

T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

KURŞUN-ÇİNKO MADEN CEVHERLERİ VE ATIKLARINDAN
ELDE EDİLEN İZOLATLARLA EKONOMİK ELEMENTLERİN
BİYOREMEDİASYONU

MEHMET AKYILDIZ

YÜKSEK LİSANS TEZİ
MOLEKÜLER BİYOLOJİ VE GENETİK ANABİLİM DALI

DANIŞMAN: DR. ÖĞRETİM ÜYESİ YOSUN MATER

TEMMUZ 2025

T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

KURŞUN-ÇİNKO MADEN CEVHERLERİ VE
ATIKLARINDAN ELDE EDİLEN İZOLATLARLA
EKONOMİK ELEMENTLERİN BİYOREMEDİASYONU

MEHMET AKYILDIZ

YÜKSEK LİSANS TEZİ
MOLEKÜLER BİYOLOJİ VE GENETİK
ANABİLİM DALI

DANIŞMAN: DR. ÖĞRETİM ÜYESİ YOSUN MATER

TEMMUZ 2025

T.R.
GEBZE TECHNICAL UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL

**BIOREMEDIATION OF ECONOMIC ELEMENTS
WITH ISOLATES OBTAINED FROM LEAD-ZINC
ORES AND WASTES**

MEHMET AKYILDIZ

**A THESIS OF MASTER OF SCIENCE
DEPARTMENT OF MOLECULAR BIOLOGY AND
GENETICS**

ADVISOR: ASSIST. PROF. DR. YOSUN MATER

JULY 2025

YÜKSEK LİSANS JÜRİ ONAY FORMU

GTÜ Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulunun 30/06/2025 tarih ve 2025/34 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından 18/07/2025 tarihinde tez savunma sınavı yapılan Mehmet AKYILDIZ'ın tez çalışması Moleküler Biyoloji ve Genetik Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS tezi olarak kabul edilmiştir.

JÜRİ

ÜYE

(TEZ DANIŞMANI) : Dr. Öğr Üyesi Yosun MATER

ÜYE

: Prof Dr Mehmet Salim ÖNCEL

ÜYE

: Dr. Öğr. Üyesi Kadir ULUTAŞ

ONAY

Gebze Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulunun
...../...../..... tarih ve/..... sayılı kararı.

İMZA/MÜHÜR

*Beni her zaman destekleyen
sevgili aileme*

ÖZET

Biyoliçing, mikroorganizmaların metalleri cevherler ya da atıklardan ayırttığı, sürdürülebilir, yüksek enerji harcaması olmayan, uygun maliyetli ve yüksek miktarda metalin liçing işlemi ile elde edilebildiği alternatif bir yöntemdir. Biyoliçing ile metaller ayrıştırılırken aynı zamanda toksik ağır metallerin biyoremediasyonu da gerçekleştirilmiş olur.

Bu çalışmada, Balıkesir (Balya) Kurşun-Çinko maden sahasından temin edilen cevher ve flotasyon zuhurları, yerel izolatlara ile biyoliç edilmiştir. Çalışmanın başında cevher ve flotasyon atığının elementel kompozisyonu XRD analizi ile belirlenmiştir. Maden sahasından getirilen cevher ve flotasyon atığı örneklerinden bakteri izolasyonu Tryptic Soy Broth, Tryptic Soy Agar ve Nutrient Agar kullanılarak, uygun sıcaklık ve inkübasyon süresinde yapılmıştır.

Biyoliçing çalışması için, 96-120 saat süresince, %10 (w/v) cevher veya flotasyon atığı, Nutrient Broth içerisinde ve aerobik koşullarda 30°C ve 150 rpm'de inkübe edilerek uygulanmıştır. Ön kültürler ve bakteri izolasyonunu takiben 50 ml nispeten büyük ölçekli çalışma yapılmıştır. Bu çalışmada örneklerden 24h, 48h ve 120h saatlerde 10 ml örnekler alınmış, kalan miktar 2 hafta boyunca oda sıcaklığında tutulmuştur. Buna göre; cevher ve flotasyon atığı içeren erlenlerden, üst sıvı ve katı madde ayrılması 3500 rpm'de, 5 dakika boyunca santrifüjlenerek yapılmıştır. Üst sıvılar ayrılmış, kalan çökeltiler de etüvde kurutulmuştur.

Biyoliçing aktivitesi için ayrılan üst sıvılar ICP-OES analizi ile, çökelmiş katı maddeler ise XRF analizi ile incelenmiş ve alınan ölçüm sonuçları irdelenmiştir. Çalışmanın sonucunda cevher ve flotasyon atığında bulunan kurşun, çinko ve bakır ve bunlar gibi ağır metallerin, bir adet cevher izolatu (C2) ve bir adet flotasyon atığı izolatu (F8) tarafından farklı oranlarda biyolojik iyileştirme veya biyoliçing aktivitesi gösterdiği belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Kurşun, Çinko, Ağır Metal, Cevher, Flotasyon Atığı, Biyoliçing

ABSTRACT

Bioremediation is an alternative method where microorganisms extract metals from ores or waste. Leaching is a sustainable, energy-efficient, and cost-effective method that allows for the extraction of large quantities of metals. While bioremediation separates metals, it also facilitates the bioremediation of toxic heavy metals.

In this study, ore and flotation waste obtained from the Balıkesir (Balya) Lead-Zinc Mine were bioremediated using local isolates. At the beginning of the study, the elemental composition of the ore and flotation waste was determined by XRD analysis. Bacterial isolation from ore and flotation waste samples from the mine site was performed using Tryptic Soy Broth, Tryptic Soy Agar, and Nutrient Agar at the appropriate temperature and incubation time. For the bioremediation study, 10% (w/v) ore or flotation waste was incubated in Nutrient Broth at 30°C and 150 rpm under aerobic conditions for 96-120 hours. Following pre-cultures and bacterial isolation, a relatively large-scale 50 ml study was conducted. In this study, 10 ml samples were taken at 24, 48, and 120 hours, and the remaining amount was kept at room temperature for 2 weeks. Accordingly, supernatant and solid separation was achieved by centrifuging the flasks containing ore and flotation waste at 3500 rpm for 5 minutes. The supernatants were separated, and the remaining sediments were dried in an oven.

The supernatants separated for bioremediation activity were analyzed using ICP-OES analysis, and the precipitated solids were analyzed using XRF analysis, and the obtained measurement results were analyzed. As a result of the study, it was determined that lead, zinc and copper and similar heavy metals in the ore and flotation waste exhibited bioremediation or bioremediation activity at different rates by one ore isolate (C2) and one flotation waste isolate (F8).

Keywords: Lead, Zinc, Heavy Metal, Ore, Flotation Waste, Bioremediation

TEŞEKKÜR

Tez çalışmamız süresince beni destekleyen danışmanım Sayın Dr. Öğretim. Üyesi Yosun MATER'e en içten teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmamızda kullandığımız cevher ve flotasyon atığını temin etmemizi sağlayan Prof. Dr. Mehmet Salim ÖNCEL'e ve tez çalışmamız süresince bize laboratuvarlarından faydalanma imkânı sunan Sayın Prof. Dr. Sedef TUNCA GEDİK ve Doç. Dr. Mine GÜL ŞEKER'e teşekkür ederim.

Yanında çalıştığım süre boyunca benzersiz bir laboratuvar tecrübesi edindiğim eski danışmanım Doç. Dr. Özlem AKKAYA'ya, Ahmet KALAYCI'ya ve eski çalışma arkadaşlarım Hatice ARSLAN ve Mustafa Eren YILDIZ'a içten teşekkür ederim.

Kendileriyle aynı laboratuvarında çalıştığım ve gerektiğinde benden yardımlarını esirgemeyen Arş. Gör. Pelin KİRAZ ve Murat ÖZTÜRK'e teşekkürlerimi sunarım.

Beni maddi ve manevi her koşulda destekleyen sevgili aileme çok teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	vi
ABSTRACT	vii
TEŞEKKÜR	viii
İÇİNDEKİLER	ix
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	xi
ŞEKİLLER DİZİNİ	xiii
TABLolar DİZİNİ	xiv
1. GİRİŞ	1
1.1. Tezin Amacı, Katkısı ve İçeriği	2
2. GENEL KISIMLAR	4
2.1. Ağır Metal Nedir?	4
2.2. Ağır Metal Kirliliği	5
2.2.1. Maden Atıklarının Neden Olduğu Ağır Metal Kirliliği	7
2.3. Kurşun ve Çinko Cevherlerinin Yapısı	8
2.3.1. Kurşun ve Çinko Üretimi	11
2.3.2. Türkiye’de Kurşun ve Çinko Üretimi	13
2.3.2.1. Balıkesir Balya Kurşun Çinko Madeni	13
2.4. Flotasyon ve Flotasyon Atığı Nedir?	15
2.4.1. Balıkesir Balya Flotasyon Atıkları	16
2.5. Biyoliçing Nedir?	16
2.5.1. Biyoliçing Mekanizmaları	17
2.5.1.1. Asidoliziz	18
2.5.1.2. Kompleksoliziz	19
2.5.1.3. Redoksoliziz	20
2.5.1.4. Biyoakümülyasyon	21
2.5.1.5. Biyomineralizasyon	21
2.5.2. Kurşun ve Çinko Biyoliçingi	22
3. GEREÇLER	24
3.1. Kullanılan Besiyerleri	24
3.2. Kullanılan Cihazlar	24
3.3. Kullanılan Sarf Malzemeleri	24
4. YÖNTEMLER	25
4.1. Kullanılacak İzolatların Seçilmesi	25
4.2. İzolatların Üretimi ve Seçimi	26
4.3. Belirlenen İzolatların Biyoliçing Çalışmasında Kullanılması	26
4.4. İndüktif Eşleşmiş Plazma – Optik Emisyon Spektroskopisi (ICP-OES) ile Element Analizleri	28
4.5. X-Işını Floresans Spektrometresi (XRF) Element Analizleri	29
5. BULGULAR	30

