. Böylece, suyun güvenliği sağlanırken doğal kimyasal ve fiziksel özellikleri korunmaktadır [83].

3.4. Nüfus Dağılımı ve Su İhtiyacı

2024 Yılı Adrese Dayalı Nüfus Kayıt Sistemi sonuçlarına göre; Malatya'nın toplam nüfusu 31 Aralık 2024 itibarı ile 750.491 olarak gerçekleşmiştir. En büyük nüfus 298.839 kişi ile Yeşilyurt İlçesinde, daha sonra 276.319 kişi ile Battalgazi İlçesinde ikamet etmektedir [84].

Malatya ili su ihtiyacı, günde kişi başı 200 lt su tüketimi olduğunu baz alarak;

$$750.491 \text{ kişi} \times 200 \text{ lt} = 150.098.200 \text{ lt}$$

m³ cinsinden birim çevirme yapacak olursak;

$$150.098.200 \text{ lt} \times 1 \text{ m}^3/1000 \text{ lt} = 150.098,2 \text{ m}^3 \text{ su ihtiyacı bulunmaktadır.}$$



4. MATERYAL VE METOD

Araştırmada kullanılmak üzere Malatya ili Battalgazi ve Yeşilyurt İlçelerindeki 12 mahallenin kaynaklarından 62 adet su numunesi, TS ISO 5667-11 metoduna uygun şekilde toplanmıştır. İçme suyu numunelerinin toplandığı mahalle adı, numune kodu ve numune alınma tarihi Tablo 4.1’de sunulmuştur.

Tablo 4. 1 İçme suyu numunelerinin toplama bilgileri

İçme Suyu Numunelerinin Toplanma Bilgileri	
Mahalle Adı	Numune Alınma Tarihi
Bağtepe Mahallesi	14.10.2024
	15.11.2024
	29.11.2024
	5.12.2024
	30.12.2024
Çolaklı Mahallesi	28.01.2025
	14.10.2024
	29.11.2024
	5.12.2024
	30.12.2024
Çolakoğlu Mahallesi	27.01.2025
	27.01.2025
	15.10.2024
	14.11.2024
	1.12.2024
Gülümuşluğu Mahallesi	31.12.2024
	28.01.2025
	15.10.2024
	15.11.2024
	1.12.2024
Hisartepe Mahallesi	14.10.2024
	15.11.2024
	1.12.2024
	27.01.2025
	13.03.2025
Kuluşluğu Mahallesi 1	15.10.2024
	14.11.2024
	1.12.2024
	31.12.2024
	28.01.2025
Kuluşluğu Mahallesi 2	15.10.2024
	14.11.2024
	1.12.2024
	31.12.2024
	28.01.2025
Meydancık Mahallesi	15.10.2024
	14.11.2024
	29.11.2024
	30.12.2024
	28.01.2025
Şişman Mahallesi	13.03.2025
	24.10.2024
	29.11.2024
	31.12.2024

	28.01.2025
	13.03.2025
Tanışık Mahallesi	15.10.2024
	15.11.2024
	1.12.2024
	2.01.2025
	27.01.2025
	15.10.2024
Uluköy Mahallesi	15.11.2024
	1.12.2024
	2.01.2025
	28.01.2025
Merkez Kaptaj	18.10.2024
	26.11.2024
	12.12.2024
	29.01.2025
	12.02.2025
	12.03.2025

4.1. Numunelerin Toplanması

Çalışma materyalini Malatya ili Battalgazi ilçesi ve Yeşilyurt İlçesinden alınan su örnekleri oluşturmaktadır. Bu çalışma için toplam 62 adet numune alınmıştır. Alınan numuneler yerleşim yerlerinin ihtiyacını karşılayan içme suyu kaynaklarından temin edilmişlerdir. Araştırmada kullanılmak üzere Malatya ili Battalgazi İlçesine bağlı (Çolaklı - Bağtepe – Uluköy – Hisarteppe - Gülümuşağı - Kuluşağı 1 - Kuluşağı 2 - Şişman-Meydancık – Çolakoğlu -Tanışık) ve Yeşilyurt ilçesini (Yeşilyurt-Kaptaj) besleyen kaynaklardan alınan su numuneleri Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği Numune Alma ve Analiz Metotları Tebliği'nde belirtildiği şekilde alınmıştır. Numune alınan kaynakların konumları Şekil 4.2'de gösterilmiştir.



Şekil 4. 1 Numune alınan sondaj ve numune kabı



Şekil 4. 2 Numune alınan kaynakların konumu

Numunelerin toplanması için TS ISO 5667-11 yöntemi kullanılmaktadır. Numunelerin kararlılığı ve yapılarının bozulmaması büyük öneme sahiptir. Bir gün içerisinde laboratuvara

ulaştırılamayacak olan numuneler ISO 5667-3'e göre veya uygun analitik standartlara göre kararlı hale getirilir. Numune alma donanımı ve şişelerin temiz tutulması sağlanarak kirlenmeye fırsat verilmesi nlenmiştir. Numunelerin kararlılığı, yapılarının bozunmaması ve numunelerin korunmasının en yaygın yolu olan soğuk zincir altında taşıma ve karanlıkta depolama yapılarak muhafaza edilmiştir. Belirlenen lokasyonlardan toplanan su örnekleri, 500 mL hacminde, ağzı kapalı plastik şişelerde muhafaza edilerek soğuk zincir taşıma koşulları altında laboratuvara ulaştırılmıştır. Analiz öncesinde, numunelerdeki katı partiküllerin uzaklaştırılması amacıyla filtreleme işlemi yapılmış ve ardından numunelerin pH değerleri nitrik asit kullanılarak 2'ye ayarlanmıştır. Hazırlanan bu örneklerin analizleri ICP-MS cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Analizler için TS EN ISO 17294-1 Water quality-Application of inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS) kullanılmıştır. Analiz öncesinde, numuneler uygun şekilde hazırlanarak sindirime tabi tutulur ve ardından ICP-MS cihazında analiz edilir. Su numunelerinde 15 ağır metal elementi olan Alüminyum (Al), Antimon (Sb), Arsenik (As), Bakır (Cu), Baryum (Ba), Berilyum (Be), Bor (B), inko (Zn), Demir (Fe), Kadmiyum (Cd), Kurşun (Pb), Krom (Cr), Mangan (Mn), Nikel (Ni), Vanadyum (V) konsantrasyonları ICP-MS (Thermo ICAP RQ 00366 Series ICP-MS) cihazında analiz yapılarak belirlenmiştir. Analiz için hazırlanan kalibrasyon standartları kullanılarak 5 noktalı kalibrasyon eğrisinden ($R^2 > 0.999$) faydalanılarak sonuçlar hesaplanmıştır.

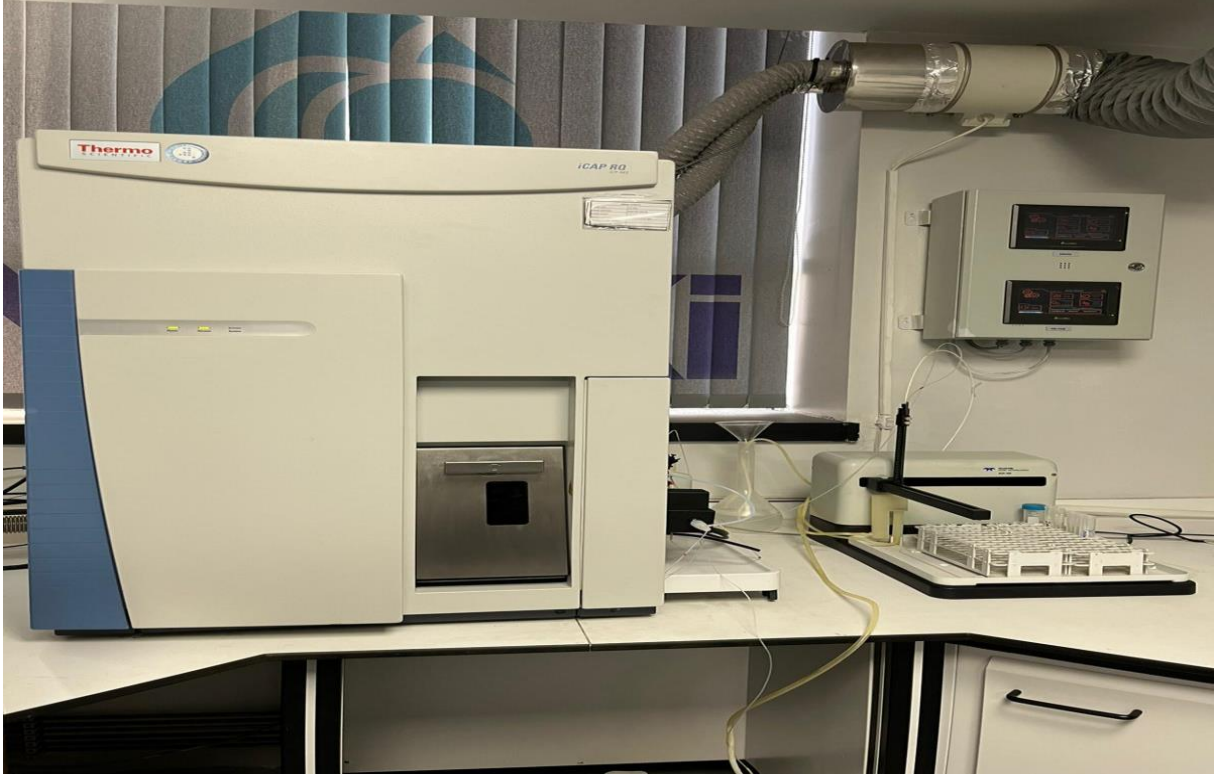
4.2. Yöntem

4.2.1. İndüktif Olarak Birleştirilmiş Plazma Kütle Spektrofotometresi (ICP-MS)

İndüktif Eşleşmiş Plazma – Kütle Spektrometresi (ICP-MS), katı ve sıvı örneklerde çok sayıda elementin hızlı, hassas ve doğru bir şekilde tayin edilmesine olanak sağlayan gelişmiş bir analiz tekniğidir. Analitik bir cihaz olan ICP-MS, iki temel üniteden oluşmaktadır: İndüktif olarak eşleştirilmiş plazma (ICP) ve kütle spektrometresi (MS).

Analiz edilmek istenen örnekteki elementler önce ICP nitesinde iyonlaştırılmakta, ardından kütle spektrometresine gönderilerek kütle/yük (m/z) oranlarına göre ayrıştırılmakta ve ölçülmektedir. ICP-MS cihazı, elementleri hem kalitatif hem de kantitatif olarak tayin edebilmekte ve izotop analizine olanak sağlamaktadır. Birçok element için tayin sınırının milyarda birin (ppb – parts per billion) altında olması nedeniyle, özellikle iz element tayini ve miktar belirlemede en uygun yöntemlerden biridir [85].

ICP-MS'nin en yaygın kullanım alanlarından biri çevresel analizlerdir. Doğal kaynak suları, içme suları, atık sular ve toprak numunelerinde ağır metal ve eser element analizlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bunun yanı sıra; gıda, ilaç, jeoloji ve maden araştırmaları gibi farklı alanlarda da tercih edilmektedir. Ayrıca, toksikoloji, tıbbi analizler ve adli tıp alanlarında vücut sıvılarındaki metal element düzeylerinin belirlenmesinde de yaygın şekilde kullanılan güvenilir bir tekniktir.



Şekil 4. 3 İndüktif Olarak Birleştirilmiş Plazma Kütle Spektrofotometresi (ICP-MS) Cihazı

4.2.2. Uygulama Alanları

- Jeolojik Analizler: Kayaç, cevher ve toprak numunelerinin jeokimyasal analizlerinde kullanılmakta olup, bu numunelerde altın, platin gibi değerli metallerin ve ağır metallerin tayininde etkin bir yöntemdir.
- Hidrojeolojik Analizler: Yeraltı suları, kaynak suları, termal ve mineralli sularda elementel analiz yapılarak suyun jeokimyasal özellikleri belirlenmektedir.

- Çevre Analizleri: Su, atık su, toprak ve çamur numunelerinde ağır metal tayini için yaygın olarak kullanılmaktadır. Ayrıca içme suyu kalitesinin elementel analiz yoluyla belirlenmesinde de tercih edilmektedir.

- Gıda Analizleri: Başta meyve suları olmak üzere çeşitli gıda ürünlerinde ağır metal tayini yapılmaktadır.

- Endüstriyel Hammaddeler ve Ürün Analizleri: Çeşitli endüstriyel hammaddeler ve nihai ürünlerde eser element tayini için kullanılmaktadır.

- Petrokimya Analizleri: Petrokimya sektöründe hem hammadde hem de nihai ürünlerdeki elementel bileşimin belirlenmesinde kullanılmaktadır.

4.2.3 Kullanılan Reaktifler Ve Standartların Hazırlanışı

Analiz için öncelikle 1000 ml’lik balon jojeye 20 ml Ultra Pure (UP) nitric asit (%2’ lik Nitrik asit’ li) alıp üzerine ultra saf su le 1000 ml’ye tamamlanıyor. Hazırlanan bu çözelti Blank ve yıkama çözeltisidir. Hazırlanan bu blank çözeltisi kullanım noktaları aşağıda sıralanamıştır.

1. Standart çözeltilerin hazırlanmasında,
2. Prob yıkama aşamasında,
3. Cihazın doğru ölçüm yapabilmesi adına hattın yıkama sırasında
4. İnternal standart çözeltisinden hazırlanması aşamasında kullanılmaktadır.

Hazır olarak temin edilen İnternal standart çözeltisinden (Bi, Ge, İn, Li, Sc, Tb, Y) 2,5 ml pipet yardımı alınıp 500 ml’lik balon jojeye konulup üzerini blank çözeltisi ile 500 ml’ye tamamlıyoruz. Bu hazırlanan İnternal standart çözeltisi olmaktadır. Hazırlanan bu çözelti İnternal standart çözeltisi kabına yerleştirilip prob içine daldırılır.

7 adet falkon tüpü hazırlanır. Bunlardan 1 tanesi ana stok çözeltisi için geriye kalan 6 adet falkon tüpü ise standart çözeltiler için kullanılır.

Ana Stok (Al, Zn, Cu, Fe) tekli standartlardan 0,5 ml alınıp daha sonra (Mn, Sb, As, Cr, Pb, Ni, Se, Cd) tekli standartlarından 0,05 ml alınıp 50 ml’lik falkon tüpüne konulur ve üzeri Blank Çözeltisi ile tamamlanır.

1.Standart için ana stoktan 0,1 ml alınıp 50 ml'lik falkon tüpüne eklenir ve üzeri Blank Çözeltisi ile tamamlanır.

2.Standart için ana stoktan 0,25 ml alınıp 50 ml'lik falkon tüpüne eklenir ve üzeri Blank Çözeltisi ile tamamlanır.

3.Standart için ana stoktan 0,50 ml alınıp 50 ml'lik falkon tüpüne eklenir ve üzeri Blank Çözeltisi ile tamamlanır.

4.Standart için ana stoktan 0,75 ml alınıp 50 ml'lik falkon tüpüne eklenir ve üzeri Blank Çözeltisi ile tamamlanır.

5.Standart için ana stoktan 1,25 ml alınıp 50 ml'lik falkon tüpüne eklenir ve üzeri Blank Çözeltisi ile tamamlanır.

6.Standart için ana stoktan 2,5 ml alınıp 50 ml'lik falkon tüpüne eklenir ve üzeri Blank Çözeltisi ile tamamlanır.

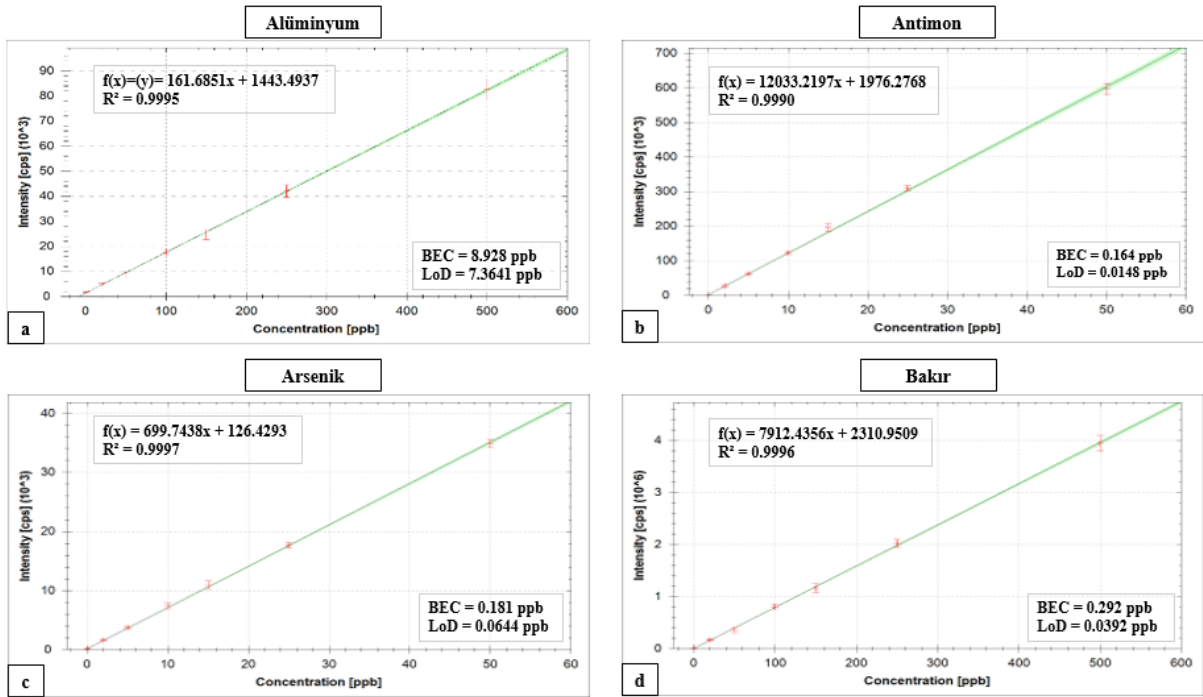
"Çözeltiler hazırlandıktan sonra, ağır metal içeriği ölçülmeden önce cihazın kalibrasyonu gerçekleştirilmiştir. Her bir element için oluşturulan kalibrasyon eğrileri, hazırlanan standart çözeltilerin doğruluğunu ve analiz güvenilirliğini doğrulamak amacıyla kullanılmıştır."

Hedeflenen amaca uygun olarak, kullanılan analitik metodun belirli performans özelliklerini karşılaması amacıyla gözlenebilirlik sınırı (LOD) ve ölçme sınırı (LOQ) değerleri belirlenmiş, sonuçlar Tablo 4.2'de sunulmuştur.

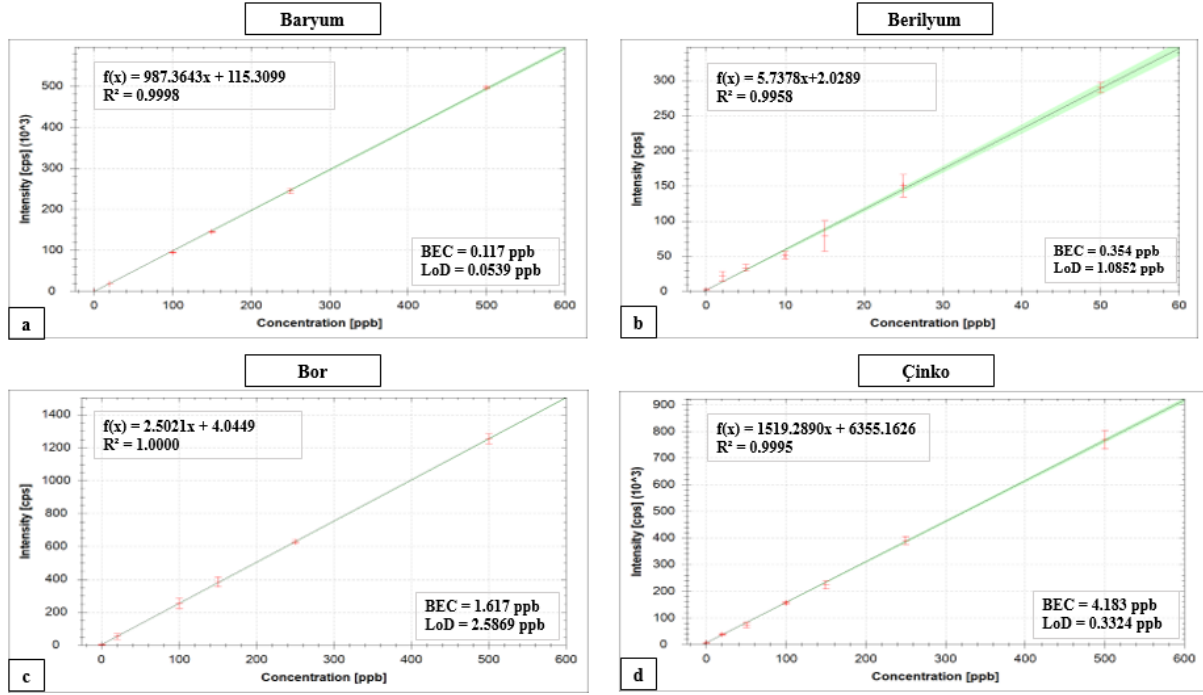
Tablo 4. 2 Gözlenebilirlik sınırı (LOD) ve ölçme sınırı (LOQ) değerleri (µg/L).

Metaller	LOD	LOQ
Al	7,3641	<15
Sb	0,0148	<1
As	0,0644	<1
Cu	0,0392	<15
Ba	0,0539	<15
Be	1,0852	<1
B	2,5869	<15
Zn	0,3324	<15
Fe	0,8971	<15
Cd	0,0053	<1
Pb	0,0056	<1
Cr	0,0171	<1
Mn	0,0381	<1
Ni	0,0148	<1
V	0,0086	<1

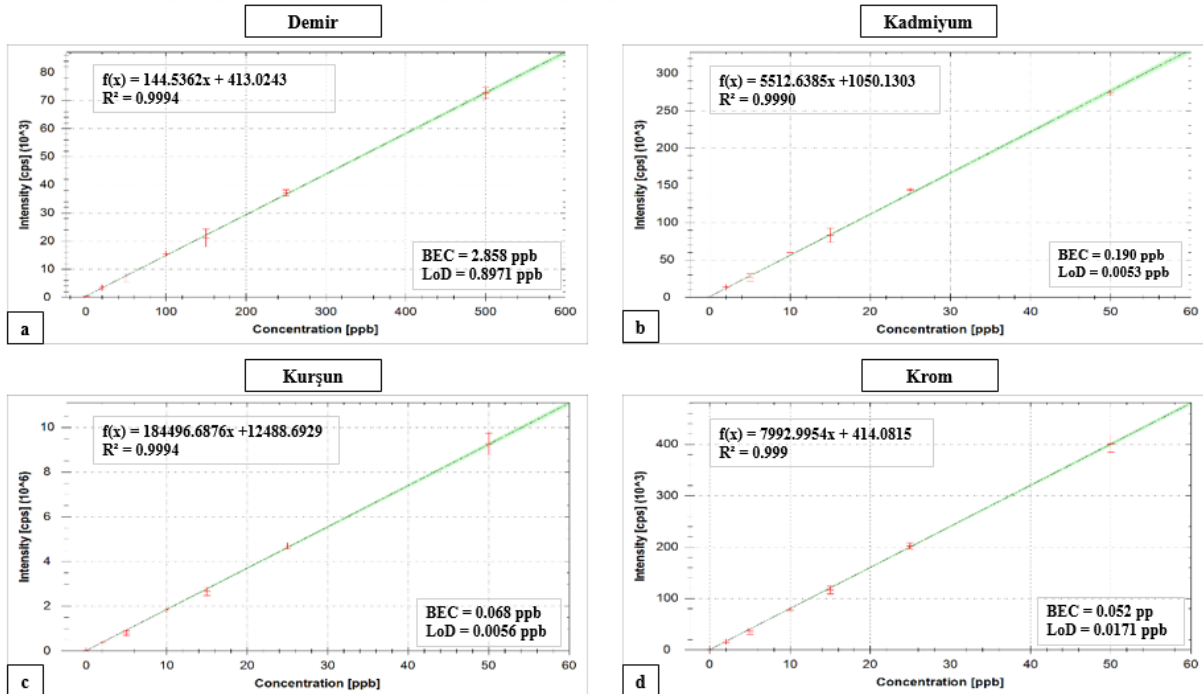
4.2.4 Kalibrasyon Eğrileri



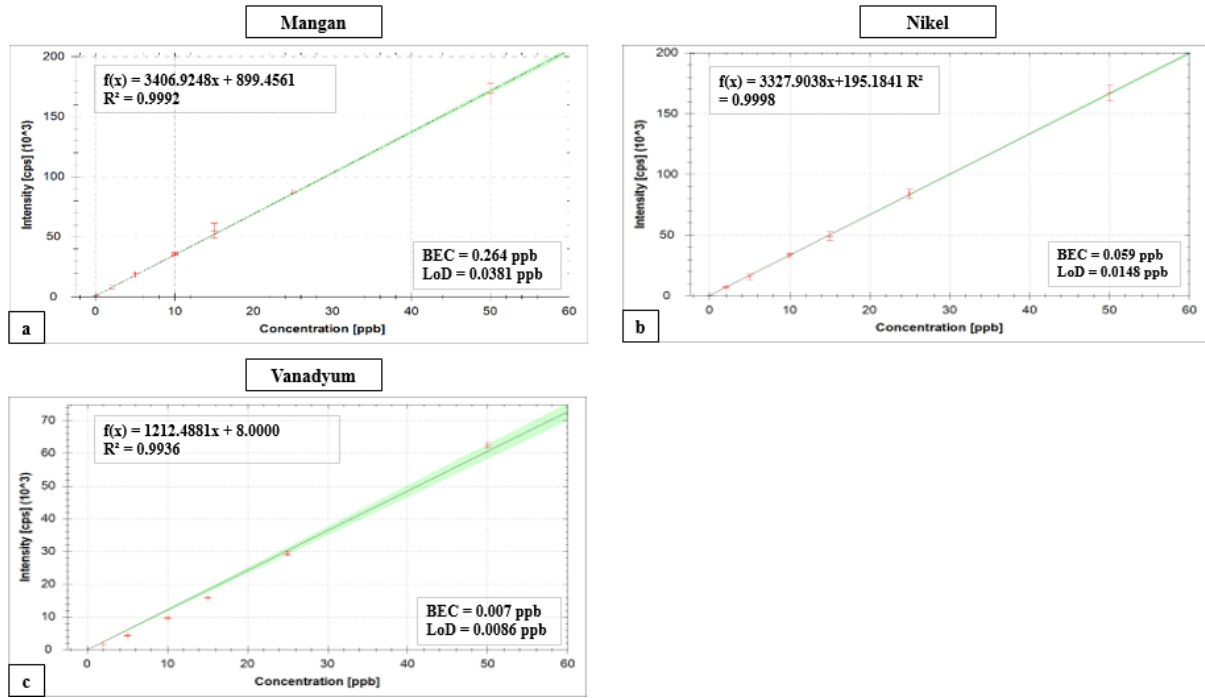
Şekil 4. 4 a) Alüminyum kalibrasyon eğrisi b) Antimon kalibrasyon eğrisi c) Arsenik kalibrasyon eğrisi d) Bakır kalibrasyon eğrisi



Şekil 4. 5 a) Baryum kalibrasyon eğrisi b) Berilyum kalibrasyon eğrisi c) Bor kalibrasyon eğrisi d) Çinko kalibrasyon eğrisi



Şekil 4. 6 a) Demir kalibrasyon eğrisi b) Kadmiyum kalibrasyon eğrisi c) Kurşun kalibrasyon eğrisi d) Krom kalibrasyon eğrisi



Şekil 4. 7 a) Mangan kalibrasyon eğrisi b) Nikel kalibrasyon eğrisi c) Vanadyum kalibrasyon eğrisi

4.3.Sağlık Risk Değerlendirmesi

Çalışma alanından elde edilecek veriler kullanılarak sağlık riskini tahmin etmek için risk değerlendirme çalışmaları yapılacaktır. Çalışma kapsamında sağlık riski değerlendirilirken tehlike tanımlama, maruz kalma değerlendirmesi ve risk karakterizasyonu adımları kullanılacaktır. İlk aşama olarak tehlike tanımlanacaktır. Bu aşama belirli toksik kirleticilerin hangi sağlık sorunlarına yol açtığını belirleme aşamasıdır. Bu çalışmada analiz edilen ağır metallerin toksik etkileri literatürde geniş çapta incelenmiş ve insan sağlığı üzerindeki potansiyel riskleri açıkça belgelenmiştir. Örneğin, arsenik (As) kanserojen bir metaldir ve uzun süreli maruziyet durumunda cilt, akciğer ve karaciğer kanserine yol açabilir. Kurşun (Pb) ise nörotoksik etkileri nedeniyle çocuklarda bilişsel bozukluklara neden olmaktadır [86]. Maruziyet değerlendirmesi, risk değerlendirmesinin ikinci adımıdır ve insanların ne kadar zehirli kirleticiye maruz kaldığını ve/veya kaç kişinin maruz kaldığını belirlemek için kullanılır. Maruziyet raporlaması aşamasında öncelikle söz konusu kirleticilere maruz kalınması sonucu kişinin kronik günlük alım miktarları belirlenecektir. Kanser riski ve kanserojen olmayan riskin belirlenmesinde USEPA tarafından önerilen eşitlikler kullanılacaktır. [87].

İnsanların içme suyunda bulunan ağır metallere maruziyeti, aşağıdaki formül kullanılarak Tahmini Günlük Alım (Estimated Daily Intake, EDI) olarak hesaplanacaktır [88]:

$$EDI = \frac{C \cdot IR \cdot EF \cdot ED}{BW \cdot AD}$$

C: Ağır metal konsantrasyonu ($\frac{mg}{L}$)

IR: Günlük içme suyu tüketim miktarı ($\frac{L}{gün}$; yetişkinler için 2 L, çocuklar için 1 L alınacaktır)

EF: Maruziyet sıklığı ($\frac{gün}{yıl}$; genellikle 365 gün)

ED: Maruziyet süresi (yıl; yetişkinler için 70 yıl, çocuklar için 6 yıl)

BW: Ortalama vücut ağırlığı (kg; yetişkinler için 70 kg, çocuklar için 15 kg)

AT: Ortalama süre (gün; kanserojenler için 70 yıl * 365 gün)

Maruziyet değerlendirmesi sonuçları kullanılarak risk karakterizasyonu yapılacaktır. Ağır metallerin sağlığa etkileri, Hedef Tehlike Katsayısı (HQ) ve Toplam Tehlike İndeksi (HI) hesaplanarak değerlendirilecektir [87, 88].

Kanserojen Olmayan Risk:

$$HQ = \frac{EDI}{RfD}$$

RfD (Referans Doz): USEPA veya EFSA tarafından belirlenen güvenli doz (mg /kg/gün)

Eğer birden fazla ağır metal değerlendirilmişse, toplam risk **HI (Toplam Tehlike İndeksi)** ile hesaplanacaktır:

$$H_i = \sum H_{Q_i}$$

$H_i < 1$ Kabul edilebilir risk

$H_i > 1$ Sağlık riski mevcut

Kanser Riski:

Kanserojen metaller için Kanser Riski (CR) şu şekilde hesaplanacaktır. Kanserojen olmayan sağlık riskleri için HQ şu şekilde hesaplanacaktır:

$$CR = EDI.SF$$

SF : Slope Factor $\left(\frac{mg}{kg \cdot gün}\right)^{-1}$; kanserojen potansiyeli belirler.