5.1. Cevher ve Flotasyon Atığı İzolatların Üretimi ve Seçilimine Ait Bulgular	30
5.2. Seçilen İzolatlarla Gerçekleştirilen Büyük Ölçekli Çalışmaya Ait Bulgular	31
5.3. Kimyasal Analizlere Ait Bulgular	31
5.3.1. X-Işını Floresans Spektrometresi (XRF) Analizlerine Ait Bulgular	31
5.3.2. İndüktif Eşleşmiş Plazma Optik Emisyon Spektroskopisi (ICP-OES) Analizlerine Ait Bulgular	34
6. TARTIŞMA	37
KAYNAKLAR	41
ÖZGEÇMİŞ	47
TEZ METNİNDEN TÜRETİLEN YAYINLAR	48

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

(ZnOH) ₂ .SiO ₂	: Hemimorfit
°C	: Derece Celcius
Ag	: Gümüş
Al	: Alüminyum
As	: Arsenik
Au	: Altın
Bi	: Bizmut
C ₆ H ₁₁ O ₇	: Glukonik asit
C ₆ H ₅ O ₇	: Sitrat
CaCO ₃	: Kalsit
CaF ₂	: Florit
Cd	: Kadmiyum
CO	: Karbon monoksit
CO ₂	: Karbon dioksit
Cu	: Bakır
CuFeS ₂	: Kalkopirit
dH ₂ O	: Distile su
EPS	: Hücre dışı polimerik maddeler
Fe	: Demir
Fe ⁺²	: Ferro iyonu
Fe ⁺³	: Ferrik iyonu
FeS ₂	: Pirit
FeSO ₄	: Demir (II) sülfat
H	: Hidrojen
h	: Saat
H ₂	: Dihidrojen
H ₂ O	: Su
H ₂ SO ₄	: Sülfürik asit
H ₃ BO ₃	: Borik asit
Hg	: Cıva
HNO ₃	: Nitrik asit
ICP-OES	: İndüktif Eşleşmiş Plazma Optik Emisyon Spektroskopisi
Me ⁺²	: Metal iyonu
MeO	: Metal oksit bileşiği
MeS	: Metal sülfür bileşiği
MeX	: Metal bileşiği
Mg	: Magnezyum
Mn	: Manganez
MoS ₂	: Molibden disülfür
NB	: Nutrient Broth
Ni	: Nikel
O	: Oksijen
O ₂	: Oksijen iyonu
Pb	: Kurşun
Pb ₃ Sb ₂ S ₆	: Bulanjerit
Pb ₄ As ₂ S ₇	: Jordanit

$Pb_5Cl(AsO_4)_3$	: Mimetit
$Pb_5Cl(PO_4)_3$	: Piromorfit
$Pb_5FeSb_6S_{14}$	: Jamesonit
$PbCO_3$	: Seruzit
$PbMoO_4$	: Vulfenit
PbS	: Galenit
$PbSO_4$	: Anglezit
RLE	: Kavurma-liç-elektro kazanma
rpm	: Dakikada Dönüş Sayısı
S^0	: Elementel kükürt
$S_2O_3^{-2}$	: Tiyosülfat
Sb	: Antimon
Sn	: Kalay
SO_2	: Kükürt dioksit
SO_4	: Sülfat
SRM	: Sertifikalı Referans Materyaller
Ti	: Titanyum
TSA	: Triptik Soy Agar
TSB	: Triptik Soy Broth
U	: Uranyum
VMS	: Volkajenik Masif Sülfat
WS_2	: Tungsten disülfür
XRF	: X-ışını floresans spektrometresi
Zn	: Çinko
Zn_2SiO_4	: Vilemit
$ZnCO_3$	: Smitsonit
ZnF_2O_4	: Franklinit
ZnO	: Zinkit
ZnS	: Sfalerit

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 2.1: Doğrudan eritme-indirgeme işlemi ile kurşun üretimi.	11
Şekil 2.2: RLE ile çinko üretimi.	12
Şekil 2.3: Türkiye'deki kurşun ve çinko yatakları.	13
Şekil 2.4: Kurşun-çinko cevherinin flotasyon öncesi muamele edilmesi ve flotasyon işlemi.	15
Şekil 4.1: 90mmx15mm petri plaklarda cevher (A) ve flotasyon (B) zuhurları.	25
Şekil 4.2: İzolatların ön üretim ortamı.	25
Şekil 4.3: Cevher (A) ve flotasyon atığından (B) üreyen izolatlardan örnekler.	26
Şekil 4.4: Kontrol erlenleri (+), (-) ve Cevher (A) ve flotasyon atığı (B).	27
Şekil 4.5: ICP-OES cihazı görüntüsü.	28
Şekil 4.6: Cevher ve Flotasyon atığı analizlerinin yapıldığı XRF cihazı görüntüsü.	29
Şekil 5.1: Cevher (A) ve flotasyon atığından (B) seçilen izolatların çizgi ekim sonuçları.	30
Şekil 5.2: Deney öncesi (0 h), deney sonrası (2Hf) ve C2 bakteri örneğini içeren deney ortamının cevher bileşenlerinin XRF ölçüm sonuçlarının grafiği.	32
Şekil 5.3: Deney öncesi (0 h), deney sonrası (2Hf) ve F8 bakteri örneğini içeren deney ortamının flotasyon atığı bileşenlerinin XRF ölçüm sonuçlarının grafiği.	34
Şekil 5.4: Deney sonrası (2Hf-CK) ve C2 bakteri örneğini içeren deney ortamının cevher bileşenlerinin ICP-OES ölçüm sonuçlarının grafiği	35
Şekil 5.5: Deney sonrası (2Hf-FK) ve F8 bakteri örneğini içeren deney ortamının flotasyon atığı bileşenlerinin ICP-OES ölçüm sonuçlarının grafiği.	36

TABLÖLAR DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Tablo 4.1: Deney düzenekleri hakkında bilgi.	27
Tablo 5.1: Deney öncesi (0 h), deney sonrası (2Hf) ve C2 bakteri örneğini içeren deney ortamının cevher bileşenlerinin XRF ölçüm sonuçları.	32
Tablo 5.2: Deney öncesi (0 h), deney sonrası (2Hf) ve F8 bakteri örneğini içeren deney ortamının flotasyon atığı bileşenlerinin XRF ölçüm sonuçları.	33
Tablo 5.3: Deney sonrası (2Hf-CK) ve C2 bakteri örneğini içeren deney ortamının cevher bileşenlerinin ICP-OES ölçüm sonuçları.	35
Tablo 5.4: Deney sonrası (2Hf-FK) ve F8 bakteri örneğini içeren deney ortamının flotasyon atığı bileşenlerinin ICP-OES ölçüm sonuçları.	35

1. GİRİŞ

İnsanlık tarihi boyunca metallerin çıkarılması ve işlenmesi medeniyetin gelişimine benzersiz bir katkıda bulunmuştur **[Laznicka, 2006]**. Minerallerden metalleri elde etmek için pirometalurjik ve hidrometalurjik yöntemlerden faydalanılmaktadır. Bu yöntemler ile önemli miktarda metal elde edilmektedir, fakat yüksek işletim maliyeti, enerji sarfıyatı ve çevre kirliliğine yol açan atıkların üretilmesi gibi önemli dezavantajları da beraberinde getirmektedir **[Seetharaman, 2014; Owusu-Fordjour ve Yang, 2023]**. Metalürji kaynaklı bir diğer çevre sorunu ise maden cevherlerinin işlenmesi sonucu ortaya çıkan atıklar ve tortulardır. Bünyelerinde hala cevher minerallerini bulunduran bu atık ve tortular çoğu kez ikincil bir işlemde geçirilmeden çevreye bırakılmakta ve bırakıldıkları bölgede uzun süre bekledikleri için, ağır metal kirliliğine neden olmaktadır. Madencilik vbg insan faaliyetleri sonucu toprak ve sudaki miktarları önemli ölçüde artan bu ağır metaller toksik maddelerdir ve canlıların yaşamını olumsuz yönde etkilerler **[Fuentes vd., 2018; Dong vd., 2023; Parlak vd., 2024]**. Ayrıca maden atıklarının bünyesinde hala işlenilebilecek miktarda metal bileşikleri bulunmaktadır **[Panda vd., 2024]**.