$CR > 1.10^{-6}$ (Kabul edilebilir riskin üzerindedir)

Risk değerlendirmesi aşamasında, maruziyet değerlendirmesi sonuçları ile USEPA tarafından yayınlanan doz-tepki değerlendirmesi sonuçları birlikte kullanılarak risk karakterizasyonu gerçekleştirilecektir. Hesaplamalar, ön izleme ve detaylı izleme dönemleri için; örnekleme noktası ve örnekleme dönemine bağlı olarak ayrı ayrı yapılacaktır. Ayrıca, vücut ağırlığı ve benzeri fizyolojik parametrelerin yaş gruplarına göre farklılık göstermesi nedeniyle, çocuklar ve yetişkinler için risk hesaplamaları ayrı ayrı yapılacaktır. Her iki yaş grubu için elde edilen tehlike katsayıları (HQ) toplanarak toplam kanserojen olmayan risk değeri hesaplanacak ve bu değer tehlike indeksi (HI) olarak ifade edilecektir. $HI > 1$ olması durumunda, kanserojen olmayan sağlık riski bulunduğu kabul edilecektirdeğerlendirilecektir[88]. Kanser riski hesaplamaları ise, EPA tarafından belirlenmiş olan limit değer (1×10^{-6}) ile karşılaştırılarak değerlendirilecektir [88,89].

5. BULGULAR VE TARTIŞMA

Günümüzde su ve su kaynakları, insanlık için hayati bir öneme sahiptir. Artan nüfus, hızlı kentleşme ve endüstriyel gelişmeler, su kaynakları üzerinde ciddi baskılar oluşturmakta ve bu kaynakları olumsuz etkilemektedir. Bu süreç, küresel ısınma ve iklim değişikliği ile birleşerek, sınırlı su kaynaklarının kirlenmesine yol açmaktadır. Su kirliliğinde en büyük risk faktörlerinden biri de ağır metal kirliliğidir. Ağır metaller; endüstriyel ve madencilik faaliyetlerinden kaynaklanan atıklar, tarımsal gübre ve pestisitler ile şehir içi altyapı sistemlerinde kullanılan ekipmanlardan kaynaklı olarak suya karışabilmektedir [90]. Bu nedenle hem ulusal hem de uluslararası düzeyde çeşitli kılavuzlar ve standart limit değerler belirlenmiştir. İçme suyu temininden sorumlu kamu kurumları, bu parametreler doğrultusunda düzenli denetim ve kontroller gerçekleştirerek halkın güvenli su ihtiyacını karşılamaya çalışmaktadır.

Dünya genelinde, içme suyu kaynaklarında ağır metal kirliliği vakaları bildirilmiştir [91–93]. Örneğin, ABD'nin Flint kentinde meydana gelen ve doğrudan ölümlerle sonuçlanan ağır metal kirliliği vakaları literatürde yer almaktadır [94]. Bu durum, içme suyunun hem kamu otoriteleri hem de akademik kurumlar tarafından sürekli izlenmesinin ve denetlenmesinin gerekliliğini ortaya koymaktadır. İçme sularının uluslararası standartlara ve kılavuzlara uygunluğu, toplum sağlığı açısından büyük önem taşımaktadır. İçme sularının uluslararası kılavuz ve standartlara uygun olması toplum sağlığı açısından önem arz etmektedir. Bu çalışmamızda da Malatya ili Battalgazi ve Yeşilyurt ilçelerine bağlı mahallelerde içme sularının ağır metal düzeylerinin araştırılması amaçlamıştır.

Literatür çalışmaları incelendiğinde,

Şavran ve Küçük (2022), ağır metallerin sucul canlılardaki birikimini ve besin zinciri aracılığıyla insanlara aktarımını değerlendirdikleri çalışmalarında, arsenik, kurşun, kadmiyum, çinko ve cıva gibi elementlerin midye, balık ve plankton gibi organizmalarda biyoakümülayasyona uğradığını, bunun da halk sağlığı üzerinde ciddi toksik etkiler oluşturduğunu vurgulamışlardır [26].

Kurt ve ark. (2022), Bursa ilinin kırsal bölgelerinde içme suyu amaçlı kullanılan 10 farklı kuyudan alınan su örneklerinde ağır metal seviyelerini incelemiştir. Numunelerdeki ortalama ağır metal düzeyleri ($\mu\text{g/L}$ cinsinden); Cu (183.40) > Fe (86.29) > Al (55.75) > Mn (20.2) > Cr

(7.33) > Cd (5) > Ni (2.54) > As (2.23) > Se (1.99) > Pb (1.55) > Hg (1) > Sb (0.70) > B (0.0002) şeklinde belirlenmiştir. Çalışmada hesaplanan Su Kalite İndeksi (WQI) değerleri tüm kuyular için <50 olup, Dünya Sağlık Örgütü (WHO, 2011) kriterlerine göre "mükemmel" su kalitesine işaret etmektedir. Ayrıca, Ağır Metal Kirliliği İndeksi (HPI <100) ve Ağır Metal Değerlendirme İndeksi (HEI <10) değerleri, su kaynaklarında sağlık açısından anlamlı bir kirlenme olmadığını göstermiştir. EPA kriterlerine göre de, tüm numunelerin maksimum kirlenici seviyeleri 0.01 mg/L'nin altında olup kanserojen risk taşımamaktadır [95].

Kobaza ve arkadaşları (2021), Aras Nehri'nden elde edilen tatlısu midyelerinde yaptıkları deneysel çalışmada, kurşun II asetat birikimini incelemiş ve 21 gün sonunda midye dokularında yüksek düzeyde kurşun biriktiğini raporlamışlardır. Bu türün indikatör organizma olarak değerlendirilebileceği belirtilmiştir [96].

Turanlı ve Gedik (2021), Akdeniz kıyılarından alınan midyelerde (*Mytilus galloprovincialis*) As, Cd, Cr, Cu, Pb ve Zn düzeylerini analiz etmiş; özellikle arsenik için çocuklarda %97'ye varan kanser riski belirlenmiştir. Monte Carlo simülasyonu ile risk düzeyleri kantitatif olarak hesaplanmıştır [97].

Özvar (2020), İskenderun Körfezi'nden elde edilen farklı balık türlerinin karaciğer, kas ve solungaç dokularında Cr, Ni, Cu, Zn, As, Cd, Pb ve Fe konsantrasyonlarını karşılaştırmalı olarak analiz etmiş; metallere göre dokular arasında belirgin birikim farkları olduğunu ortaya koymuştur [98].

Yerli ve ark. (2020), ağır metallerin toprak, bitki, su ve insan sağlığı üzerindeki etkilerini incelemiştir. Artan sanayileşme ve kentleşme sonucu çevreye yayılan ağır metaller; toprak verimliliğini düşürmekte, bitki fizyolojisini bozmakta ve besin zinciri yoluyla insan sağlığını tehdit etmektedir. Toprak pH'ı, organik madde içeriği gibi etkenler metallerin toksisitesini belirlemekte; bitkilerde çimlenme, fotosentez ve büyüme süreçleri olumsuz etkilenmektedir. İnsanlarda ise arsenik, kurşun, kadmiyum gibi metaller ciddi sağlık sorunlarına yol açmaktadır. Çalışma, fitoremediasyon gibi çevre dostu arıtım yöntemlerini ve ağır metal kirliliğinin izlenmesini önermektedir [99].

Sökmen ve arkadaşları (2018), Karasu Irmağı'ndan elde ettikleri siraz balığı örneklerinde, özellikle karaciğer dokusunda Al, As, Cr, Fe, Mn, Ni, Pb ve Zn gibi metallerin yüksek oranlarda biriktiğini saptamışlardır. Kaynağın tarımsal ve evsel atıklar olduğu vurgulanmıştır [100].

Yılmaz ve ark. (2017) Şişelenmiş kaynak suları ile Düzce şebeke suyunu ağır metal içeriği açısından karşılaştırmıştır. Tüm numunelerin ağır metal düzeylerinin yönetmeliklere göre düşük olduğunu, ticari su ağır metal düzeyi ortalaması ile musluk suyu örneklerinin ağır metal düzeyi ortalaması karşılaştırıldığında ise ticari su numunelerinde özellikle bor (B), alüminyum (Al), krom (Cr), mangan (Mn), demir (Fe), nikel (Ni), arsenik (As), stronsiyum (Sr), molibden (Mo), kadmiyum (Cd), civa (Hg) ve kurşun (Pb) seviyelerinin musluk sularına göre anlamlı düzeyde düşük bulunduğunu belirtmiştir [101].

Yaşar ve ark. (2016) Mardin ili genelinde bulunan içme sularında ağır metal analizi yapmış, Mn için yapılan analizler sonucunda elde edilen değerlerin TS.266 standartlarına göre yüksek olduğunu, Co için bakıldığında 3 nokta hariç standartların üzerinde olduğunu, Zn ve Cu konsantrasyonlarının standartların altında olduğunu tespit etmiştir [14].

Kurt ve arkadaşları (2015), Sivas ili Hafik ilçesine bağlı Pirhüseyin ve Yalınca köyleri çevresinde gerçekleştirdikleri çalışmada, yüzey ve yeraltı su kaynaklarında arsenik kirliliğini değerlendirmişlerdir. İnceleme kapsamında alınan 29 su örneğinin analiz sonuçlarına göre, 9 örnekte arsenik seviyelerinin Dünya Sağlık Örgütü tarafından içme suyu için önerilen 10 µg/L sınır değerini aştığı belirlenmiştir. En yüksek arsenik konsantrasyonunun ise Yalınca Köyü'nün içme suyu şebekesinden elde edilen örnekte 1064 µg/L olarak tespit edildiği bildirilmiştir. Araştırma bulguları, söz konusu arsenik kontaminasyonunun kaynağının jeolojik kökenli olduğunu, çevresel ya da insan faaliyetlerine bağlı antropojenik bir kirlilik unsurunun belirlenmediğini ortaya koymuştur [102].

Poyraz (2014), Türkiye'nin farklı bölgelerinden alınan 15 içme suyu örneğinde ICP-MS yöntemiyle ağır metal analizleri gerçekleştirmiştir. Çalışmada Al, V, Cr, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, Se, Mo, Pb gibi metallerin konsantrasyonları değerlendirilmiş; sonuçlar Dünya Sağlık Örgütü (WHO) ve ABD Çevre Koruma Ajansı (USEPA) tarafından önerilen sınır değerlerle karşılaştırılmıştır. Bölgesel analizlerde Marmara bölgesinde Mn, Cu ve Pb; Ege bölgesinde ise V, Zn ve Mo elementlerinin görece yüksek seviyelerde bulunduğu raporlanmıştır. Ancak tüm ölçümlerin yasal sınırların altında olduğu, dolayısıyla analiz edilen içme sularının genel olarak birinci sınıf su kalitesine sahip olduğu belirtilmiştir. Bu çalışma, içme suyundaki inorganik kirlleticilerin düzenli izlenmesinin halk sağlığı açısından önemini vurgulamaktadır [24].

Yılmaz ve ark. (2014), Düzce Konuralp bölgesindeki farklı kaynaklardan elde edilen içme sularının (şebeke suyu, doğal kaynak suyu ve Zemzem suyu) kimyasal iyon ve ağır metal

içeriklerini karşılaştırmıştır. Çalışmada alınan örneklerde iyon (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-} vb.) ve ağır metal (Al, Fe, V, Pb vb.) analizleri yapılmış, elde edilen veriler EPA ve WHO standartlarıyla karşılaştırılmıştır. Konuralp şebeke suyu örneğinde alüminyum ($441 \mu\text{g/L}$) ve demir ($305.5 \mu\text{g/L}$) düzeyleri EPA-WHO sınırlarını aşmıştır. Buna karşın, şişelenmiş doğal kaynak suyu örneklerinde tüm değerler sınırlar içerisinde bulunmuştur. Zemzem suyu, Ca^{2+} ve Mg^{2+} bakımından yüksek olmakla birlikte bu iyonlar sınır değerleri aşmamıştır. Ancak, Zemzem örneğindeki nitrat (37.7 mg/L) ve vanadyum ($19 \mu\text{g/L}$) değerleri diğer örneklerden daha yüksek bulunmuştur; vanadyum EPA-WHO sınırını aşmıştır. Çalışma, suyun içeriğinin kaynağına ve çevresel faktörlere bağlı olarak değişebileceğini ortaya koymakta; içme suyu analizlerinin yerel yönetimlerce periyodik olarak yapılmasının gerekliliğini vurgulamaktadır [103].

Kahraman ve ark. (2012), Bitlis il merkezi ve ilçelerinden sonbahar ve ilkbahar dönemlerinde toplanan 164 içme suyu örneğinde Fe, Mn, Cu, Zn, Cd, Ni, Pb ve Co düzeylerini analiz etmiştir. Alevli atomik absorpsiyon spektrofotometresi ile yapılan ölçümlerde, Fe, Mn, Cu, Zn ve Cd düzeyleri standartlarla uyumlu bulunmuştur. Buna karşılık, Pb ve Co her iki mevsimde, Ni ise ilkbaharda sınır değerlerin üzerinde tespit edilmiştir. Ayrıca bazı element düzeylerinin mevsimsel olarak anlamlı farklılık gösterdiği belirlenmiştir ($p < 0.05$). Çalışma, su kalitesinin mevsimsel olarak değişebileceğini göstermekte; su kaynaklarının korunması ve içme suyunun düzenli analizinin halk sağlığı açısından önemini vurgulamaktadır [104].

Atasoy ve ark. (2011) çalışmasında, Van şehir merkezinden alınan 100 içme ve musluk suyu örneğinde kurşun, kadmiyum, çinko, demir, mangan gibi ağır metaller ile bazı makro elementlerin düzeyleri Atomik Absorpsiyon Spektrometresi ile analiz edilmiştir. Bulgulara göre, tüm örneklerde kurşun seviyeleri ulusal ve uluslararası sınırların üzerinde bulunmuştur. Kadmiyum bazı örneklerde WHO limitini aşarken, diğer elementler genel olarak standartlarla uyumlu bulunmuştur. Yazarlar, özellikle kurşun kirliliğinin potansiyel kaynakları olarak şebeke boruları ve çevresel faktörleri işaret etmiş; düzenli izleme ve altyapı önlemleri alınması gerektiğini vurgulamışlardır [105].

Fallahzadeh ve arkadaşları (2017) tarafından İran'ın Ardakan, Meibod, Abarkouh ve Bafgh şehirlerinde yürütülen çalışmada, toplam 39 su kuyusu ve 5 su deposunda As, Cd, Cr, Cu, Fe, Hg, Mn, Ni, Pb ve Zn gibi ağır metallerin varlığı araştırılmıştır. Araştırmada risk değerlendirmesi amacıyla duyarlılık analizi yapılmış ve en etkili parametrelerin belirlenmesi hedeflenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, 39 kuyudaki tüm metallerin (yalnızca 3 vakada

demir hariç) konsantrasyonları USEPA, WHO ve İran Kirlilik Kontrol Dairesi tarafından belirlenen standartlara ulaşmıştır. Kanserojen olmayan tehlike için hesaplanan HQ (Health Quotient – Sağlık Kalitesi) değerleri, kabul edilebilir bir risk düzeyine işaret etmiştir. Duyarlılık analizleri, kanserojen risk açısından metal konsantrasyonu ve bireylerin ortalama vücut ağırlığının (BW) en önemli etkenler olduğunu ortaya koymuştur[106].