Mikroorganizmaları kullanarak hem endüstriyel öneme sahip metalleri ucuz, sürdürülebilir ve çevre dostu bir yöntemle elde etmek, hem de maden atıklarını değerlendirip çevre için oluşturdukları riski azaltmak mümkündür **[Dong vd., 2023; Schueler vd., 2024]**. Metalleri cevherlerden ya da maden atıkları gibi kaynaklardan elde etmek için mikroorganizmaların kullanılmasına “biyoliçing” adı verilmektedir **[Panda vd., 2024]**. Canlı organizmaların ağır metaller gibi toksik maddeleri ortamdan uzaklaştırmaları “biyoremediasyon” olarak adlandırılır **[Bharagava, 2017]**. Bazı bakteri, arkea, fungi, maya ve mikroalg türleri metabolik aktiviteleri ya da fizikokimyasal yapıları sayesinde metalleri, minerallerden ayırıştırma ve metal iyonlarını bünyelerinde tutma özelliğine sahiptirler **[Panda vd., 2024]**. Mikroorganizmaların bu özelliklerinden faydalanılarak maden cevherlerinin zenginleştirilmesi ya da metal atıklarının temizlemesi günümüzde giderek daha fazla önem kazanmaktadır **[Varjani vd., 2018b]**.

1.1. Tezin Amacı, Katkısı ve İçeriği

Bu tez çalışmasının temel amacı, Balıkesir – Balya maden alanından temin edilen kurşun-çinko cevheri ve flotasyon atığından izole edilen mikroorganizmalar yardımıyla kurşun ve çinko metallerini ayrıştırma ya da bünyelerinde tutma kabiliyetlerini test etmektir.

Doğada çoğunlukla metal sülfür bileşikleri olarak bulunan kurşun ve çinko, en yaygın kullanılan demir dışı metaller arasında yer alır **[Tombul ve Ünver, 2022]**. Kurşun ve çinkonun mineral cevherlerinden eldesi için çoğunlukla pirometalurjik ve hidrometalurjik yöntemlerden faydalanılır **[Seetharaman, 2014]**. Balıkesir ili sınırlarında bulunan ve çok uzun bir süredir aktif olan Balya Kurşun-Çinko maden rezervi Türkiye'nin önde gelen kurşun-çinko madenleri arasındadır **[Çelebi ve Öncel, 2016]**. Son yüzyıllarda Balya kurşun-çinko rezervinden çıkarılan cevherlerin, flotasyon ve izabe yöntemleri ile işlenmesi sonucu oluşan atıklar maden alanı çevresine bırakılmıştır. Bu atıklar ağır metal kirliliğine neden oldukları gibi bünyelerinde geri kazanılma potansiyeli olan metalleri de barındırmaktadır **[Baştürk ve Aydoğan, 2022]**.

Bu sayede ülkemizin maden rezervlerinden çıkarılan cevherleri, yüksek enerji sarfiyatına neden olmayan, uygun maliyetli ve sürdürülebilir bir şekilde işlemek için gerekli yöntemlerin geliştirilmesine destek olunmuştur. Maden atıklarından endüstriyel öneme sahip fakat çevre ve insan sağlığı için toksik olan kurşun ve çinko metallerinin geri kazanımı ile hem bu atıklarda bulunan metallerin değerlendirilmesi ve ülkemizin bu yöndeki üretim hacminin artırılması, hem de çevre ve halk sağlığı için tehlikeli olan atıkların detoksifikasyonu mümkün olabilir. Çalışmamızda kullanılan bakteriler ülkemizin en önemli kurşun-çinko madenlerinden birisi olan Balya madeninden temin edilen cevher ve flotasyon zuhurlarından elde edildiği için özgündür. Ayrıca bu mikroorganizmalar biyoliçing denemelerinde kullanılmak için tarafımızdan izole edilmiştir ve endemik tür olma olasılıkları bulunmaktadır. Buna ek olarak çalışmamız ülkemizin en önemli kurşun-çinko madenlerinden birisi olan Balıkesir – Balya madeninden elde edilen cevher zuhurunun biyoliçing ile ayrıştırılmasına yönelik yenilikçi çalışmalar arasındadır.

Biyoliçing yöntemleri, konvansiyonel madencilik yöntemlerine çevre dostu ve ekonomik bir alternatif olarak ortaya çıkmıştır. Bu yöntem gün geçtikçe daha da çok

önem kazanan ve yeni literatürler ile desteklenen güncel bir çalışma alanıdır. Dolayısı ile çalışmamız da literatüre katkıda bulunmaktadır ve reaktör tasarlanarak patentlenme olasılığı yüksektir.

2. GENEL KISIMLAR

2.1. Ağır Metal Nedir?

Ağır metaller, görece yüksek yoğunluğa, atom ağırlığına ya da atomik kütleye sahip olan metal elementleridir. Bununla birlikte genelde yoğunluğu 5 g/cm^3 'ün ve atom numarası 20'nin üzerinde olan metal elementleri, ağır metaller olarak tanımlanır **[Bharagava, 2017; Varjani vd., 2018a; Fuentes vd., 2018]**. Yaklaşık 65 tane metal elementi ağır metal sınıfına girmektedir **[Varjani vd., 2018b]**.

19.yüzyıla kadar insanoğlunun binlerce yıldır kullandığı demir (Fe), bakır (Cu), kalay (Sn), altın (Au), gümüş (Ag) vbg ağır metallerdir. Bilinen en eski “ağır metal” tanımlarından birisi Alman kimyacı Leopold Gmelin tarafından yapılmıştır. Gmelin elementleri yoğunluğu $0.860 - 5 \text{ g/cm}^3$ arasında değişen “hafif metaller”, $5.308 - 22 \text{ g/cm}^3$ arasında yoğunluklara sahip “ağır metaller” ve ametaller olarak üç gruba ayırmıştır. Sonrasında “ağır metal” terimi yüksek yoğunluğa ya da atom ağırlığına sahip metalleri tanımlamak için kullanılmıştır. Alüminyum (Al), magnezyum (Mg), titanyum (Ti) vbg daha hafif yoğunluklu metaller de 1809 yılından sonra keşfedilmeye başlanmıştır **[Bharagava, 2017]**.

Ağır metaller yer kabuğunda görece nadirdir ve mineraller, tuzlar vbg bileşikler halinde bulunurlar. Redoks durumlarının değişmesi ile mobilize olup toprağa, suya ve havaya karışabilirler. Bazı ağır metaller düşük miktarlarda alındığında mikroorganizmaların yaşamsal faaliyetleri için gereklidir. Örneğin bitkilerin bünyelerine aldıkları ağır metaller de besin zincirine dahil olabilirler **[Bharagava, 2017; Fuentes vd., 2018]**. Çinko (Zn) bir esansiyel elementtir ve ortamda çinko bileşiklerinin eksikliği bitkilerin büyümelerini yavaşlatabilir. Buna karşın yine çinko (Zn), demir (Fe), bakır (Cu), manganez (Mn) vbg metaller canlıların yaşamsal faaliyetlerinde, izin verilen miktarın üzerinde bünyeye alındığında toksik etki gösterirler. Kurşun (Pb), kadmiyum (Cd), arsenik (As), cıva (Hg) vbg bazı ağır metallerin ise canlı yaşamı üzerinde az miktarı bile toksik etki gösterebilir **[Varjani vd., 2018a]**. Bunun nedeni ağır metallerin kolaylıkla biyolojik moleküllere geri dönüşümsüz bağlanabilme yetenekleridir. Amino, fosfat, sülfidril, karboksil ve hidroksil grupları ağır metallerin kimyasal bağ yaptıkları başlıca fonksiyonel gruplardır. Biyolojik moleküllerin yapısına bağlanan toksik ağır metaller, proteinlerin

yapısını değiştirebilir, metabolik faaliyetler için gerekli diğer ağır metallerin yerine geçebilir, reaktif oksijen türlerinin ortaya çıkmasına neden olabilir ve oksidatif strese neden olarak DNA'nın yapısını değiştirebilirler **[Fuentes vd., 2018]**.

Ağır metallerin günümüzde önemli ve gerekli olduğu kullanım alanları son derece geniştir. Günlük kullanılan telefon gibi basit aletlerden, parçacık hızlandırıcılar adı verilen gelişmiş makinelere kadar modern yaşamın içerisinde var olan birçok ürünün yapısında bulunmaktadır **[Bharagava, 2017]**.

2.2. Ağır Metal Kirliliği

Ağır metaller, polisiklik aromatik hidrokarbonlar ile birlikte çevre kirliliğine neden olan başlıca kirleticilerdir. Toprak, hava ve yer altı sularına karışan ağır metaller besin zincirine de dahil olurlar ve besin zincirinin farklı kademelerindeki canlılarda birikebilir, mikroorganizmalar, bitkiler, hayvanlar ve insanlar için zararlı etkilere neden olabilirler **[Das, 2014]**. Ağır metaller kalıcıdır, sonuçta karasal ve sucul ekosistemlerde ciddi problemlere neden olurlar **[Fuentes vd., 2018]**.