Ghaderpoori ve arkadaşları (2018) tarafından gerçekleştirilen başka bir çalışmada ise, İran'ın Khorramabad şehrinde içme sularında bulunan ağır metal konsantrasyonları ile su kalitesi indeksleri (HPI – Ağır Metal Kirlilik İndeksi ve HEI – Ağır Metal Değerlendirme İndeksi) incelenmiştir. Şehir dağıtım sistemine göre belirlenen 45 örnekleme noktasından içme suyu numuneleri toplanmıştır. Analiz sonucunda Zn, Pb, Cd, Cr ve Cu için HPI ve HEI değerleri sırasıyla 46.58 olarak hesaplanmıştır. Bu sonuçlar doğrultusunda Khorramabad şehir içme suyunun ağır metaller açısından iyi kalitede olduğu bildirilmiştir[107].

Cipriani-Avila ve arkadaşları (2020), Ekvador'a bağlı Quito, Ibarra ve Guayaquil şehirlerinde yürüttükleri çalışmada içme suyu kalitesini çoklu element analizi ve HPI ile değerlendirmiştir. Çalışma kapsamında 102 içme suyu ve 6 doğal kaynak suyu numunesi toplanarak analiz edilmiştir. Elde edilen bulgular, su kalitesinin yerel ve uluslararası standartlara genel olarak uygun olduğunu göstermiştir. Üç şehirdeki mahalleler arasında su kalitesinde önemli bir farklılık saptanmamıştır. Ancak alınan numunelerin %2,8'inde, WHO tarafından belirlenen kurşun sınır değerlerinin üzerinde konsantrasyonlar tespit edilmiştir. Bu nedenle, ülke genelinde içme suyu altyapısının – özellikle tesisat sistemlerinin – yaşı ve yapısal kalitesi bakımından değerlendirilmesi önerilmiştir [108].

Fisher ve arkadaşları (2021) ise Gana, Mali ve Nijer gibi düşük ve orta gelirli ülkelerin kırsal bölgelerinde gerçekleştirdikleri çalışmada, 261 su sistemi (el pompaları ve musluklar) üzerinden alınan su numunelerini analiz etmişlerdir. Elde edilen bulgulara göre, numunelerin %82'sinde kurşun, %72'sinde ise pirinç alaşımları IPC (Uluslararası Tesisat Kanunu) sınırlarını aşmıştır. Ayrıca, pirinç alaşımlarının içme suyu örneklerindeki kurşun konsantrasyonunu yaklaşık 3,8 kat artırdığı belirlenmiştir[92].

Smedley ve Kinniburgh'un (2002) yürüttüğü kapsamlı derleme çalışmasında, başta Bengal Havzası olmak üzere, Bangladeş, Hindistan'ın Batı Bengal bölgesi, Vietnam, Çin, Meksika, Şili, Macaristan ve Arjantin gibi ülkelerdeki belirli yeraltı suyu rezervlerinin yüksek arsenik konsantrasyonlarına sahip olduğu ortaya konulmuştur. Araştırmada, bu bölgelerde milyonlarca

insanın arsenik açısından kirlenmiş yeraltı sularını içme suyu kaynağı olarak kullandığı ve bu durumun ciddi halk sağlığı sorunlarına neden olabileceği vurgulanmıştır. Özellikle Bengal Havzası'nda kontaminasyonun oldukça yaygın ve yoğun olduğu, bu durumdan doğrudan etkilenen nüfusun 40 milyondan fazla olduğu bildirilmiştir. Ayrıca, arsenik içeriği yüksek yeraltı sularının çoğunlukla jeotermal aktivitenin görüldüğü, sülfürlü minerallerin oksidasyona uğradığı ve madencilik faaliyetlerinin yoğun olduğu alanlarda bulunduğu belirtilmiştir [20].

Dünya genelinde ve ülkemizde yapılan araştırmalara dayanan literatür çalışmaları incelendiğinde, farklı şehirlerdeki içme suyu örneklerinde ve deniz ile göletlerde yaşayan sucul canlılarda ağır metal konsantrasyonlarının yüksek olduğu rapor edilmiştir. Bu çalışmalar, ağır metal kirliliğinin hem insan sağlığı hem de çevre sağlığı açısından ciddi bir tehdit oluşturduğunu ortaya koymakta ve bu durumu engellemek için önleyici tedbirlerin alınması gerektiğini vurgulamaktadır. [14,95,100,101,103,105,106]. Ağır metal konsantrasyonlarındaki artışın başlıca nedenleri arasında içme suyu kaynaklarının endüstriyel, tarımsal veya evsel faaliyetlerle kirlenmesi, eskiyen altyapı ve taşıma sistemleri ile içme suyu tesisatlarındaki korozyon yer almaktadır [104,108]. Bu bağlamda, özellikle musluk sularının ve içme suyu kaynaklarının düzenli olarak denetlenmesi ve kontrol altında tutulmasının önemi literatürde sıkça vurgulanmaktadır[103]. Yapılan çalışmamız sonucunda elde edilen verilere göre, Malatya iline bağlı Yeşilyurt ilçesindeki çeşme suları, analiz edilen ağır metaller açısından herhangi bir sağlık riski taşımamaktadır. Ancak Battalgazi ilçesine bağlı Gülümuşığı, Hisarteppe, Meydancık, Şişman ve Uluköy mahallelerinde elde edilen bulgular doğrultusunda belirli ağır metaller yönünden potansiyel riskler tespit edilmiş ve bu durum, aşağıdaki bölümlerde detaylı şekilde değerlendirilmiştir.

Tablo 5. 1 Ekim Ayı Ağır Metal değerleri (µg/L).

Ağır Metaller	Bağtepe Mahallesi	Çolaklı Mahallesi	Çolakoğlu Mahallesi	Gülümuşağı Mahallesi	Hisar-tepe Mahallesi	Kuluşağı Mahallesi-1	Kuluşağı Mahallesi-2	Meydanlık Mahallesi	Şişman Mahallesi	Tanışık Mahallesi	Uluköy Mhallesi	Merkez Kaptaj
(Al)	< 15	< 15	< 15	< 15	< 15	< 15	< 15	< 15	15,06	< 15	< 15	< 15
(Sb)	< 1.0	< 1.0	< 1.0	< 1.0	< 1.0	< 1.0	< 1.0	3,945	1,663	1,663	1,663	1,663
(As)	< 1.0	2,863	< 1.0	< 1.0	67,94	3,279	1,232	29,33	96,53	1,219	1,884	1,252
(Cu)	< 15	< 15	< 15	< 15	< 15	< 15	< 15	2,075	< 15	< 15	30,17	< 15
(Ba)	21,18	58,05	338,4	138,9	17,09	157,7	837,5	26,45	< 15	16,76	72,98	17,58
(Be)	< 1.0	< 1.0	< 1.0	< 1.0	< 1.0	< 1.0	< 1.0	< 1.0	< 1.0	< 1.0	< 1.0	< 1.0
(B)	20,7	47,43	70,73	1886	434,7	51,08	65,76	53,6	56,69	19,41	1446	< 15
(Zn)	< 15	< 15	33,23	24,24	44,17	197,7	89,56	72,04	61,5	< 15	30,58	18,94
(Fe)	< 15	19,31	< 15	< 15	15,3	24,95	< 15	16,08	22,27	< 15	< 15	18,12
(Cd)	< 1.0	< 1.0	< 1.0	< 1.0	< 1.0	< 1.0	< 1.0	< 1.0	< 1.0	< 1.0	< 1.0	< 1.0
(Pb)	< 1.0	< 1.0	< 1.0	< 1.0	< 1.0	< 1.0	< 1.0	< 1.0	1,155	1,155	< 1.0	< 1.0
(Cr)	< 1.0	2,202	1,315	< 1.0	< 1.0	< 1.0	< 1.0	< 1.0	< 1.0	< 1.0	< 1.0	< 1.0
(Mn)	< 1.0	< 1.0	< 1.0	< 1.0	< 1.0	8,086	< 1.0	< 1.0	< 1.0	< 1.0	3,18	< 1.0
(Ni)	< 1.0	< 1.0	< 1.0	< 1.0	1,529	< 1.0	< 1.0	< 1.0	1,67	1,67	< 1.0	< 1.0
(V)	13,03	12,48	4,414	< 1.0	1,371	13,13	13,41	1,858	13,02	5,37	1,618	< 1.0

Tablo 5. 2 Kasım Ayı Ağır Metal değerleri (µg/L).

[illegible]

(Cd)	< 1.0	< 1.0	< 1.0	< 1.0	< 1.0	< 1.0	< 1.0	< 1.0	< 1.0	< 1.0	< 1.0	< 1.0
(Pb)	< 1.0	< 1.0	< 1.0	< 1.0	< 1.0	< 1.0	< 1.0	< 1.0	< 1.0	< 1.0	< 1.0	< 1.0
(Cr)	< 1.0	< 1.0	1,379	< 1.0	< 1.0	< 1.0	< 1.0	< 1.0	< 1.0	1,053	< 1.0	< 1.0
(Mn)	< 1.0	6,047	< 1.0	1,145	1,196	3,174	< 1.0	< 1.0	< 1.0	< 1.0	3,207	< 1.0
(Ni)	< 1.0	< 1.0	< 1.0	< 1.0	< 1.0	< 1.0	< 1.0	< 1.0	< 1.0	< 1.0	< 1.0	< 1.0
(V)	11,03	5,727	5,173	< 1.0	< 1.0	9,049	10,02	1,613	7,905	4,004	1,636	< 1.0

Tablo 5. 3 Aralık Ayı Ağır Metal değerleri (µg/L).

Ağır Metaller	Bağtepe Mahallesi	Çolaklı Mahallesi	Çolakoğlu Mahallesi	Gülümuşuğu Mahallesi	Hisartepe Mahallesi	Kuluşuğu Mahallesi-1	Kuluşuğu Mahallesi-2	Meydanlık Mahallesi	Şişman Mahallesi	Tanışık Mahallesi	Uluköy Mahallesi	Merkez Kaptaj
(Al)	< 15	< 15	< 15	< 15	< 15	< 15	< 15	< 15	< 15	< 15	< 15	< 15
(Sb)	< 1.0	< 1.0	< 1.0	< 1.0	< 1.0	< 1.0	< 1.0	3,607	< 1.0	< 1.0	< 1.0	< 1.0
(As)	< 1.0	< 1.0	< 1.0	< 1.0	56,75	< 1.0	1,033	25,72	40,09	< 1.0	< 1.0	< 1.0
(Cu)	< 15	< 15	< 15	< 15	< 15	< 15	< 15	1,473	< 15	< 15	< 15	< 15
(Ba)	22,6	< 15	15,45	121,7	32,24	115,7	725,1	37,14	41,75	< 15	56,71	129,6
(Be)	< 1.0	< 1.0	< 1.0	< 1.0	< 1.0	< 1.0	< 1.0	< 1.0	< 1.0	< 1.0	< 1.0	< 1.0
(B)	16,09	16,95	< 15	813,9	303,6	33,74	78,84	39,07	15,17	17,36	914,1	< 15
(Zn)	< 15	< 15	19,95	101,9	48,29	482,1	69,48	42,74	37,64	23,31	32,41	< 15
(Fe)	< 15	79,93	79,91	23,65	< 15	< 15	< 15	< 15	< 15	< 15	< 15	< 15
(Cd)	< 1.0	< 1.0	< 1.0	< 1.0	< 1.0	< 1.0	< 1.0	< 1.0	< 1.0	< 1.0	< 1.0	< 1.0
(Pb)	< 1.0	< 1.0	< 1.0	< 1.0	< 1.0	< 1.0	< 1.0	< 1.0	< 1.0	< 1.0	< 1.0	< 1.0
(Cr)	< 1.0	2,553	1,831	< 1.0	< 1.0	< 1.0	< 1.0	< 1.0	< 1.0	< 1.0	< 1.0	< 1.0
(Mn)	< 1.0	< 1.0	< 1.0	12,09	15,64	4,154	< 1.0	2,463	2,463	< 1.0	1,988	< 1.0
(Ni)	< 1.0	5,75	6,493	< 1.0	< 1.0	< 1.0	< 1.0	< 1.0	< 1.0	< 1.0	< 1.0	< 1.0
(V)	11,36	8,778	1,01	< 1.0	< 1.0	7,373	10,05	1,578	8,388	3,386	1,522	< 1.0

Tablo 5. 4 Ocak Ayı Ağır Metal değerleri (µg/L).

Ağır Metaller	Bağtepe Mahallesi	Çolaklı Mahallesi	Çolakoglu Mahallesi	Gülümuşuğu Mahallesi	Hisartepe Mahallesi	Kuluşuğu Mahallesi-1	Kuluşuğu Mahallesi-2	Meydancık Mahallesi	Şişman Mahallesi	Tanışık Mahallesi	Uluköy Mahallesi	Merkez Kaptaj
(Al)	< 15	< 15	< 15	-	< 15	< 15	< 15	< 15	< 15	< 15	< 15	< 15
(Sb)	< 1.0	< 1.0	< 1.0	-	< 1.0	< 1.0	< 1.0	3,806	< 1.0	< 1.0	< 1.0	< 1.0
(As)	2,767	< 1.0	< 1.0	-	58,54	< 1.0	1,058	27,58	39,89	< 1.0	1,202	< 1.0
(Cu)	< 15	< 15	< 15	-	< 15	< 15	< 15	2,405	< 15	< 15	< 15	< 15
(Ba)	106,1	< 15	337,2	-	< 15	110,4	605	17,07	< 15	19,04	51,65	< 15
(Be)	< 1.0	< 1.0	< 1.0	-	< 1.0	< 1.0	< 1.0	< 1.0	< 1.0	< 1.0	< 1.0	< 1.0
(B)	< 15	< 15	70,82	-	270	34,18	46,39	38,07	16,39	35,52	647,5	< 15
(Zn)	< 15	29,29	25,14	-	< 15	92,61	81,74	63,42	< 15	< 15	37,16	< 15
(Fe)	< 15	< 15	< 15	-	< 15	16,74	< 15	< 15	< 15	< 15	< 15	< 15
(Cd)	< 1.0	< 1.0	< 1.0	-	< 1.0	< 1.0	< 1.0	< 1.0	< 1.0	< 1.0	< 1.0	< 1.0
(Pb)	< 1.0	< 1.0	< 1.0	-	< 1.0	1,46	< 1.0	< 1.0	< 1.0	< 1.0	< 1.0	< 1.0
(Cr)	< 1.0	1,086	1,531	-	< 1.0	< 1.0	< 1.0	< 1.0	< 1.0	< 1.0	< 1.0	< 1.0
(Mn)	< 1.0	< 1.0	< 1.0	-	1,468	2,261	< 1.0	< 1.0	< 1.0	< 1.0	< 1.0	< 1.0
(Ni)	< 1.0	< 1.0	< 1.0	-	1,095	< 1.0	< 1.0	< 1.0	< 1.0	< 1.0	1,618	< 1.0
(V)	< 1.0	9,87	5,777	-	< 1.0	8,805	11,94	1,755	6,985	3,071	1,903	< 1.0

Tablo 5. 5 Şubat Ayı Ağır Metal değerleri (µg/L).