Ağır metal kirliliği doğal olaylar sonucunda da gerçekleşebilir. Çinko (Zn), demir (Fe), arsenik (As), mangan (Mn) vbg ağır metaller toprakta ya da kayaların yapısında bileşikler olarak bulunurlar ve deprem, sel, volkanik patlama vbg doğa olayları sonucu ayrışıp toprağa ve suya karışabilir **[Das, 2014]**. Biyojeokimyasal aktiviteler de toprak ve sudaki ağır metal miktarının artmasına neden olmaktadır. Bazı mikroorganizmaların metabolik aktiviteleri sonucunda da ağır metaller, kontrolsüz bir şekilde minerallerden ayrışabilirler **[Das ve Dash, 2017]**.

Bununla birlikte genele bakıldığında ağır metal kirliliği büyük oranda insan kaynaklıdır. Sanayileşme ve insan nüfusunun artması kirleticilerin çevreye yayılmasında birincil etkindir. Sanayi atıkları ağır metal kirliliğinin en önemli nedenleri arasındadır. Bunun yanı sıra evsel ve tarımsal atıklar ağır metal kirliliğine neden olurlar **[Das, 2014]**. Endüstriyel faaliyetler sonucu çevreye yayılan ağır metallerin oranı doğal jeokimyasal döngüler sonucu çevreye salınan ağır metallerin oranlarından çok daha yüksektir. Karasal ve sucul ekosistemlerdeki metabolik faaliyetlerde ileri düzeylerde ağır metal birikmesine neden olurlar. Kullanım süresi dolmuş ağır metal içeren ürünler de metal kirliliğinin başlıca nedenleri arasındadır **[Varjani vd., 2018b]**.

Bu kirlilik etkenlerine metaller düzeyinde baktığımızda örneğin kurşun kirliliği, çoğunlukla madencilik aktivitelerinden ve endüstriyel atıklardan kaynaklanmaktadır **[Das ve Dash, 2017]**. Bunun yanı sıra atık piller, benzin, tesisat malzemeleri, patlayıcılar, pestisitler ve çürüme önleyici kimyasallar kurşun kirliliğine neden olur **[Varjani vd., 2018a]**. Topraktaki kurşun kontaminasyonu da bitki örtüsünün kaybına, yer altı sularının kirlenmesine ve bitkilerde kurşun birikmesine neden olur. Bitki bünyesinde birikmiş kurşun, insan ve hayvanların sağlığı için risk oluşturmaktadır **[Das ve Dash, 2017]**. Kurşun bitkilerin yapısına alındığında fotosentezi ve büyümeyi olumsuz etkiler, klorofil yetersizliğine neden olur, enzim aktivitelerine ve tohumların çimlenmesine engel olur. Ayrıca oksidatif strese de neden olur **[Fuentes vd., 2018]**. İnsan vücuduna kontamine olmuş besinler ile giren kurşun iyonu (Pb^{+2}), enzimlerin aktivitelerini engellemekte ve toksisiteye neden olmaktadır. Ek olarak yüksek miktarda kurşun birikmesi nörolojik ve genetik bozukluklara, sindirim, üreme ve kas sisteminde hastalıklara neden olmaktadır **[Das ve Dash, 2017]**. Kurşun miktarının içme sularında 0.015 mg/L'yi, toprakta ise 2 – 200 mg/kg'ı geçmemesi gereklidir **[Varjani vd., 2018a]**.

Bir başka ağır metal olan cıva ise yer kabuğunun yapısında bulunmaktadır. Genellikle kayaların ayrışması, volkanik aktiviteler vbg doğa olayları sonucu çevreye karışır. Bununla birlikte çevreye salınan cıva miktarının normalin üzerinde artmasının başlıca nedenleri, kömür kullanımı, madencilik aktiviteleri ve endüstriyel atıklardır. Literatürlerde cıvanın içme sularında bulunan miktarının 0.002 mg/L'yi topraktaki miktarının ise 0.01 – 0.3 mg/kg'ı geçmemesi gerektiği bildirilmiştir **[Varjani vd., 2018a]**. Cıva bitkilerin yapısına alındığında fotosentezi ve antioksidatif sistemleri etkilemekte, lipid peroksidasyonunu artırmakta, genotoksisiteye neden olmakta ve bitkinin büyümesini engellemektedir. İnsan vücuduna girdiğinde ise kas koordinasyon bozukluğu, konuşma güçlüğü, hafıza kaybı, skleroz vbg sağlık problemlerine neden olmaktadır **[Fuentes vd., 2018]**.

Genelde sularda ağır metal kirliliğine neden olan arsenik ise tıpkı diğer ağır metaller gibi doğa olayları ya da insan aktiviteleri sonucunda çevreye karışır. Arsenik kirliliğinin temel kaynağı endüstriyel faaliyetler sonucunda çevreye bırakılan atık maddelerdir. Literatürlere göre arsenik miktarının içme sularında 0.05 mg/L'yi, toprakta ise 1 – 50 mg/kg'ı geçmemesi gereklidir **[Varjani vd., 2018a]**. Arsenik bitkilerin yapısına alındığında büyümeyi engeller ve verimliliğin azalmasına neden

olur [Fuentes vd., 2018]. Ayrıca insan vücuduna su, yiyecekler veya solunum yolu ile giren arsenik, nörotoksiktir ve kansere neden olmaktadır [Varjani vd., 2018a].

Yer kabuğunda görece yaygın bulunan bir diğer ağır metal kadmiyumdur. Çoğunlukla madencilik aktiviteleri ve endüstriyel atıklar ile çevreye karışmaktadır ve literatürlere göre miktarının içme suyunda 0.005 mg/L'yi, toprakta ise 0.01 – 0.7 mg/kg'ı geçmemesi gerektiği bildirilmiştir [Varjani vd., 2018a]. Bitkilerin yapısına alındığında büyümeyi engeller, besin değerini düşürür ve tohum çimlenmesini azaltır [Fuentes vd., 2018]. Kadmiyum insan vücuduna yiyecekler ya da sigara içilmesi ile girer [Varjani vd., 2018a]. Fazla miktarda alındığında lenfositoz, akciğer ve prostat kanseri, kemik hastalıkları, üreme sisteminde bozukluklar vbg sağlık sorunlarına neden olduğu rapor edilmiştir [Fuentes vd., 2018].

Bir diğer ağır metal olan çinko yer kabuğunda bol miktarda bulunur. Buna ek olarak toprak, su ve havadaki miktarı insan kaynaklı aktiviteler ile artmaktadır. Çinko kirliliğinin nedenleri arasında metalürjik atıklar, galvanizasyon ya da pil üretimi gibi faaliyetler sayılabilir. Literatürlere göre çinko ağır metalinin miktarının içme sularında 5.0 mg/L'yi ve toprakta 10 – 300 mg/kg'ı geçmemesi gerektiği bildirilmiştir. Bu miktar kısıtlamasının sebebi çinkonun oksijen ya da asit gibi başka kimyasallarla reaksiyona girdiğinde toksik hale gelmesidir. Metalik formdaki çinkoya bakıldığında ise çoğunlukla toksik olmasa da biyoyararlanımının sınırlı olduğu görülmektedir [Varjani vd., 2018a]. Çinko fazla miktarda bitkilerin bünyesine alındığında fotosentezi ve büyümeyi olumsuz etkiler. Buna ek olarak klorofil yetersizliğine neden olur, bitkinin biyokütlesini ve çimlenme oranını azaltır. İnsan vücuduna alınan fazla miktarda çinko ise prostat kanseri, böbrek ve karaciğer yetmezliği, kas koordinasyon bozukluğu vbg hastalıklara neden olur [Fuentes vd., 2018].

2.2.1. Maden Atıklarının Neden Olduğu Ağır Metal Kirliliği

Madencilik faaliyetleri sonucunda yüksek miktarda maden atığı ortaya çıkmaktadır, bu atıklar günümüzde sanayileşmiş ülkelerde ciddi çevre sorunlarına neden olmaktadır [Fuentes vd., 2018].

Maden cevherleri işlendikten sonra ortaya çıkan atıklar, çoğunlukla hiçbir işleme tabi tutulmadan çevreye bırakılmaktadır ve yeniden kullanılma oranları oldukça düşüktür. Amerika gibi gelişmiş ülkelerde bile maden atıklarının %50'sinden fazlası geri

dönüştürülememektedir **[Dong vd., 2023]**. Literatüre göre sadece Çin’de, kurşun-çinko maden cevherlerinin işlenmesinden sonra çevreye bırakılan atıkların miktarı 960 milyon tonun üzerindedir **[Ye vd., 2021]**. Bu ve benzeri madencilik faaliyetlerinden 33.000 hektar arazinin etkilendiği bildirilmektedir. Madencilik faaliyetleri ve oluşan atıklara dair diğer dikkat çekici örneklerle bakıldığında örneğin Şili’de günlük 1.6 milyon ton maden tortusu ortaya çıktığı, Güney Afrika’da ise sadece altın madenlerinin tortularının 17.7 milyon tonu geçtiği bildirilmektedir **[Dong vd., 2023]**. Elde edilen verilere göre porfir bakır cevherlerinin %90’ından fazlası işlendikten sonra atık olarak çevreye bırakılmaktadır **[Fereydouni vd., 2025]**. Benzer şekilde alüminyum cevherlerinin işlenmesi sonucu açığı çıkan ve ağır metaller içeren, kirletici kırmızı çamurun dünya genelindeki miktarının 2 milyar tonun üzerinde olduğu bildirilmektedir **[Zhang vd., 2020]**.