Ağır Metaller	Bağtepe Mahallesi	Çolaklı Mahallesi	Çolakoglu Mahallesi	Gülümuşuğu Mahallesi	Hisartepe Mahallesi	Kuluşuğu Mahallesi-1	Kuluşuğu Mahallesi-2	Meydancık Mahallesi	Şişman Mahallesi	Tanışık Mahallesi	Uluköy Mahallesi	Merkez Kaptaj
(Al)	24,21	< 15	< 15	-	-	< 15	64,23	< 15	-	< 15	< 15	< 15
(Sb)	< 1.0	< 1.0	< 1.0	-	-	< 1.0	< 1.0	4,484	-	< 1.0	< 1.0	< 1.0
(As)	1,126	2,228	< 1.0	-	-	1,368	2,112	31,01	-	< 1.0	1,744	< 1.0
(Cu)	< 15	< 15	< 15	-	-	< 15	< 15	4,258	-	< 15	< 15	< 15
(Ba)	60,75	< 15	43,52	-	-	< 15	59,14	< 15	-	< 15	< 15	17,03
(Be)	< 1.0	< 1.0	< 1.0	-	-	< 1.0	< 1.0	< 1.0	-	< 1.0	< 1.0	< 1.0
(B)	19,14	32,75	68,68	-	-	66,91	45,81	40,27	-	< 15	801,5	< 15
(Zn)	24,6	< 15	21,24	-	-	222,9	72,99	71,67	-	< 15	19,85	16,97
(Fe)	26,59	< 15	< 15	-	-	23,19	< 15	< 15	-	< 15	< 15	15,57

(Cd)	< 1.0	< 1.0	< 1.0	-	-	< 1.0	< 1.0	< 1.0	-	< 1.0	< 1.0	< 1.0
(Pb)	< 1.0	< 1.0	< 1.0	-	-	< 1.0	< 1.0	< 1.0	-	< 1.0	< 1.0	< 1.0
(Cr)	1,714	1,585	1,533	-	-	< 1.0	< 1.0	< 1.0	-	< 1.0	< 1.0	< 1.0
(Mn)	1,544	< 1.0	< 1.0	-	-	3,297	< 1.0	< 1.0	-	< 1.0	< 1.0	< 1.0
(Ni)	2,064	< 1.0	< 1.0	-	-	< 1.0	< 1.0	< 1.0	-	< 1.0	< 1.0	< 1.0
(V)	11,66	7,392	5,219	-	-	6,853	11,54	1,202	-	2,425	1,62	< 1.0

Tablo 5. 6 Mart Ayı Ağır Metal değerleri (µg/L).

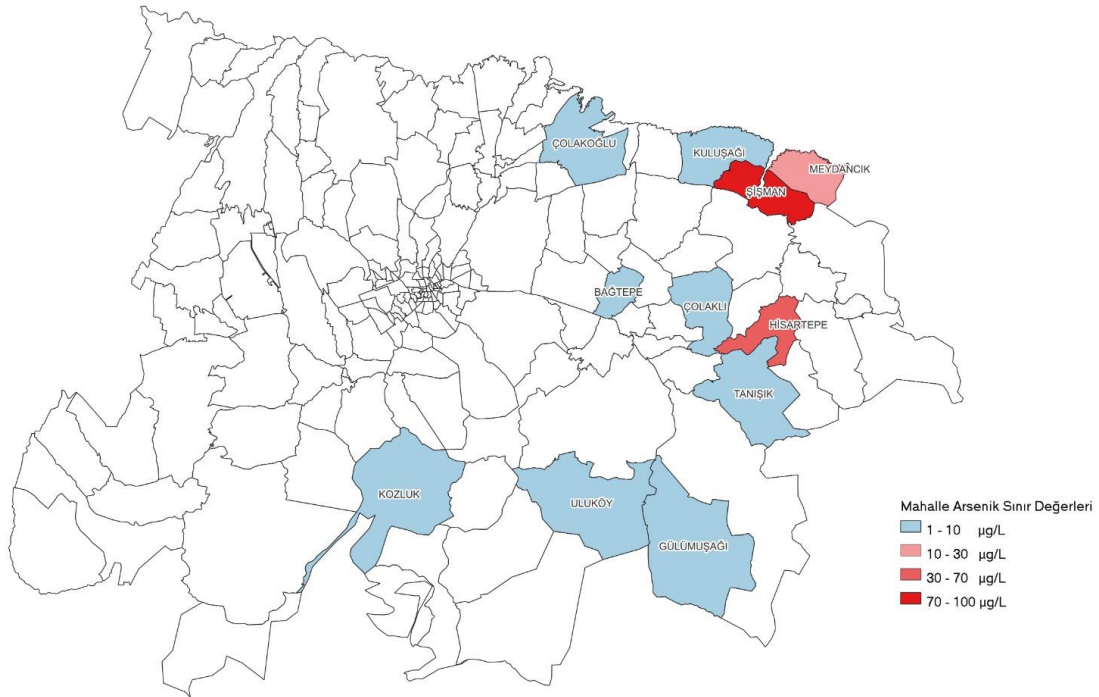
Ağır Metaller	Bağtepe Mahallesi	Çolaklı Mahallesi	Çolakoglu Mahallesi	Gülümuşuğu Mahallesi	Hisartepe Mahallesi	Kuluşuğu Mahallesi-1	Kuluşuğu Mahallesi-2	Meydancı Mahallesi	Şişman Mahallesi	Tanışık Mahallesi	Ulu köy Mahallesi	Merkez Kaptaj
(Al)	< 15	< 15	-	-	< 15	-	-	< 15	< 15	-	-	< 15
(Sb)	< 1.0	< 1.0	-	-	< 1.0	-	-	1,675	< 1.0	-	-	< 1.0
(As)	< 1.0	< 1.0	-	-	54,83	-	-	14,28	41,74	-	-	< 1.0
(Cu)	< 15	< 15	-	-	< 15	-	-	1,884	< 15	-	-	< 15
(Ba)	< 15	< 15	-	-	< 15	-	-	< 15	< 15	-	-	< 15
(Be)	< 1.0	< 1.0	-	-	< 1.0	-	-	< 1.0	< 1.0	-	-	< 1.0
(B)	19,22	< 15	-	-	296,9	-	-	86,46	16,05	-	-	< 15
(Zn)	< 15	45,45	-	-	< 15	-	-	53,58	< 15	-	-	< 15
(Fe)	< 15	33,01	-	-	15,3	-	-	< 15	< 15	-	-	< 15
(Cd)	< 1.0	< 1.0	-	-	< 1.0	-	-	< 1.0	< 1.0	-	-	< 1.0
(Pb)	< 1.0	< 1.0	-	-	< 1.0	-	-	< 1.0	< 1.0	-	-	< 1.0
(Cr)	< 1.0	< 1.0	-	-	< 1.0	-	-	< 1.0	< 1.0	-	-	< 1.0
(Mn)	< 1.0	< 1.0	-	-	1,44	-	-	< 1.0	< 1.0	-	-	< 1.0
(Ni)	< 1.0	1,366	-	-	< 1.0	-	-	< 1.0	< 1.0	-	-	< 1.0
(V)	9,394	6,607	-	-	< 1.0	-	-	1,601	7,642	-	-	< 1.0

Bu bağlamda, çalışmamızda Malatya ili Battalgazi ve Yeşilyurt ilçelerine bağlı mahallelerdeki içme sularında ağır metal düzeylerinin araştırılması amaçlanmıştır. Elde edilen veriler, literatürde belirtilen bazı ulusal ve uluslararası kılavuz, standart ve limit değerlerle karşılaştırılmıştır. Bu kapsamda kullanılan referanslar arasında İnsani Tüketim Amaçlı Sular Hakkında Yönetmelik (İTASHY), ABD Çevre Koruma Ajansı (EPA), Avrupa Birliği İçme Suyu Direktifi (EC, 2000) ve Dünya Sağlık Örgütü (WHO, 2011) kılavuz değerleri yer almakta olup, bu değerler Tablo 5.7’de sunulmuştur. [86].

Tablo 5. 7 Ulusal ve uluslararası standart, limit ve klavuz değerlerle karşılaştırma (mg/L)

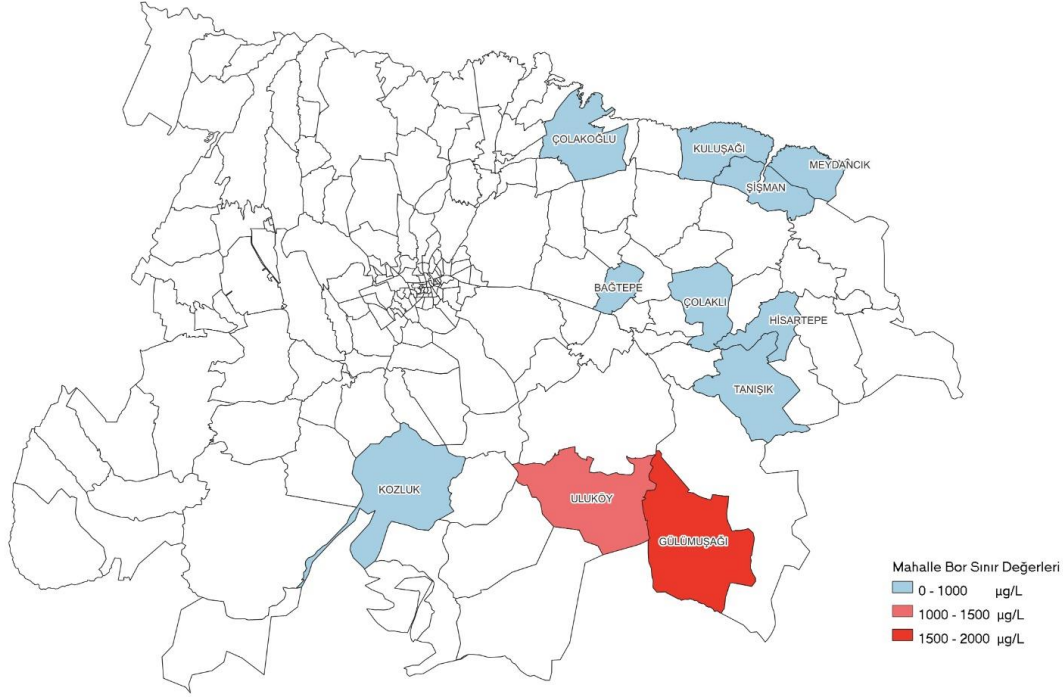
Metaller	İTASHY	EPA	EC	WHO
Al	0,2	0,2	0,2	0,2
Sb	0,005	0,06	0,005	0,005
As	0,01	0,010	0,010	0,01
Cu	2	1,3	2	2
Ba	-	2	-	0,3
Be	-	0,004	-	-
B	1	-	1	0,3
Zn	-	5	-	3
Fe	0,2	0,3	0,2	-
Cd	0,005	0,005	0,005	0,003
Pb	0,01	0,015	0,010	0,01
Cr	0,05	0,1	0,050	0,05
Mn	0,05	0,05	0,05	0,5
Ni	0,02	0,02	0,02	0,02
V	-	-	-	-

Mahalle Bazlı Arsenik Tematik Haritası



Şekil 4. 8 Mahalle Bazlı Arsenik Tematik Haritası

Mahalle Bazlı Bor Tematik Haritası



Şekil 4. 9 Mahalle Bazlı Bor Tematik Haritası

Malatya ili içme suyu kalitesine ilişkin yapılan değerlendirmelerde, özellikle Şişman, Hisartepe ve Meydancık mahallelerinde arsenik; Gülümüşağı ve Uluköy mahallelerinde ise bor konsantrasyonlarının ulusal ve uluslararası sınır değerleri aşacak düzeyde olduğu belirlenmiştir. Şişman Mahallesi'nde yıl boyunca gerçekleştirilen düzenli ölçümler, arsenik düzeyinin sürekli olarak İTASHY, EPA, EC ve WHO tarafından belirlenen 10 µg/L'lik sınırın üzerinde seyrettiğini ortaya koymuştur. Özellikle Ekim ayında ölçülen 96 µg/L'lik değer, tüm referans limitlerin yaklaşık 10 katına ulaşmış ve halk sağlığı açısından ciddi bir tehdit oluşturmıştır. Kasım-Mart döneminde ise arsenik seviyeleri ortalama 40–45 µg/L arasında sabitlenmiş olup, bu düzey limitin yaklaşık 4 katı kadar yüksek seyretmiştir. Bu bulgular, bölgedeki arsenik kontaminasyonunun geçici değil, kalıcı bir kirlilik kaynağından kaynaklandığını ve içme suyunun insan sağlığı açısından uygun olmadığını göstermektedir.

Benzer şekilde, Hisartepe Mahallesi'nde de tüm aylarda arsenik konsantrasyonu standart değerlerin üzerinde bulunmuş, en yüksek değer Ekim ayında 68 µg/L, en düşük değer ise Mart ayında 55 µg/L olarak kaydedilmiştir. Bu sonuçlar, yıl boyunca yüksek düzeyde sabit kalan arsenik kirliliğini işaret etmekte ve suyun uzun süreli tüketiminin kanserojen etkiler, nörolojik

bozukluklar ve kardiyovasküler hastalıklar gibi ciddi sağlık problemleri yaratabileceğini göstermektedir. Meydancık Mahallesi'nde ise arsenik konsantrasyonları yıl boyunca sınır değerlerin 2,5–3 katı üzerinde ölçülmüş, en yüksek değer Ekim ayında 29 µg/L, en düşük değer ise Mart ayında 14 µg/L olarak tespit edilmiştir. Mart ayında kısmi bir düşüş gözlenmiş olsa da genel eğilim, stabil yüksek düzeyli kirliliğin varlığına işaret etmektedir. Bu seviyedeki arsenik maruziyeti de halk sağlığı açısından benzer şekilde uzun vadeli tehlikeler taşımaktadır.

Bor kirliliği açısından değerlendirildiğinde, Gülümuşağı Mahallesi'nde Ekim ve Kasım aylarında İTASHY ve Avrupa Komisyonu (EC) tarafından önerilen sınır değerler aşılmış; Dünya Sağlık Örgütü (WHO) limiti ise tüm yıl boyunca belirgin şekilde geçilmiştir. Özellikle Ekim ayında ölçülen 1886 µg/L'lik değer, WHO limitinin birkaç katı düzeyindedir. Aralık ayı itibarıyla bor seviyesi İTASHY ve EC limitlerinin altına inse de WHO tarafından belirlenen 500 µg/L'lik sınırın yaklaşık üç katı seviyede kalmaya devam etmiştir. Borun bu düzeydeki uzun süreli tüketimi, literatürde böbrek fonksiyonlarında bozulma, üreme sistemi hasarı ve endokrin sistem üzerindeki olumsuz etkilerle ilişkilendirilmektedir. Uluköy Mahallesi'nde ise Ekim ve Kasım aylarında İTASHY ve EC limitlerinin aşıldığı; Aralık, Ocak ve Şubat aylarında ise bu sınırların altına inildiği gözlenmiştir. Ancak WHO limitleri esas alındığında, bor düzeyi beş aylık dönemin tamamında kritik seviyede kalmıştır. Mevsimsel olarak kısmi bir azalma eğilimi bulunsa da, bor konsantrasyonları hâlâ WHO'nun kabul edilebilir eşiğinin oldukça üzerindedir. Bu durum, bölge halkının uzun süreli bor maruziyeti açısından potansiyel sağlık riskleriyle karşı karşıya olduğuna işaret etmektedir.

Sağlık risk değerlendirmesinde kullanılan her bir metriğin hesaplama formülleri bölüm 4.3'te verilmiştir. Yapılan analizler değerlendirildiğinde İTASHY'e göre sınır değer üzerinde tespit edilen ağır metaller olan Arsenik ve bor konsantrasyonlarının en yüksek olduğu verilerin hesaplamaları aşağıdadır. Bu hesaplamalar hem yetişkinler hem de çocuklar için yapılmış ve Arsenik (As) ile Bor (B) elementlerine uygulanmıştır. Sonuçlar kabul edilebilir sınır değerlere göre değerlendirilmiştir. (Tablo 5.8)

Tablo 5. 8 Arsenik ve bor için kabul edilebilir sınır değerler

Parametre	Sınır Değeri	Açıklama
RfD_As	0.0003 mg/kg/gün	Arsenik için referans doz
RfD_B	0.2 mg/kg/gün	Bor için referans doz
CR	1E ⁻⁶	Kabul edilebilir maksimum kanser riski
HI	1	Kabul edilebilir toplam tehlike indeksi

Şişman mahallesi Ekim ayı ölçülen As Konsantrasyonu:

$$C = 0.09653 \text{ mg/L}$$

EDI Hesabı (yetişkin):

$$EDI = \frac{C \cdot IR \cdot EF \cdot ED}{BW \cdot AD}$$

$$EDI = \frac{0,09653 \cdot 2 \cdot 365 \cdot 70}{70 \cdot 365 \cdot 70} = \frac{49371,7}{1788500} = 0,00276 \frac{mg}{kg} \text{ gün}$$

HQ Hesabı:

$$HQ = \frac{EDI}{RfD} = \frac{0,00276}{0,0003} = 9,200$$

HQ > 1 → Kanserojen olmayan sağlık riski mevcuttur.