Ağır metal kirliliğine neden olan bir diğer etken maden tortularının bünyelerindeki toksik metallerin jeokimyasal aktiviteler sonucunda toprağa ve yer altı sularına taşınmasıdır **[Ye vd., 2021; Dong vd., 2023; Fereydouni vd., 2025]**. Dolayısı ile çevre sorunlarının önüne geçmek için madencilik faaliyetleri sonucunda ortaya çıkan atıkların doğru şekilde değerlendirilmesi veya depolanması önemlidir. Maden atıkları sfalerit, pirit, kalkopirit, arsenopirit gibi indirgenmiş mineraller içerirler. Bu nedenle bu atıklardan endüstriyel öneme sahip metallerin geri kazanılması ve ikincil kaynak olarak değerlendirilmesi mümkündür **[Panda vd., 2024]**.

2.3. Kurşun ve Çinko Cevherlerinin Yapısı

Kurşun (Pb) atom numarası 82, yoğunluğu 11.34 g/cm^3 olan, 5000 yıldır insanoğlu tarafından çok farklı alanlarda kullanılan bir metaldir. Günümüzde temel kullanım alanları arasında; pil üretimi, yeraltı kablolarının yalıtımı, oktan boyalarının üretimi ve x-ışınlarına karşı korunma sağlayan ürünlerin yapısına katılması gösterilebilir. Kurşun; yoğunluğu yüksek, kolay işlenebilir ve korozyona dirençli bir metaldir. Doğada 130’un üzerinde kurşun minerali bulunabilir, en yaygın bulunan mineral formu, kurşun (II) sülfür bileşiği olan galenit (PbS)’tir. Galenit çoğunlukla sfalerit (ZnS), kalsit (CaCO_3), florit (CaF_2) mineralleri ve kadmiyum (Cd), arsenik (As), kalay (Sn), antimon (Sb), bizmut (Bi), altın (Au) ve gümüş (Ag) elementleri ile bir arada bulunur **[Seetharaman, 2014; Tombul ve Ünver, 2022; Zhou vd., 2023]**. Galenitten sonra en yaygın kurşun mineralleri seruzit (PbCO_3), anglezit (PbSO_4), jamesonit

($\text{Pb}_5\text{FeSb}_6\text{S}_{14}$), jordanit ($\text{Pb}_4\text{As}_2\text{S}_7$), bulanjerit ($\text{Pb}_3\text{Sb}_2\text{S}_6$), piromorfit ($\text{Pb}_5\text{Cl}(\text{PO}_4)_3$), mimetit ($\text{Pb}_5\text{Cl}(\text{AsO}_4)_3$) ve vulfenit (PbMoO_4)'tir [**Yarluğkal Altınışık, 2019**].

Bir diğer ağır metal çinko ise demir olmayan metaller arasında, küresel üretim hacmi bakımından bakır (Cu) ve alüminyum (Al)'un ardından üçüncü sırada yer alır. Korozyona dayanıklı ve kolay işlenebilir bir metaldir [**Nan vd., 2024**], atom numarası 30, yoğunluğu 7.14 g/cm^3 olarak bilinir. İnsanoğlu tarafından 4000 yıldan uzun süredir kullanıldığı bilinmektedir. Güçlü elektropozitif özelliğinden ötürü başta demir-çelik ürünleri olmak üzere, diğer metalleri korozyondan korumak için kullanılır. Literatür bilgisine göre, kimyasal olarak aktif bir element olduğu ve kolaylıkla kimyasal bağ oluşturabildiği için birçok alaşımın yapısında bulunmaktadır [**Tombul ve Ünver, 2022**]. Verilere göre Dünya genelinde üretilen çinkonun yaklaşık %60'ı galvanizasyon için çelik endüstrisinde kullanılmaktadır [**Hellgren vd., 2024**]. Doğada en yaygın bulunan çinko minerali, çinko sülfür olan sfalerit (ZnS)'tir. Bunun yanı sıra smitsonit (ZnCO_3), zinkit (ZnO), vilemit (Zn_2SiO_4), franklinit (ZnF_2O_4) ve hemimorfit ($\text{ZnOH})_2\text{SiO}_2$ gibi ticari öneme sahip diğer çinko mineralleri de bulunmaktadır [**Yarluğkal Altınışık, 2019; Tombul ve Ünver, 2022**]. Çinko canlılar için de önemli bir geçiş elementidir ve birçok enzimin aktif bölgesinde hem fonksiyonel hem de yapısal işlevi bulunduğu bilinmektedir. Bakterilerde de hücre proteinlerinin %5-6'sının yapısında çinko bulunduğu gösterilmiştir [**Behera ve Das, 2023**].

Literatürlere göre kurşun-çinko cevher yataklarının doğada oluşumu farklı şekillerde gerçekleşir. Buna göre;

- (i) Sedimanter kurşun-çinko yatakları: Dünya üzerindeki en önemli kurşun ve çinko kaynağıdır. Bununla birlikte gümüş, bakır, arsenik, manganez ve hatta kritik metalleri de içerirler.
- (ii) Volkanojenik masif sülfür (VMS) yatakları: Deniz tabanındaki volkanik ortamda oluşur ve genellikle çinko yönünden zengindirler.
- (iii) Skarn tipi kurşun-çinko yatakları: Kurşun ve çinkonun yanı sıra altın, gümüş, tungsten, kalay, molibden, bakır, arsenik vb. elementleri de içerir. Çoğunlukla kurşun üretimi için önemli değildir [**Mudd vd., 2017; Yarluğkal Altınışık, 2019**].

- (iv) Porfir yatakları: Metaller açısından düşük ya da orta derece de zengindirler. Genelde bakır, gümüş, altın ve molibden üretimi için işletilirler. Çoğunlukla kurşun ve çinko yönünden zengin değildirler
- (v) Epitermal yataklar: Çoğunlukla altın ve gümüş cevherlerini barındırırlar, aynı zamanda kurşun, çinko, bakır, arsenik, kalay ve antimon içerirler.
- (vi) Manto tipi yataklar: Genellikle kurşun, çinko, bakır ve gümüş minerallerini içerirler.
- (vii) Demir oksit bakır altın yatakları: Genelde demir, bakır ve altın içerirler, buna ek olarak önemli miktarda gümüş, kobalt, uranyum ve nadir toprak elementlerini de barındırabilirler. Çoğunlukla ekonomik açıdan önemli oranlarda kurşun ve çinko içermezler
- (viii) Orojenik altın yatakları ve mezotermal damar yatakları: Yüksek oranda altın içerirler, kurşun ve çinko ise yan ürünler olarak üretilirler

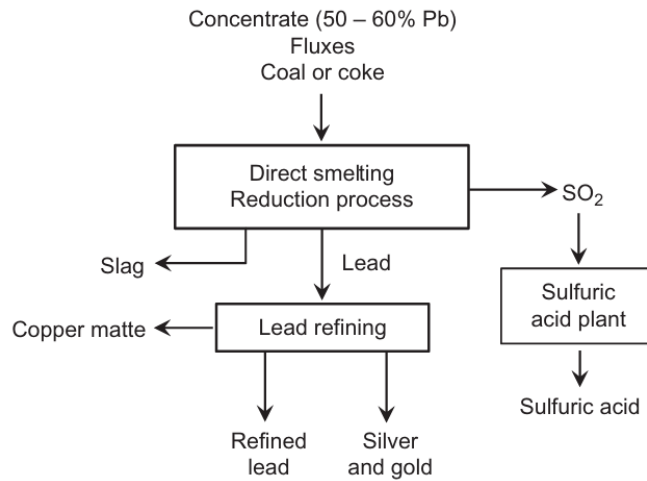
İncelenen literatürlere göre, bunlara ek olarak oluşum tipleri tam olarak anlaşılamamış ve birden fazla etkenin sonucunda meydana gelen kurşun-çinko yatakları da bulunmaktadır. Maden cevherlerinin yanı sıra kurşun ve çinko ikincil kaynaklardan da elde edilebilir. Maden atıklarının gün geçtikçe artmasına bağlı olarak, metallerin elde edilmesi için atıkların değerlendirilmesi günümüz ve gelecekte ekonomik açıdan avantajlı olacaktır **[Mudd vd., 2017]**. Bu nedenle metallerin atıklardan geri kazanımına dair çok sayıda çalışma yapılmakta ve ağır metal içeren atıkların değerlendirilmesi ile ikincil kaynak olarak yapısındaki metallerin geri kazanılması önemlidir **[Seetharaman, 2014]**.

Kurşun-çinko cevher yataklarının küresel dağılımına bakıldığında ise en zengin ülke Avustralya'dır ve rezervlerinin 59 megatondan fazla kurşun ve 95 megatondan fazla çinko elementi içerdiği düşünülmektedir. Rusya 28 megaton kurşun ve 63 megaton çinko rezervi ile, Kanada yaklaşık 23 megaton kurşun ve 77 megaton çinko rezervi ile ve Peru yaklaşık 12 megaton kurşun ve 53 megaton çinko rezervi ile Avusturalya'yı takip etmektedir. Bu ülkeleri Meksika, Kazakistan, Hindistan, Çin, İran ve Amerika izlemektedir **[Mudd vd., 2017]**.