CR Hesabı:

$$CR = EDI \cdot SF = 0,00276 \cdot 1,5 = 0,00414$$

CR > 1E⁻⁶ → Kanser riski kabul edilebilir seviyenin üzerindedir.

Gülümuşığı mahallesi Ekim ayı ölçülen Bor Konsantrasyonu:

$$C = 1.886 \text{ mg/L}$$

EDI Hesabı (yetişkin):

$$EDI = \frac{C \cdot IR \cdot EF \cdot ED}{BW \cdot AD}$$

$$EDI = \frac{1,886 \cdot 2 \cdot 365 \cdot 70}{70 \cdot 365 \cdot 70} = \frac{192380,2}{1788500} = 0,0539 \frac{mg}{kg} \text{ gün}$$

HQ Hesabı:

$$HQ = \frac{EDI}{RfD} = \frac{0,0539}{0,2} = 0,2695$$

$HQ < 1 \rightarrow$ Kanserojen olmayan sağlık riski kabul edilebilir düzeydedir.

Yapılan analizler ve hesaplamalar sonucunda yani hem As hem B için $HQ > 1$ olan bir durum olmadığından, H_i hesaplanmamıştır.

Tablo 5.9, içme suyu örneklerinde tespit edilen Arsenik (As) ve Bor (B) konsantrasyonlarına göre yetişkinler ve çocuklar için ayrı ayrı hesaplanan sağlık risk göstergelerini (EDI, HQ, HI, CR) içermektedir.

Tablo 5. 9 Sağlık risk değerlendirmesi sonucu hesaplanan EDI, HQ, HI ve CR değerleri

Ay	Mahalle	EDI_As_yetişkin	EDI_As_çocuk	EDI_B_Yetişkin	EDI_B_Çocuk	HQ_As_Yetişkin	HQ_As_Çocuk	HQ_B_Yetişkin	HQ_B_Çocuk	HI_Yetişkin	HI_Çocuk	CR_As_Yetişkin	CR_As_Çocuk
Ekim	Gülümuşağı	-	-	0.054	0.126	-	-	0.269	0.629	0.269	0.629	-	-
Ekim	Hisartepe	0.002	0.005	0.012	0.029	6.470	15.098	0.062	0.145	6.533	15.243	0.003	0.007
Ekim	Meydancık	0.001	0.002	0.002	0.004	2.793	6.518	0.008	0.018	2.801	6.536	0.001	0.003
Ekim	Şişman	0.003	0.006	0.002	0.004	9.193	21.451	0.008	0.019	9.201	21.470	0.004	0.010
Ekim	Uluköy	0.000	0.000	0.041	0.096	0.179	0.419	0.207	0.482	0.386	0.901	0.000	0.000
Kasım	Gülümuşağı	-	-	0.054	0.126	-	-	0.269	0.629	0.269	0.629	-	-
Kasım	Hisartepe	0.002	0.005	-	-	6.470	15.098	-	-	6.470	15.098	0.003	0.007
Kasım	Meydancık	0.001	0.002	-	-	2.793	6.518	-	-	2.793	6.518	0.001	0.003
Kasım	Şişman	0.003	0.006	-	-	9.193	21.451	-	-	9.193	21.451	0.004	0.010
Kasım	Uluköy	-	-	0.041	0.096	-	-	0.207	0.482	0.207	0.482	-	-
Kasım	Gülümuşağı	-	-	0.038	0.090	-	-	0.192	0.449	0.192	0.449	-	-
Kasım	Hisartepe	0.002	0.004	-	-	6.372	14.869	-	-	6.372	14.869	0.003	0.007
Kasım	Meydancık	0.001	0.002	-	-	2.646	6.173	-	-	2.646	6.173	0.001	0.003
Kasım	Şişman	0.001	0.003	-	-	4.265	9.951	-	-	4.265	9.951	0.002	0.004
Kasım	Uluköy	-	-	0.030	0.069	-	-	0.148	0.345	0.148	0.345	-	-
Aralık	Gülümuşağı	-	-	0.023	0.054	-	-	0.116	0.271	0.116	0.271	-	-
Aralık	Hisartepe	0.002	0.004	-	-	5.405	12.611	-	-	5.405	12.611	0.002	0.006
Aralık	Meydancık	0.001	0.002	-	-	2.450	5.716	-	-	2.450	5.716	0.001	0.003
Aralık	Şişman	0.001	0.003	-	-	3.818	8.909	-	-	3.818	8.909	0.002	0.004
Aralık	Uluköy	-	-	0.026	0.061	-	-	0.131	0.305	0.131	0.305	-	-
Ocak	Hisartepe	0.002	0.004	-	-	5.575	13.009	-	-	5.575	13.009	0.003	0.006
Ocak	Meydancık	0.001	0.002	-	-	2.627	6.129	-	-	2.627	6.129	0.001	0.003
Ocak	Şişman	0.001	0.003	-	-	3.799	8.864	-	-	3.799	8.864	0.002	0.004
Ocak	Uluköy	-	-	0.018	0.043	-	-	0.092	0.216	0.092	0.216	-	-
Şubat	Meydancık	0.001	0.002	-	-	2.953	6.891	-	-	2.953	6.891	0.001	0.003
Şubat	Uluköy	-	-	0.023	0.053	-	-	0.114	0.267	0.114	0.267	-	-
Mart	Hisartepe	0.002	0.004	-	-	5.222	12.184	-	-	5.222	12.184	0.002	0.005
Mart	Meydancık	0.000	0.001	-	-	1.360	3.173	-	-	1.360	3.173	0.001	0.001
Mart	Şişman	0.001	0.003	-	-	3.975	9.276	-	-	3.975	9.276	0.002	0.004

Tablo 5. 10 Arsenik kanser riski (CR)

Ay	Mahalle	CR_Yetişkin	CR_Çocuk	Kanserojen_Risk_Yetişkin	Kanserojen_Risk_Çocuk
Ekim	Hisartepe	0.003	0.007	Yüksek Risk	Yüksek Risk
Ekim	Meydancık	0.001	0.003	Yüksek Risk	Yüksek Risk
Ekim	Şişman	0.004	0.010	Yüksek Risk	Yüksek Risk
Kasım	Hisartepe	0.003	0.007	Yüksek Risk	Yüksek Risk
Kasım	Meydancık	0.001	0.003	Yüksek Risk	Yüksek Risk
Kasım	Şişman	0.004	0.010	Yüksek Risk	Yüksek Risk
Kasım	Hisartepe	0.003	0.007	Yüksek Risk	Yüksek Risk
Kasım	Meydancık	0.001	0.003	Yüksek Risk	Yüksek Risk
Kasım	Şişman	0.002	0.004	Yüksek Risk	Yüksek Risk
Aralık	Hisartepe	0.002	0.006	Yüksek Risk	Yüksek Risk
Aralık	Meydancık	0.001	0.003	Yüksek Risk	Yüksek Risk
Aralık	Şişman	0.002	0.004	Yüksek Risk	Yüksek Risk
Ocak	Hisartepe	0.003	0.006	Yüksek Risk	Yüksek Risk
Ocak	Meydancık	0.001	0.003	Yüksek Risk	Yüksek Risk
Ocak	Şişman	0.002	0.004	Yüksek Risk	Yüksek Risk
Şubat	Meydancık	0.001	0.003	Yüksek Risk	Yüksek Risk
Mart	Hisartepe	0.002	0.005	Yüksek Risk	Yüksek Risk
Mart	Meydancık	0.001	0.001	Yüksek Risk	Yüksek Risk
Mart	Şişman	0.002	0.004	Yüksek Risk	Yüksek Risk

Tablo 5. 11 Arsenik kanserojen olmayan risk (HQ)

Ay	Mahalle	HQ_As_Yetişkin	HQ_As_Çocuk	Risk_Yetişkin	Risk_Çocuk
Ekim	Hisartepe	6.470	15.098	Yüksek	Yüksek
Ekim	Meydancık	2.793	6.518	Yüksek	Yüksek
Ekim	Şişman	9.193	21.451	Yüksek	Yüksek
Kasım	Hisartepe	6.470	15.098	Yüksek	Yüksek
Kasım	Meydancık	2.793	6.518	Yüksek	Yüksek
Kasım	Şişman	9.193	21.451	Yüksek	Yüksek
Kasım	Hisartepe	6.372	14.869	Yüksek	Yüksek
Kasım	Meydancık	2.646	6.173	Yüksek	Yüksek
Kasım	Şişman	4.265	9.951	Yüksek	Yüksek
Aralık	Hisartepe	5.405	12.611	Yüksek	Yüksek
Aralık	Meydancık	2.450	5.716	Yüksek	Yüksek
Aralık	Şişman	3.818	8.909	Yüksek	Yüksek
Ocak	Hisartepe	5.575	13.009	Yüksek	Yüksek
Ocak	Meydancık	2.627	6.129	Yüksek	Yüksek
Ocak	Şişman	3.799	8.864	Yüksek	Yüksek
Şubat	Meydancık	2.953	6.891	Yüksek	Yüksek
Mart	Hisartepe	5.222	12.184	Yüksek	Yüksek
Mart	Meydancık	1.360	3.173	Yüksek	Yüksek
Mart	Şişman	3.975	9.276	Yüksek	Yüksek

Tablo 5. 12 Bor kanserojen olmayan risk (HQ)

Ay	Mahalle	HQ_B_Yetişkin	HQ_B_Çocuk	Risk_Yetişkin	Risk_Çocuk
Ekim	Gülümuşığı	0.269	0.629	Düşük	Düşük
Ekim	Hisartepe	0.062	0.145	Düşük	Düşük
Ekim	Meydancık	0.008	0.018	Düşük	Düşük
Ekim	Şişman	0.008	0.019	Düşük	Düşük
Ekim	Uluköy	0.207	0.482	Düşük	Düşük
Kasım	Gülümuşığı	0.269	0.629	Düşük	Düşük
Kasım	Uluköy	0.207	0.482	Düşük	Düşük
Kasım	Gülümuşığı	0.192	0.449	Düşük	Düşük
Kasım	Uluköy	0.148	0.345	Düşük	Düşük
Aralık	Gülümuşığı	0.116	0.271	Düşük	Düşük
Aralık	Uluköy	0.131	0.305	Düşük	Düşük
Ocak	Uluköy	0.092	0.216	Düşük	Düşük
Şubat	Uluköy	0.114	0.267	Düşük	Düşük

Sağlık risk hesaplamaları değerlendirildiğinde Ekim ayında Şişman Mahallesi'nde ölçülen arsenik değeri hem yetişkinler hem de çocuklar için önemli bir sağlık riski oluşturmaktadır. Yetişkinlerde hesaplanan HQ değeri 9.200 ve CR değeri 0.00414 olup, bu değerler hem kanserojen olmayan hem de kanserojen riskin kabul edilebilir sınırlarının oldukça üzerindedir. Çocuklarda ise HQ değeri 21.333, CR değeri 0.00960 bulunmuştur; bu da maruziyetin küçük yaş grubu için çok daha kritik olduğunu göstermektedir. Ekim ayı, hasat sonrası döneme denk gelmesi nedeniyle tarım ilaçlarının yeraltı sularına karışabileceği, yaz sonunda buharlaşma ile su seviyelerinin düşüp ağır metallerin konsantrasyonunun artabileceği bir mevsimsel koşul sunmaktadır.

Analizler sonucu en yüksek bor konsantrasyonu Ekim ayında Gülümuşığı Mahallesi'nde tespit edilmiştir. Tespit edilen Bor konsantrasyonu yüksek olmakla birlikte, hesaplanan HQ değerleri yetişkinler için 0.269, çocuklar için ise 0.629 olup her ikisi de 1'in altında kalmaktadır. Bu, bor maruziyetinin kanserojen olmayan sağlık riski açısından kabul edilebilir seviyede olduğunu göstermektedir. Ancak yine de mevsimsel olarak yazdan çıkılan bu dönemde, yeraltı sularındaki buharlaşma, doğal bor minerallerinin çözünmesini ve konsantrasyon artışını destekleyebilir. Ayrıca bölgenin jeolojik yapısı ve tarımsal uygulamalar da etkili olabilir.

6. SONUÇ

Bu tez çalışmasında, Malatya ili sınırları içerisinde seçilen mahallelerden 6 aylık süreyle düzenli olarak toplanan içme suyu örneklerinde arsenik (As) ve bor (B) ağır metallerinin konsantrasyonları belirlenmiş, elde edilen veriler sağlık risk değerlendirmesi çerçevesinde incelenmiştir. Analizler TS EN ISO 17294-1 metoduna uygun şekilde ICP-MS teknolojisi kullanılmış; veriler yetişkin ve çocuk grupları için ayrı ayrı değerlendirilmiştir.

Çalışma sonucunda bazı örneklem noktalarında özellikle arsenik düzeylerinin İTASHY, EPA, EC ve WHO tarafından belirlenen sınır değerlerin üzerinde olduğu saptanmıştır. En yüksek arsenik konsantrasyonu Ekim ayında Şişman Mahallesi'nde (96,53 µg/L) ölçülmüş ve bu değere karşılık gelen HQ (Hedef Tehlike Katsayısı) değeri hem yetişkin (HQ = 9,200) hem de çocuk bireyler (HQ = 21,333) için belirgin şekilde 1'in üzerinde bulunmuştur. Bu durum, uzun süreli arsenik maruziyetinin kanserojen olmayan sağlık riskleri açısından ciddi bir tehdit oluşturduğunu ortaya koymaktadır. Aynı zamanda hesaplanan kanser riski (CR) değerleri de yetişkinlerde 0,00414, çocuklarda ise 0,00960 olarak bulunmuş ve bu değerlerin kabul edilebilir sınır olan 1×10^{-6} seviyesini çok aştığı görülmüştür.

Bor düzeyleri açısından yapılan değerlendirmede ise en yüksek konsantrasyon Ekim ayında Gülümuşluğu Mahallesi'nde (1,886 mg/L) saptanmış ancak hesaplanan HQ değerleri yetişkinlerde 0,269, çocuklarda 0,629 ile 1'in altında kalmıştır. Bu sonuç, bor için değerlendirme yapılan örneklem noktalarında sağlık açısından anlamlı bir tehlike olmadığını göstermektedir.

Bu bulgular doğrultusunda, bölgedeki bazı içme suyu kaynaklarının özellikle arsenik bakımından sağlık açısından riskli olabileceği; bu nedenle yerel yönetimlerin ve sağlık otoritelerinin arsenik yönünden su kalitesini izleme sıklığını artırmaları, kirlilik kaynaklarını belirlemeye yönelik hidrojeolojik araştırmalar yapmaları ve gerektiğinde arsenik giderici arıtma sistemlerini devreye sokmaları gerektiği önerilmektedir.

Ayrıca, bu çalışmada kullanılan sağlık risk değerlendirme metodolojisi (EDI, HQ, HI, CR hesaplamaları) sayesinde benzer çalışmaların farklı bölgelerde de kolaylıkla yürütülebileceği ve halk sağlığının korunmasına yönelik önleyici stratejilerin geliştirilebileceği düşünülmektedir.