2.3.1. Kurşun ve Çinko Üretimi

Kurşun ve çinko üretimi için literatürler incelendiğinde cevherlerin, öncelikle gravimetrik yöntemlerle zenginleştirildiği görülür. Bunun için fizikokimyasal ayırma yöntemleri ve flotasyon işlemi kullanıldığı bildirilmektedir. Flotasyon sonucunda kurşun ve çinko minerali konsantrelerinin elde edildiği ve mineral konsantrelerinden pirometalurjik ve hidrometalurjik yöntemler ile ham kurşun ve çinko üretildiği anlaşılr [Chen vd., 2025].

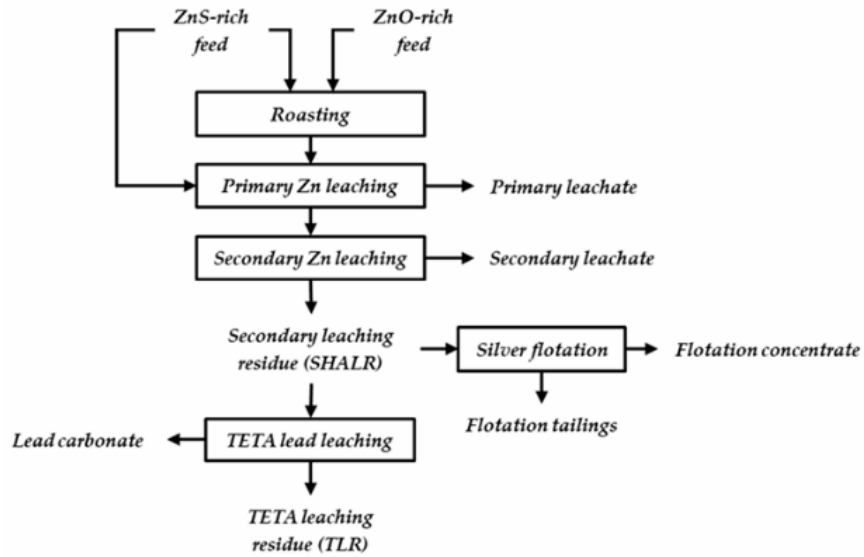
Sadece kurşun üretimine bakıldığında, çoğunlukla, bir dizi ısıl işlem uygulanarak, metalin fiziksel ve kimyasal olarak değişime uğramasının sağlandığı pirometalurjik yöntemlerin kullanıldığı görülmektedir. Flotasyon işlemi sonrasında elde edilen kurşun konsantresinden saf kurşun metali elde etmek için sinterleme-indirgeme veya doğrudan eritme-indirgeme işlemleri kullanılabilir. Her iki yöntemde de 1500°C'ye varan sıcaklıklara ihtiyaç duyulduğu için enerji sarfıyatı çok yüksektir. Buna ek olarak çevreye yüksek miktarda CO₂, SO₂ ve CO gibi sera gazları salınmaktadır. Yapılmış çalışmalarda özellikle sinterleme-indirgeme işlemi sırasında çok fazla toz oluştuğu ve çevreye daha fazla sera gazı salındığı raporlanmıştır. Bu yüzden daha çok doğrudan eritme-indirgeme işlemleri tercih edilmektedir (Şekil 2.1). Genel olarak konvansiyonel kurşun üretim işlemleri maliyetlidir [Seetharaman, 2014].



Şekil 2.1: Doğrudan eritme-indirgeme işlemi ile kurşun üretimi [Seetharaman, 2014].

Küresel çinko cevheri üretimine bakıldığında; cevherin elde edilmesinde en çok kullanılan yöntemler; metalin liç edilerek ayrılması veya hidrometalurjik yöntemlerdir.

Bu yöntemlerden ilki olan liç yöntemi, değerli minerallerin sulu ortamda uygun çözücü reaktifler yardımıyla, seçici olarak çözeltiye alınmasına dayanır. Hidrometalurjik yöntem ise çeşitli arıtma-kazanma teknikleri kullanılarak saf bileşik veya metal eldesine dayanmaktadır. Flotasyon sonrasında elde edilen çinko konsantresinden bu metali saf olarak elde etmek için en yaygın kullanılan hidrometalurjik yöntem; kavurma – liç etme – elektro kazanma (roast – leach – electrowinning, RLE) işlemi olarak bilinen üç basamaklı RLE yöntemidir (Şekil 2.2) [Hellgren vd., 2024]. Bu yöntemde de yüksek sıcaklıklara ulaşmak için gereken enerji sarfiyatı, kükürt emisyonu ve kavurma işlemleri sırasında ortaya çıkan zararlı maddeler bu yöntemin dezavantajlarıdır [Abdollahi vd., 2022].



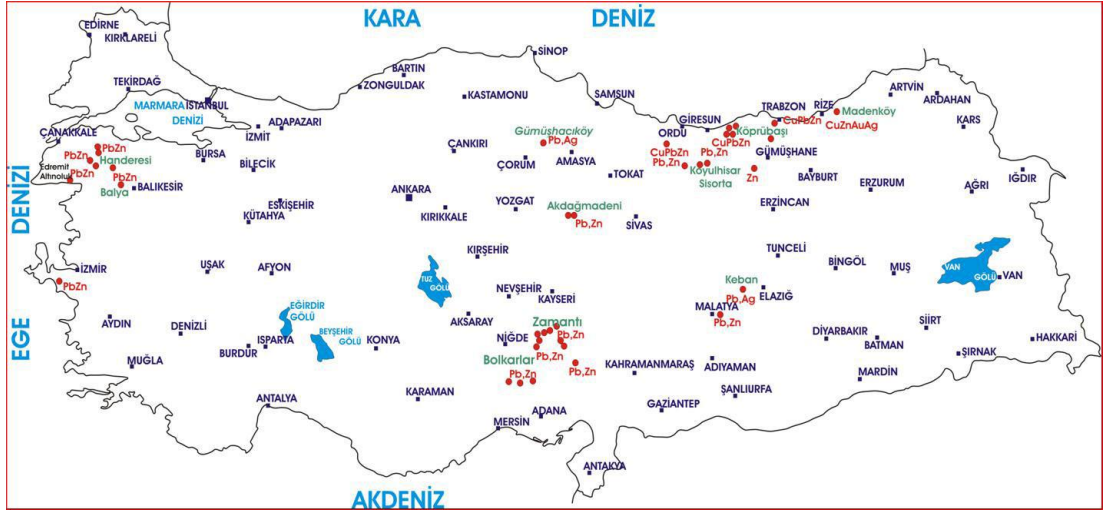
Şekil 2.2: RLE ile çinko üretimi [Hellgren vd., 2024].

Literatürlere göre halihazırda kullanılan kurşun ve çinko üretim yöntemlerinin çok maliyetli olması nedeni ile, yeni ve alternatif yöntemlerin geliştirilmesine ihtiyaç duyulmaktadır [Abdollahi vd., 2022; Dong vd., 2022].

ABD Jeolojik Araştırma Kurumu tarafından yayımlanan 2025 Mineral Emtia Özetleri raporuna göre, 2024 yılında en fazla kurşun üreten ülkeler sırası ile Çin, Avustralya, Amerika, Peru, Rusya ve Hindistan'dır. Türkiye en çok kurşun üreten 12 ülke arasındadır. Aynı raporda yer alan 2024 yılı çinko üretiminde ise Çin yine lider konumdadır. Çin'i Peru, Avustralya, Hindistan ve Amerika takip etmektedir [U.S Geological Survey, Mineral Commodity Summaries, 2025].

2.3.2. Türkiye’de Kurşun ve Çinko Üretimi

Yapılan literatür taramasına göre Türkiye’de kurşun-çinko cevher miktarı 56 megatonun üzerindedir [Mudd vd., 2017]. Ülkemizde bilinen kurşun-çinko yatakları; Biga yarımadasında (Balıkesir ve Çanakkale), Bayındır bölgesinde (İzmir), Simav bölgesinde (Kütahya), Doğu Karadeniz’de, Sivas çevresinde, Bolkar dağlarında (Niğde ve Mersin), Horzum’da (Adana), Aladağ’da (Kayseri) ve Malatya’da bulunmaktadır (Şekil 2.3) [Yarluğkal Altırmışık, 2019].



Şekil 2.3: Türkiye’deki kurşun ve çinko yatakları [MTA, Web 1].

2.3.2.1. Balıkesir Balya Kurşun Çinko Madeni

Biga yarımadasında bulunan Balya kurşun-çinko rezervinin oluşumunun, skarnlar veya taktitler adı verilen metasomatizmal bir süreçle oluşan sert, iri taneli metamorfik kayalar tipinde ya da hidrotermal kökenli epitermal bir yatak şeklinde olduğu düşünülmektedir [Baştürk, 2017]. Balıkesir’e yaklaşık 50 km uzaklıkta bulunan Balya bölgesi kurşun-çinko rezervinin ülkemizin en büyük ve en eski kurşun-çinko rezervlerinden biri olduğu düşünülmektedir. Bölgede M.Ö 500’lü yıllardan günümüze kadar madencilik faaliyetlerinin olduğu bildirilmektedir. Yapılan çalışmalar ışığında Balya çevresinden kurşun-çinko üretimi yapan medeniyetlerden biri Fenikelilerdir [Ağdemir vd., 1994; Baştürk ve Aydoğan, 2022]. M.Ö 129 yılından sonra ise Romalıların buradan kurşun, çinko, manganez vbg madenleri çıkardığı bildirilmektedir. Roma döneminde rezervin “Cristian Madenleri” olarak adlandırdığı

ileri sürülmektedir. Yazılı belgelerden, 16. ve 19. yüzyıllar arasında bölgedeki madenlerin aktif olarak kullanıldığı ve gülle yapımına katkıda bulunulduğu anlaşılmaktadır. Balya şehir merkezi 19.yüzyıldan önce “Kocagümüş Köyü” olarak bilinmesine rağmen, bölgeye “Balya” isminin, işletilen kurşun madenlerinin bu köyde paketlenmesi/balyalanması nedeniyle verildiği düşünülmektedir [Aydın, 2006; Baştürk ve Aydoğan, 2022]

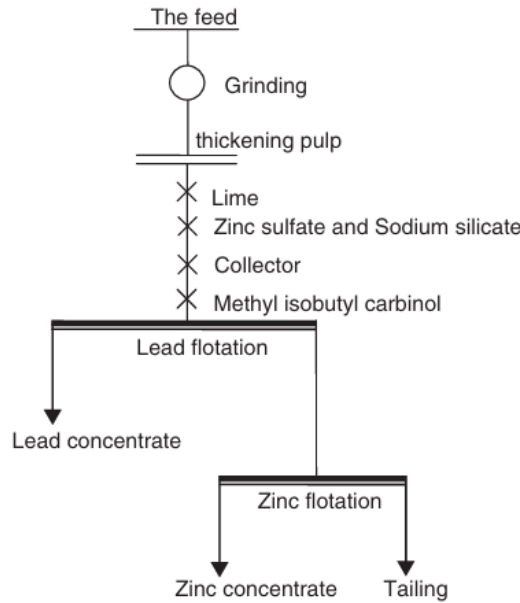
Sanayi devrimi sonrasında, önce 1868 yılında “Reiser” isimli bir Alman vatandaşı madenin işletim haklarını almış ve 1869 yılında bu hakkını Alman “Lorium” şirketine devretmiştir, 1876 – 1939 yılları arasında maden Fransız “Riyol” şirketi tarafından işletilmiştir [Aydın, 2006; Arslan, 2010; Baştürk ve Aydoğan, 2022]. Bu tarihler arasında Balya kurşun-çinko rezervinden çıkarılan yaklaşık 4 megaton cevher işlenmiş ve 400.000 ton kurşun ile 400.000 ton çinko üretilmiştir. 1925 yılından sonra kurşun üretiminin azalması ve 1930 yılındaki büyük buhrandan olumsuz etkilenen şirket, 1939 yılında çalışmalarına son vermiştir. İşletilmeyen Balya madeni 8 Şubat 1940 tarihindeki Bakanlar Kurulu kararı ile devletleştirilmiştir [Özışık, 2009; Arslan, 2010]. Bu kararı takiben bölgede 1974 – 1979 yılları arasında 18 adet sondaj deliği açılmış ve 4.4 megatonluk rezerv keşfedilmiştir. 1981 yılında yapılan ek sondaj çalışmaları sonucunda Balya’da toplam 15 megaton cevher potansiyeli olduğu sonucuna varılmıştır [Ağdemir vd., 1994].

Türkiye’de 1983 yılında yürürlüğe giren 2840 sayılı kanun ile “Devletçe İşletilecek Madenler Hakkındaki Kanun” iptal edilmiş ve maden alanlarının özelleştirilmesinin önü açılmıştır. Takiben, 1993 yılında düzenlenen 2.Madencilik Şurası’nda maden arama ve üretiminden sorumlu devlet kuruluşlarının özelleştirilmesi ya da yatırımlarının kısıtlanması önerilmiştir. Bunun sonucunda maden arama ve üretiminde inisiyatif özel sektöre geçmiştir [Tamzok, 2005]. Balya kurşun-çinko madeni 2005 yılında yeniden aktif hale getirilmiş ve iki özel şirket madeni işletmek için lisans hakkı elde etmiştir [Parlak vd., 2024]. Balya bölgesinde 2005 – 2006 yıllarında Eczacıbaşı Esan şirketi tarafından maden aramak için dokuz yeni kuyu açılmış ve cevher zenginleştirme tesisleri kurulmuştur. Balya madeni Ekim 2009’dan beri Eczacıbaşı Esan tarafından işletilmektedir [Özışık, 2009].

2.4. Flotasyon ve Flotasyon Atığı Nedir?

Cevherler çeşitli işlemler ile bünyelerinde bulunan endüstriyel değere sahip minerallerin ayrılması için zenginleştirilir. Mineralleri zenginleştirmek için flotasyon işlemi ilk kez 1904 yılında endüstride kullanılmıştır. Günümüzde madencilikte sıklıkla faydalanılan bir yöntemdir [Shen, 2021]. Flotasyon işlemi temelde, mineralleri yüzey özelliklerine göre birbirlerinden ayıran ve madencilik dışında pek çok alanda da kullanılan bir yöntemdir. Bakır, kurşun, çinko, nikel, kobalt, molibden, cıva, antimon vbg metallerin cevherlerden zenginleştirilmesinde kullanılmaktadır [Rao, 2004].

Bu yöntemde kullanılan reaktiflerin bazıları köpük oluşumuna neden olurken, diğerleri ayrılması istenen mineralleri hidrofobik hale getirerek köpüğe yapışmalarını ve gang mineral adı verilen değersiz minerallerden ayrılmalarını sağlarlar. Bunların dışında düzenleyici olarak kullanılan reaktifler de flotasyon işleminde rol alır [Yarluğkal Altınışık, 2019].



Şekil 2.4: Kurşun-çinko cevherinin flotasyon öncesi muamele edilmesi ve flotasyon işlemi [Luo vd., 2016].

Dünya üzerindeki birçok kurşun-çinko maden alanında, farklı karakterdeki cevherlerin zenginleştirilmesi için flotasyon işleminden faydalanılmaktadır (Şekil 2.4), [Bulatovic, 2007]. Flotasyon işlemi sonucunda açığa çıkan değerli minerallerin bir

kısmı geri kazanılamamakta, maden atıklarının içerisine karışmakta ve bu nedenle değerli minerallerin kaybına neden olmaktadır [Asadi vd., 2017; Brest vd., 2021].

2.4.1. Balıkesir Balya Flotasyon Atıkları

Literatür bilgisi ışığında Balıkesir Balya kurşun-çinko maden rezervi; 1869 – 1939 (70 yıl), 1974 – 1981 (7 Yıl), 2005-2009 (4 yıl) ve 2009’dan günümüz kadar yaklaşık 97 yıldır işletilmektedir. Kurşun ve çinko üretimi esnasında oluşan maden atıkları Balya ilçesine 1-2 km uzaklıkta olan Hastane Tepe’nin çevresine atılmıştır. Bölgedeki izabe ve flotasyon atıklarının toplam miktarının 3.000.000 – 3.500.000 ton arasında olduğu tahmin edilmektedir. Literatürlere göre söz konusu atıkların geri dönüştürülmesine yönelik henüz bir girişimde bulunulmamıştır. Buna ek olarak atıkların yağmur suyu ile taşınmasıyla ve geçmiş zamanlarda yol dolgusu şeklinde kullanılmaları nedeniyle bulunduğu ortama karıştığı düşünülmektedir [Baştürk ve Aydoğan, 2022].

Çalışmalara göre, cevherlerin işlenmesinden sonra oluşan atıklarda yer alan mineraller, cevherlerin bünyesinde bulunan minerallerden daha fazla su ve oksijen tutma kapasitesine sahiptir. Bu durum cevherlerin işlenmesinden sonra oluşan atıkların daha fazla oksitlenme riski içerdiklerini gösterir. Yapılan araştırmalar Balya bölgesi çevresindeki maden atıklarının sfalerit, galenit, pirit, kalkopirit, arsenopirit vb. metal sülfür bileşiklerini içerdiğini göstermektedir [Çelik Balcı vd., 2014]. Diğer bir deyişle Balya rezerv alanı çevresindeki toprağın kurşun ve çinko ile daha fazla kontamine olduğu tespit edilmiştir. Bölgede tarım ve hayvancılık yapıldığı için insanların Balya maden atıklarında bulunan ağır metallere maruz kalma riski yüksektir [Çelik Balcı vd., 2014; Parlak vd., 2024].