Malatya ili içme sularında tespit edilen arsenik ve bor düzeyleri doğrultusunda, bu elementlerin halk sağlığı üzerindeki potansiyel etkilerini en aza indirmek amacıyla çeşitli önlemlerin hayata geçirilmesi gerekmektedir. Özellikle arsenik konsantrasyonunun yüksek seyrettiği mahallelerde, örneğin Şişman Mahallesi gibi kritik bölgelerde, arsenik giderimine yönelik arıtma sistemlerinin (örneğin adsorpsiyon, koagülasyon-filtrasyon veya ters osmoz teknolojileri) kurulması önerilmektedir. Bor düzeyleri şu an için sağlık açısından tehlikeli bir seviyede bulunmasa da ($HQ < 1$), mevsimsel değişkenlikler ve potansiyel artışlar göz önünde bulundurularak düzenli izleme çalışmaları sürdürülmelidir. Bu doğrultuda, yerel yönetimler ile sağlık otoritelerinin su kalitesine yönelik analiz sıklığını artırması, özellikle arsenik açısından riskli bölgelerde sürekli ve sistematik izleme faaliyetleri yürütmesi büyük önem arz etmektedir. Ayrıca, kirliliğin kaynağının belirlenmesine yönelik hidrojeolojik araştırmalar yapılmalı; bölgedeki jeolojik özelliklerin ve tarımsal faaliyetlerin, özellikle pestisit ve gübre kullanımının arsenik ve bor kirliliğine olan katkısı bilimsel yöntemlerle ortaya konulmalıdır. Öte yandan, arsenik ve bor düzeyi yüksek içme sularının, daha düşük kirleticilere sahip su kaynakları ile karıştırılarak seyreltme yöntemiyle kullanılabilirliğinin artırılması da alternatif bir çözüm olarak değerlendirilebilir. Son olarak, toplumun bu kirleticilerin uzun vadeli sağlık etkileri konusunda bilgilendirilmesi ve özellikle riskli bölgelerde yaşayan halk için güvenli alternatif su kaynakları konusunda farkındalık oluşturulması, su güvenliği açısından sürdürülebilir bir yaklaşımın temelini oluşturacaktır.

KAYNAKLAR

- [1] **WPR**, World Population Clock, Current World Population, (n.d.). <https://worldpopulationreview.com/>.
- [2] **WPP**, Department of Economic and Social Affairs Population Division World Population Prospects 2024, (n.d.). <https://population.un.org/wpp/>.
- [3] **United Nations**, World Population Prospects 2024: Summary of Results, New York, 2024.
https://population.un.org/wpp/Publications/Files/WPP2024_Summary_of_Results.pdf.
- [4] **S. Mentese**, ÇEVRESEL SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK AÇISINDAN TOPRAK, SU VE HAVA KİRLİLİĞİ: TEORİK BİR İNCELEME, J. Int. Soc. Res. 10 (2017) 381–389.
<https://doi.org/10.17719/jisr.20175334127>.
- [5] **M. Yalçın**, H. Oğuz, Investigation of Heavy Metal Levels in Drinking Water of Konya Province, Selcuk Univ. J. Sci. Fac. 2 (2010) 9–18.
<https://dergipark.org.tr/en/pub/sufefd/issue/23100/246767>.
- [6] **H.S. Vuorinen, P.S. Juuti, T.S. Katko**, History of water and health from ancient civilizations to modern times, Water Supply 7 (2007) 49–57.
<https://doi.org/10.2166/ws.2007.006>.
- [7] **I. Lorenzo, M. Serra-Prat, J.C. Yébenes**, The Role of Water Homeostasis in Muscle Function and Frailty: A Review., Nutrients 11 (2019).
<https://doi.org/10.3390/nu11081857>.
- [8] **L.E. Armstrong, E.C. Johnson**, Water Intake, Water Balance, and the Elusive Daily Water Requirement., Nutrients 10 (2018). <https://doi.org/10.3390/nu10121928>.
- [9] **M.L. Yılmaz, H.S. Peker**, Su Kaynaklarının Türkiye Açısından Ekono-Politik Önemi Ekseninde Olası Bir Tehlike: Su Savaşları, Çankırı Karatekin Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilim. Fakültesi Derg. 3 (2013) 57–74.
<https://dergipark.org.tr/tr/pub/ckuiibfd/issue/32891/365377>.
- [10] **M. Jamshaid, A. Arshad Khan, K. Ahmed, M. Saleem**, Heavy metal in drinking water its effect on human health and its treatment techniques – a review, Int. J. Biosci. 12 (2018) 223–240. <https://doi.org/10.12692/ijb/12.4.223-240>.
- [11] **FAO**, Water for Sustainable Food and Agriculture, Germany, 2017.
<https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/b48cb758-48bc-4dc5-a508-e5a0d61fb365/content>.
- [12] **R. Lal**, World Water Resources and Achieving Water Security, Agron. J. 107 (2015)

- 1526–1532. <https://doi.org/https://doi.org/10.2134/agronj15.0045>.
- [13] **P. Loucks, E. Beek, J. Stedinger, J. Dijkman, M. Villars**, Water Resources Systems Planning and Management: An Introduction to Methods, Models And Applications, 2005.
 - [14] **S. Yaşar, M.A. Üstek, A.Ş. Bengü, L. Mis**, Mardin Bölgesi İçme Sularında Ağır Metal Düzeylerinin Araştırılması, Institute Heal. Sci. J. 1 (2016) 63–71. <http://cusbed.cumhuriyet.edu.tr/tr/pub/cusbed/issue/26874/379599>.
 - [15] **C. Pahl-Wostl, G. Holtz, B. Kastens, C. Knieper**, Analyzing complex water governance regimes: the Management and Transition Framework, Environ. Sci. Policy 13 (2010) 571–581. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.envsci.2010.08.006>.
 - [16] **W.J. Cosgrove, D.P. Loucks**, Water management: Current and future challenges and research directions, Water Resour. Res. 51 (2015) 4823–4839. <https://doi.org/10.1002/2014WR016869>.
 - [17] **N. Ferronato, V. Torretta**, Waste Mismanagement in Developing Countries: A Review of Global Issues, Int. J. Environ. Res. Public Health 16 (2019). <https://doi.org/10.3390/ijerph16061060>.
 - [18] **S.M.F. Islam, Z. Karim**, World's Demand for Food and Water: The Consequences of Climate Change, in: M.H. Davood Abadi Farahani, V. Vatanpour, A.H. Taheri (Eds.), IntechOpen, Rijeka, 2019. <https://doi.org/10.5772/intechopen.85919>.
 - [19] **E. Terlecka**, Arsenic speciation analysis in water samples: a review of the hyphenated techniques., Environ. Monit. Assess. 107 (2005) 259–284. <https://doi.org/10.1007/s10661-005-3109-z>.
 - [20] **P.L. Smedley, D.G. Kinniburgh**, A review of the source, behaviour and distribution of arsenic in natural waters, Appl. Geochemistry 17 (2002) 517–568. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0883-2927\(02\)00018-5](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0883-2927(02)00018-5).
 - [21] **C.K. Jain, I. Ali**, Arsenic: occurrence, toxicity and speciation techniques, Water Res. 34 (2000) 4304–4312. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(00\)00182-2](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0043-1354(00)00182-2).
 - [22] **USEPA**, 2006 Edition of the Drinking Water Standards and Health Advisories., 2006. <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyNET.exe/P1004X78.TXT?ZyActionD=ZyDocument&Client=EPA&Index=2006+Thru+2010&Docs=&Query=&Time=&EndTime=&SearchMethod=1&TocRestrict=n&Toc=&TocEntry=&QField=&QFieldYear=&QFieldMonth=&QFieldDay=&IntQFieldOp=0&ExtQFieldOp=0&XmlQuery=>.
 - [23] **C. Markley, B. Herbert**, Arsenic Risk Assessment: The Importance of Speciation in Different Hydrologic Systems, Water Air Soil Pollut. 204 (2009) 385–398.

<https://doi.org/10.1007/s11270-009-0052-6>.

- [24] **B. Poyraz**, Farklı Lokasyonlardan Alınan İçme Sularında Ağır Metal Analizi TT - Heavy Metal Analysis of Drinking Water Samples Taken from Different Locations, Duzce Univ. J. Sci. Technol. 2 (2014) 16–27. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/dubited/issue/4807/66190>.
- [25] **T. Seven, B. Can, B.N. Darende, S. Ocak**, Hava ve Toprakta Ağır Metal Kirliliği TT - Heavy Metals Pollution in Air and Soil, Ulus. Çevre Bilim. Araştırma Derg. 1 (2018) 91–103. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/ucbad/issue/38487/447131>.
- [26] **G. Şavran, F. Küçük**, Sucul Canlılarda Ağır Metal Birikimi ve Etkileri, Akad. Doğa ve İnsan Bilim. Derg. 8 (2022) 65–78. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/adibd/issue/68882/1165848>.
- [27] **J. Briffa, E. Sinagra, R. Blundell**, Heavy metal pollution in the environment and their toxicological effects on humans., Heliyon 6 (2020) e04691. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04691>.
- [28] **H. Ali, E. and Khan**, What are heavy metals? Long-standing controversy over the scientific use of the term ‘heavy metals’ – proposal of a comprehensive definition, Toxicol. Environ. Chem. 100 (2018) 6–19. <https://doi.org/10.1080/02772248.2017.1413652>.
- [29] **P.S. Rainbow**, Biomonitoring of heavy metal availability in the marine environment, Mar. Pollut. Bull. 31 (1995) 183–192. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0025-326X\(95\)00116-5](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0025-326X(95)00116-5).
- [30] **R. Hamutoğlu, A.B. Dinçsoy, D. Cansaran-duman, S. Aras**, Biyosorpsiyon, Adsorpsiyon, Fitoremediasyon Yöntemleri ve Uygulamaları TT - Biosorption, adsorption, phytoremediation methods and applications, Türk Hij. ve Deney. Biyol. Derg. 69 (2012) 235–253. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/thdbd/issue/63993/968317>.
- [31] **A.D. Harun Mutluay**, Su Kimyası, Beta Basım Yayın, 1996.
- [32] **T. Gündüz**, Çevre Sorunları, Bilge Yayıncılık, Ankara, 1994.
- [33] **U.A. Kamalı**, Samsun-Ordu kıyı şeridinde deniz kirliliğinin incelenmesi ve kirlilik birikiminin midye örneğinde araştırılması, Ondokuz Mayıs Üniversitesi, 1999.
- [34] **N. Sağlam, N. Cihangir**, Ağır metallerin biyolojik süreçlerle biyosorbisyonu çalışmaları, Hacettepe Üniversitesi Eğitim Fakültesi Derg. 11 (1995). <https://dergipark.org.tr/tr/pub/hunefd/issue/7826/102903>.
- [35] **C.D. Foy, R. Chaney, M. White**, The Physiology of Metal Toxicity in Plants, Annu. Rev. Plant Physiol. 29 (2003) 511–566.

<https://doi.org/10.1146/annurev.pp.29.060178.002455>.

- [36] **S.T. Özge KAHVECİOĞLU, Güldem KARTAL, Aybars GÜVEN**, Metallerin Çevresel Etkileri, İTÜ Met. ve Malzeme Mühendisliği Bölümü (2009). https://www.metalurji.org.tr/dergi/dergi136/d136_4753.pdf.
- [37] **H. Hu**, Exposure to metals., Prim. Care 27 (2000) 983–996. [https://doi.org/10.1016/s0095-4543\(05\)70185-8](https://doi.org/10.1016/s0095-4543(05)70185-8).
- [38] **M. Greger**, Metal Availability and Bioconcentration in Plants BT - Heavy Metal Stress in Plants: From Molecules to Ecosystems, in: M.N. V Prasad, J. Hagemeyer (Eds.), Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 1999: pp. 1–27. https://doi.org/10.1007/978-3-662-07745-0_1.
- [39] **A.J.M. Baker**, Heavy metals in soils: Edited by B. J. Alloway, Blackie Academic & Professional, London (2nd edn), 1995, ISBN 0-7514-0198-6. 368 pp. Price: £78.00, Environ. Pollut. 90 (1995) 269. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0269-7491\(95\)90014-4](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0269-7491(95)90014-4).
- [40] **M.Ş. Kışhoğlu**, Elazığ İlinde Farklı Tipteki Atıksuların Deşarj Edildiği Alıcı Ortamlarda Su, Sediment Ve Sucul Bitkilerde Ağır Metal Düzeylerinin Belirlenmesi, Fırat Üniversitesi, 2021.
- [41] **R. Allan**, Introduction: Mining and metals in the environment, J. Geochemical Explor. 58 (1997) 95–100. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0375-6742\(97\)00004-6](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0375-6742(97)00004-6).
- [42] **S.-Y. Chen, J.-G. Lin**, Bioleaching of heavy metals from sediment: Significance of pH, Chemosphere 44 (2001) 1093–1102. [https://doi.org/10.1016/S0045-6535\(00\)00334-9](https://doi.org/10.1016/S0045-6535(00)00334-9).
- [43] **S. Blumenthal, D. Lewand, A. Sochanik, S. Krezoski, D.H. Petering**, Inhibition of Na(+)-glucose cotransport in kidney cortical cells by cadmium and copper: protection by zinc., Toxicol. Appl. Pharmacol. 129 (1994) 177–187. <https://doi.org/10.1006/taap.1994.1242>.
- [44] **S. Gören, M. Esen**, Tıbbi Atık Yakma Küllerinde Ağır Metal Giderimi, Ekoloji 19 (2010) 51–58. <https://doi.org/10.5053/ekoloji.2010.778>.
- [45] **Ö. Akçelik**, Ağır Metallerin *Saccharomyces cerevisiae* Mikroorganizmasıyla Biyosorpsiyonunun Ortam Koşullarına Bağlı Olarak İncelenmesi, Gazi Üniversitesi, 2008.
- [46] **I. Alkorta, J. Hernandez-Allica, J. Becerril, I. Amezaga, I. Albizu, C. Garbisu**, Recent Findings on the Phytoremediation of Soils Contaminated with Environmentally Toxic Heavy Metals and Metalloids Such as Zinc, Cadmium, Lead, and Arsenic, Rev. Environ. Sci. Bio/Technology 3 (2004) 71–90.

<https://doi.org/10.1023/B:RESB.0000040059.70899.3d>.

- [47] **E. Malkoç, Y. Nuhoglu**, Palamut Meşesi (*Quercus İthaburensis*) Atığı İle Sabit Yataklı Kolonda Cr(VI) Biyosorpsiyonu, Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Derg. 8 (2006) 31–45. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/deumffmd/issue/40867/493413>.
- [48] **A. Türkmen**, İskenderun Körfezi’nde Deniz Suyu ve Sedimentte Oluşan Ağır Metal Birikiminin İncelenmesi, Karadeniz Fen Bilim. Derg. 2 (2016) 1–23. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/kfbd/issue/22233/238664>.
- [49] **F.T.Z. Yaman**, Kızılırmak Nehri’nde (Kırıkkale) Su Ve Sediment Ağır Metal Düzeylerine Sanayi Bölgelerinin Etkisinin Araştırılması, Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi, 2022.
- [50] **M. Tayfur, İ. Ünlüoğlu, Ö. Bener**, Alüminyum ve Sağlık TT - Aluminium and Health (Turkish with English Abstract), Gıda 27 (2002). <https://dergipark.org.tr/tr/pub/gida/issue/6952/92754>.
- [51] **N.P. Türker**, Kanser Gelişiminde Ağır Metallerin Rolü TT - The Role of Heavy Metals in Cancer Development, Int. J. Life Sci. Biotechnol. 6 (2023) 101–118. <https://doi.org/10.38001/ijlsb.1176738>.
- [52] **P. Vasudevaraju, M. Govindaraju, A.P. Palanisamy, K. Sambamurti, K.S.J. Rao**, Molecular toxicity of aluminium in relation to neurodegeneration., Indian J. Med. Res. 128 (2008) 545–556.
- [53] **M.İ. Ünlü, M. Bilen, M. Gürü**, KÜTAHYA-EMET BÖLGESİ YERALTI SULARINDA BOR VE ARSENİK KİRLİLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI, Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimar. Fakültesi Derg. 26 (2013) 0. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/gazimmfd/issue/6690/88784>.
- [54] **B.K. Mandal, K.T. Suzuki**, Arsenic round the world: a review, Talanta 58 (2002) 201–235. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0039-9140\(02\)00268-0](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0039-9140(02)00268-0).
- [55] **M. Bissen, F.H. Frimmel**, Arsenic — a Review. Part I: Occurrence, Toxicity, Speciation, Mobility, Acta Hydrochim. Hydrobiol. 31 (2003) 9–18. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/aheh.200390025>.
- [56] **Ü. Harite**, Pamukta Bor Toksisitesine Dayanıklılık, Adnan M:enderes Üniversitesi, 2008.
- [57] **A. Restuccio, M.E. Mortensen, M.T. Kelley**, Fatal ingestion of boric acid in an adult., Am. J. Emerg. Med. 10 (1992) 545–547. [https://doi.org/10.1016/0735-6757\(92\)90180-6](https://doi.org/10.1016/0735-6757(92)90180-6).

- [58] **Ş. Özkurt**, Boron Accumulation in Carp tissues (*Cyprinus carpio* L., 1758) in Damlakes Çötören and Kunduzlar (Kırka-Eskişehir), Turkish J. Biol. 24 (2000). <https://journals.tubitak.gov.tr/biology/vol24/iss3/26>.
- [59] **R.A. Wuana, F.E. Okieimen**, Heavy Metals in Contaminated Soils: A Review of Sources, Chemistry, Risks and Best Available Strategies for Remediation, Int. Sch. Res. Not. 2011 (2011) 402647. <https://doi.org/https://doi.org/10.5402/2011/402647>.
- [60] **S. Zhang, Y. Yang, M. Storozum, H. Li, C. Yifu, G. Dong**, Copper smelting and sediment pollution in Bronze Age China: A case study in the Hexi corridor, Northwest China, Catena 156 (2017) 92–101. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.04.001>.
- [61] **M. McLaughlin, R. Hamon, R. McLaren, T. Speir, S. Rogers**, Review: A bioavailability-based rationale for controlling metal and metalloid contamination of agricultural land in Australia and New Zealand, Soil Res. 38 (2000) 1037–1086. <https://doi.org/10.1071/SR99128>.
- [62] **P.B. Tchounwou, C.G. Yedjou, A.K. Patlolla, D.J. Sutton**, Heavy metal toxicity and the environment., Exp. Suppl. 101 (2012) 133–164. https://doi.org/10.1007/978-3-7643-8340-4_6.
- [63] **C.K. Jain, D.C. Singhal, M.K. Sharma**, Adsorption of zinc on bed sediment of River Hindon: adsorption models and kinetics., J. Hazard. Mater. 114 (2004) 231–239. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2004.09.001>.
- [64] **P. Younger, S. Banwart, R. Hedin**, Mine water, Hidrology, Pollution, Remediation, Environ. Pollut. 5 (2002).
- [65] **A.A. El-Ghamery, M.A. El-Kholy, M.A. Abou El-Yousser**, Evaluation of cytological effects of Zn^{2+} in relation to germination and root growth of *Nigella sativa* L. and *Triticum aestivum* L., Mutat. Res. Toxicol. Environ. Mutagen. 537 (2003) 29–41. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S1383-5718\(03\)00052-4](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S1383-5718(03)00052-4).
- [66] **J. Albretsen**, The toxicity of iron, an essential element, Vet. Med. 101 (2006) 82–90.
- [67] **P. Akcan**, Munzur Ve Pülümür Nehirleri İle Uzunçayır Baraj Gölündeki Bazı Ağır Metal Düzeylerinin Belirlenmesi, Munzur Üniversitesi, 2018.
- [68] **P.S. DeVolder, S.L. Brown, D. Hesterberg, K. Pandya**, Metal bioavailability and speciation in a wetland tailings repository amended with biosolids compost, wood ash, and sulfate., J. Environ. Qual. 32 (2003) 851–864. <https://doi.org/10.2134/jeq2003.8510>.
- [69] **A. Suikkala, H. Leino-Kilpi, J. Katajisto**, Factors related to the nursing student-patient relationship: the students' perspective., Nurse Educ. Today 28 (2008) 539–549. <https://doi.org/10.1016/j.nedt.2007.09.004>.

- [70] **J.M. Besser, W.G. Brumbaugh, E.L. Brunson, C.G. Ingersoll**, Acute and chronic toxicity of lead in water and diet to the amphipod *Hyalella azteca*., *Environ. Toxicol. Chem.* 24 (2005) 1807–1815. <https://doi.org/10.1897/04-480r.1>.
- [71] **S. Tiwari, I. Tripathi, H. Tiwari**, Effects of Lead on Environment, (2013) 2278–9359.
- [72] **Y. DüNDAR, R. Aslan**, Yaşamı Kuşatan Ağır Metal Kurşunun Etkileri TT - Yaşamı Kuşatan Ağır Metal Kurşunun Etkileri, *Kocatepe Tıp Derg.* 6 (2005) 1–5. <https://doi.org/10.18229/ktd.14826>.
- [73] **J. Crossgrove, W. Zheng**, Manganese toxicity upon overexposure., *NMR Biomed.* 17 (2004) 544–553. <https://doi.org/10.1002/nbm.931>.
- [74] **B. Yavuz Yiğit**, Kargı Çayı (Fethiye-Muğla) Su Ve Sedimentinde Ağır Metal Düzeylerinin Belirlenmesi, Sıtkı Kocaman Üniversitesi, 2014.
- [75] **WHO**, Environmental Health Criteria 81 Vanadium, (1988). <https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/39304/9241542810-eng.pdf>.
- [76] **P.R. Taylor, S.A. Shuey, E.E. Vidal, J.C. Gomez**, Extractive metallurgy of vanadium-containing titaniferous magnetite ores: a review, *Mining, Metall. Explor.* 23 (2006) 80–86. <https://doi.org/10.1007/BF03403340>.
- [77] **A. Akcil, F. Vegliò, F. Ferella, M.D. Okudan, A. Tuncuk**, A review of metal recovery from spent petroleum catalysts and ash, *Waste Manag.* 45 (2015) 420–433. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.07.007>.
- [78] **M. Petranikova, A.H. Tkaczyk, A. Bartl, A. Amato, V. Lapkovskis, C. Tunsu**, Vanadium sustainability in the context of innovative recycling and sourcing development, *Waste Manag.* 113 (2020) 521–544. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.04.007>.
- [79] **R. Gilligan, A.N. Nikoloski**, The extraction of vanadium from titanomagnetites and other sources, *Miner. Eng.* 146 (2020) 106106. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.mineng.2019.106106>.
- [80] **D. Tripathi, V. Mani, R.P. Pal**, Vanadium in Biosphere and Its Role in Biological Processes., *Biol. Trace Elem. Res.* 186 (2018) 52–67. <https://doi.org/10.1007/s12011-018-1289-y>.
- [81] **J. Kravchenko, H.K. Lysterly**, The Impact of Coal-Powered Electrical Plants and Coal Ash Impoundments on the Health of Residential Communities., *N. C. Med. J.* 79 (2018) 289–300. <https://doi.org/10.18043/ncm.79.5.289>.
- [82] **MGM**, Meteoroloji Genel Müdürlüğü, (2021). <https://www.mgm.gov.tr/>.
- [83] **Malatya Su ve Kanalizasyon İdaresi Genel Müdürlüğü (MASKİ), MASKİ**, (n.d.).

<https://www.maski.gov.tr>.

- [84] **TUİK**, Türkiye İstatistik Kurumu (TUİK), (2024). <https://www.tuik.gov.tr/>.
- [85] **İ. Kır, M. Ulusoy**, Antalya İli İçme Suyu Kaynaklarında Arsenik Miktarının İncelenmesi, Süleyman Demirel Üniversitesi Eğirdir Su Ürünleri Fakültesi Derg. 13 (2017) 186–194. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/egirdir/issue/30873/294789>.
- [86] **WHO**, Guidelines for drinking-water quality, 4th edition, Switzerland, 2011. https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/44584/9789241548151_eng.pdf?sequence=1.
- [87] **USEPA**, Guidelines for Exposure Assessment, in: EPA/600/Z-92/001, 1992.
- [88] **USEPA**, Risk assessment guidance for superfund: Volume III. Part A: Process for conducting probabilistic risk assessment., 2001. <https://cfpub.epa.gov/ncea/risk/recordisplay.cfm?deid=209866>.
- [89] **E.C. Güven**, Yoğun Seracılık Yapılan Tarımsal Bir Alandaki PCB Ve OCP Varlığı, Dağılımı Ve Sağlık Etkilerinin İncelenmesi, Akdeniz Üniversitesi, 2017.
- [90] **J.W. Moore, E.E. Ballantyne, S. Ramamoorthy**, Heavy Metals in Natural Waters: Applied Monitoring and Impact Assessment, Springer New York, 2012. <https://books.google.com.tr/books?id=tkThBwAAQBAJ>.
- [91] **A. Rashid, M. Ayub, Z. Ullah, A. Ali, T. Sardar, J. Iqbal, X. Gao, J. Bundschuh, C. Li, S.A. Khattak, L. Ali, H.A. El-Serehy, P. Kaushik, S. Khan**, Groundwater Quality, Health Risk Assessment, and Source Distribution of Heavy Metals Contamination around Chromite Mines: Application of GIS, Sustainable Groundwater Management, Geostatistics, PCAMLR, and PMF Receptor Model, Int. J. Environ. Res. Public Health 20 (2023). <https://doi.org/10.3390/ijerph20032113>.
- [92] **M.B. Fisher, A.Z. Guo, J.W. Tracy, S.K. Prasad, R.D. Cronk, E.G. Browning, K.R. Liang, E.R. Kelly, J.K. Bartram**, Occurrence of Lead and Other Toxic Metals Derived from Drinking-Water Systems in Three West African Countries, Environ. Health Perspect. 129 (2021). <https://doi.org/10.1289/EHP7804>.
- [93] **S. Bolisetty, A. Rahimi, R. Mezzenga**, Arsenic removal from Peruvian drinking water using milk protein nanofibril–carbon filters: a field study, Environ. Sci. Water Res. Technol. 7 (2021) 2223–2230. <https://doi.org/10.1039/D1EW00456E>.
- [94] **K.J. Pieper, R. Martin, M. Tang, L. Walters, J. Parks, S. Roy, C. Devine, M.A. Edwards**, Evaluating Water Lead Levels During the Flint Water Crisis., Environ. Sci. Technol. 52 (2018) 8124–8132. <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b00791>.
- [95] **A. Kurt, S. Kander, Ö.U. Çopur**, Bursa İli Kırsal Bölgelerindeki İçme Suyu Amaçlı

- Kullanılan Kuyu Sularının Ağır Metal Seviyelerinin Belirlenmesi, Gıda 47 (2022) 199–211. <https://doi.org/10.15237/gida.GD22012>.
- [96] **V. Parlak, K. Kobaza, M. Atamanalp**, Aras Nehri’nden (Erzurum) Örneklenen Tatlı Su Midyesinde (*Unio crassus*) Deneysel Ortamda Kurşun II Asetat Birikim Düzeylerinin Araştırılması TT - Lead II Acetat Residue Level of Freshwater Mussle (*Unio crassus*) Sampled from Aras River (Erzurum) by Empir, Atatürk Üniversitesi Ziraat Fakültesi Derg. 52 (2021) 344–350. <https://doi.org/10.17097/ataunizfd.903170>.
- [97] **N. Turanlı, K. Gedik**, Spatial trace element bioaccumulation along with consumer risk simulations of Mediterranean mussels in coastal waters of Turkey., Environ. Sci. Pollut. Res. Int. 28 (2021) 41746–41759. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-13506-4>.
- [98] **Nejat Özvar**, İskenderun Körfezi’nden Avlanıp Tüketime Sunulan Balık Türlerindeki Ağır Metal Düzeyleri, Mersin Üniversitesi, 2020.
- [99] **C. Yerli, T. Çakmakçı, U. Sahin, Ş. Tüfenkçi**, Ağır Metallerin Toprak, Bitki, Su ve İnsan Sağlığına Etkileri TT - The Effects of Heavy Metals on Soil, Plant, Water and Human Health, Türk Doğa ve Fen Derg. 9 (2020) 103–114. <https://doi.org/10.46810/tdfd.718449>.
- [100] **T.Ö. Sökmen, M. Güneş, M. Kırıcı**, Karasu Nehri’nden (Erzincan) Alınan Su, Sediment ve Capoeta umbla Dokularındaki Ağır Metal Düzeylerinin Belirlenmesi, Turkish J. Agric. Nat. Sci. 5 (2018) 578–588. <https://doi.org/10.30910/turkjans.471355>.
- [101] **M. Yılmaz, F. Bolu, A.S. Mayda, B. Poyraz**, Düzce’de Satılan Şişe Suları İle Musluk Sularının Ağır Metal Düzeylerinin İncelenmesi, Konuralp Tıp Derg. (2017). <https://doi.org/10.18521/ktd.291267>.
- [102] **M.A. Kurt**, Pirhüseyin Ve Yalıncağ Köyleri (Hafik, Sivas) Dolaylarındaki Suların Arsenik Konsantrasyonlarının Belirlenmesi, Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilim. Derg. (2018). <https://doi.org/10.28948/ngumuh.443184>.
- [103] **Y. M, M. Yılmaz, İ.H. Kara, B. Poyraz, A.S. Mayda**, Konuralp Beldesinde İçme Sularının Elementer Analizi ve İçerdiği Ağır Metaller: Şebeke Suyu, Doğal Kaynak Suyu ve Zembek Suyunun Karşılaştırılması, Konuralp Med. J. 6 (2014) 54–58. <https://doi.org/10.18521/ktd.71419>.
- [104] **T. Kahraman, S. Alemdar, M. Alişarlı, S. Ağaoğlu**, Heavy metal levels of drinking water in Bitlis province, Eurasian J. Vet. Sci. 28 (2012) 164–171. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/eurasianjvetsci/issue/24810/262123>.
- [105] **N. Atasoy, U. Mercan, İ. Alacabey, A.R. Kul**, Levels of Heavy Metals and Certain Macro Elements in Potable and Tap Water at Van City Center TT - Van Şehir

Merkezindeki İçme ve Musluk Suyunda Bulunan Ağır Metaller ve Bazı Makro Element Seviyeleri, Hacettepe J. Biol. Chem. 39 (2011) 391–396. <https://dergipark.org.tr/en/pub/hjbc/issue/61879/926020>.

- [106] **R.A. Fallahzadeh, M.T. Ghaneian, M. Miri, M.M. Dashti**, Spatial analysis and health risk assessment of heavy metals concentration in drinking water resources., Environ. Sci. Pollut. Res. Int. 24 (2017) 24790–24802. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-0102-3>.
- [107] **M. Ghaderpoori, B. Kamarehie, A. Jafari, A. Ghaderpoury, M. Karami**, Heavy metals analysis and quality assessment in drinking water - Khorramabad city, Iran., Data Br. 16 (2018) 685–692. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2017.11.078>.
- [108] **I. Cipriani-Avila, J. Molinero, E. Jara-Negrete, M. Barrado, C. Arcos, S. Mafla, F. Custode, G. Vilaña, N. Carpintero, V. Ochoa-Herrera**, Heavy metal assessment in drinking waters of Ecuador: Quito, Ibarra and Guayaquil, J. Water Health 18 (2020) 1050–1064. <https://doi.org/10.2166/wh.2020.093>.