2.5. Biyoliçing Nedir?

Canlılar yardımı ile madenler ve maden atıkları gibi zor işlenen materyallerden kıymetli ve faydalı minerallerin ve elementlerin geri kazanılması işlemine genel olarak “biyoliçing” adı verilmektedir. Biyoliçingin mikroorganizmalar kullanılarak yapılan formu mikrobiyal liçing olarak adlandırılır. Biyoliçing yöntemleri metallerin üretiminde çoğunlukla kullanılan pirometalurjik ya da hidrometalurjik yöntemler ile karşılaştırıldığında daha uygun maliyetli, çevre dostu, daha az enerji gereksinimine ihtiyaç duyan, sera gazı emisyonu düşük, toksik tortu üretimi çok daha az ve zararlı

kimyasallara ihtiyaç duymayan bir yöntemdir. Biyoliçing sayesinde metaller düşük tenörlü cevherlerden de ayrıştırılabilir **[Panda vd., 2024]**. Her ne kadar biyoliçing son yıllarda konvansiyonel madencilik yöntemlerine göre çevre dostu, ucuz ve alternatif bir yöntem olarak önem kazanmaya başlasa da aslında son derece eskidir. 2000 yıl önce İspanya ve Çin’de bakır cevherini zenginleştirmek için biyoliçingin kullanıldığı düşünülmektedir **[Akçıl ve Çiftçi, 2003]**. Biyoliçing ile birçok farklı metali minerallerden geri kazanmak mümkündür **[Varjani vd., 2018b]**.

Literatürlere göre biyoliçing işleminde kullanılan mikroorganizmalar kemoototrof ya da heterotrof olabilir. Kemoototrof organizmalar enerji kaynağı olarak cevher minerallerini kullanabilirler. Bununla birlikte laboratuvar ortamında yapılan biyoliçing işlemlerinde kemoototrof mikroorganizmaların büyümesi için besiyerine genellikle demir ve kükürt gibi ekstra mineral kaynakları eklenir. Heterotrof organizmalar biyoliçing işlemi için kullanıldığında ise mikroorganizmaların büyümeleri ve metabolik aktiviteleri için sadece organik karbon kaynaklarına ihtiyaç duyulmaktadır **[Owusu-Fordjour ve Yang, 2023; Panda vd., 2024]**.

2.5.1. Biyoliçing Mekanizmaları

Mikroorganizmalar doğadaki metal iyonlarını fizikokimyasal ya da metabolik aktiviteleri sonucunda minerallerden ayırıp çözünür duruma getirebilirler veya iyonize olmuş metalleri bünyelerinde tutabilirler. Böylece biyojeokimyasal döngülerinde kritik rol oynamaktadırlar **[Panda vd., 2024]**. Bu hayati özellikleri sayesinde cevherlerden ya da maden atıklarından minerallerin geri kazanımı için mikroorganizmalar kullanılabilir. Metallerin doğal ortamda mikroorganizmalar tarafından mobilize edilebilmesi iyonize kil gibi cevher tutabilen maddelerin oluşumuna katkı sağlamaktadır **[He vd., 2024]**.

Canlıların gelişmişlik düzeyinin artması, canlı hücrelerinin farklılaşmasına ve özelleşmesine neden olur. Bu durum hücrelerin sadece belirli bileşikler enerji kaynağı olarak kullanabilmesine neden olur. Buna karşın nispeten basit organizmalar arasında kabul edilen, prokaryot yapıda olan mikroorganizmalar ve mikroskopik funguslar ya da mayalar gibi tek hücreli ökaryotlar, diğer canlılar için ölümcül olan ağır metaller ile kirlenmiş ortamlarda yaşayabilirler. Ağır metalleri enerji kaynağı ve hücresel solunum sırasında son elektron alıcısı olarak kullanabilirler **[Das ve Dash, 2017]**. Ağır metaller

ile kirlenmiş bölgelerden ya da maden alanlarından, bu bölgelerde yaşayan mikroorganizmalar izole edilebilir. Yaşadıkları bölgelere göre ağır metallere karşı dirençli oldukları ve önemli miktarlarda metali bünyelerinde tutabildikleri ya da ayrıştırabildikleri literatürlerde gösterilmiştir [Abd El-Aziz vd., 2016; Cebekhulu vd., 2024; Tatung ve Deb, 2024].

Cevherler ya da maden atıklarında bulunan ve bünyelerinde ağır metalleri barındıran minerallerin, mikroorganizmalar kullanılarak eldesini optimize etmek ve daha etkili yöntemler geliştirmek için biyoliçing işleminin hangi mikrobiyal yollar sonucunda gerçekleştiğini bilmek önemlidir [Dong vd., 2023].

Mikroorganizmaların çeşitli biyokimyasal yollar sonucunda ortama sentezledikleri reaktifler, metaller ile kimyasal bağlar oluşturarak veya ortamın pH'ını ya da redoks potansiyelini değiştirerek metalleri minerallerden ayırmaktadırlar. Biyoliçing yöntemi genelde mineral ya da cevher içerisinde bulunan metallerin, hücre tarafından sentezlenen reaktifler sayesinde ayrışması ve biyoliçingin gerçekleştiği sıvı ortamda, mobilize duruma gelmesi prensibine dayanır. Metallerin immobilize edilmesi ise hücrelerin fizikokimyasal prosesler ile metal iyonlarını yüzeylerinde adsorbe etmesi ya da metabolik işlemler sonucu metalleri biriktirmeleri ile mümkün olmaktadır [Panda vd., 2024].

2.5.1.1. Asidoliziz

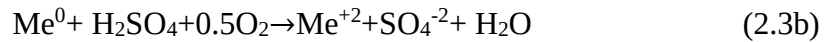
Mikrobiyal liçing yapan heterotrof veya ototrof mikroorganizmalar tarafından gerçekleştirilebilen asidoliziz işlemi; minerallerin bulunduğu ortama sentezledikleri organik ya da inorganik asitler ile ortamın pH'ının değişmesine bağlı olarak metallerin ayrışmasıyla gerçekleşir [Owusu-Fordjour ve Yang, 2023].

Asidoliziz işleminde hücreler tarafından sentezlenen asit molekülleri liçing sıvısında çözünürler. Sonraki adımda, hidrojen iyonları cevherlere ya da atıklara bağlanarak minerallerin yapısında bulunan kimyasal bağları zayıflatır ve sonuç olarak metallerin ayrışmasına neden olurlar (2.1 ve 2.2) [Dong vd., 2023].



Yapılan çalışmalarda çeşitli bakteri ve fungi hücrelerinin sentezlediği okzalik asit, sitrik asit, glukonik asit, malonik asit, laktik asit, asetik asit, süksinik asit, pirüvik asit gibi organik asitlerin metallerin minerallerden ayrışması için gerekli kimyasal ortamı oluşturduğu gözlemlenmiştir [Panda vd.; 2024; Corbett vd.; 2024].

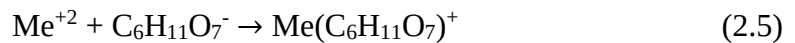
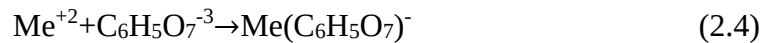
Kemoototrof mikroorganizmalar tarafından sentezlenen inorganik asitler ile yüksek oranda metalin geri kazanıldığı literatürlerde gösterilmiştir [Marra vd., 2018; Fereydouni vd., 2025]. Örneğin kükürt oksitleyen bakteriler sülfür cevherlerini aerobik koşullarda oksitleyerek sülfürik asit oluşumuna (2.3a) ve dolayısı ile minerallerin asidik ortamda daha fazla çözünmesine neden olurlar (2.3b) [Das ve Dash, 2017]. Kükürt oksitleyen bakteriler için besiyerine elementel kükürt eklenerek asidolizinin gerçekleştirilmesi mikrobiyal liçing işleminde yaygın olarak kullanılmaktadır [Marra vd., 2018].



2.5.1.2. Kompleksoliziz

Mikroorganizmalar tarafından sentezlenen organik asitler ve sedeforlar metal iyonları ile kimyasal bağ oluşturmaya yatkındırlar. Bu moleküllerin, mineral bileşiklerindeki metalleri şelatlayarak çözünür hale getirmesi kompleksoliziz olarak adlandırılır [Das ve Dash, 2017; Owusu-Fordjour ve Yang, 2023; Panda vd., 2024].

Kompleksoliziz çoğunlukla asidoliziz ile eş zamanlı olarak gerçekleşir. Organik asitlerin metal iyonları ile kimyasal bağlar oluşturması sonucu şelatlar ya da tuzlar ortaya çıkar ve metallerin minerallerden ayrışmasını sağlarlar (2.4 ve 2.5) [Dong vd., 2023; Schueler vd., 2024].



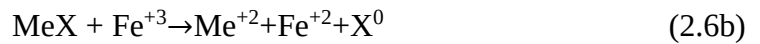
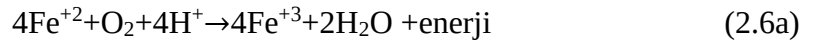
Metal iyonlarının mikroorganizmaların yüzeyinde bulunan fosforil, karboksil, hidroksi, amino, imidazol, sülfat ve sülfidril gruplarına bağlanarak elektrostatik etkileşimleri, iyon değişimi ve şelatlama sonucu immobilize olması şeklinde

gerçekleşen biyosorpsiyon bir tür kompleksoliziz işlemidir. Biyosorpsiyon hücre için ekstra enerji sarfiyatı gerektirmeyen, uygun maliyetli bir yöntemdir [Giese ve Jordao, 2019; Yan ve Chen, 2024; Li, X vd., 2024; Panda vd., 2024; Khan vd., 2025]. Tüm bakteri, fungi ve alg hücreleri, hücre duvarları ya da dış zarları üzerindeki moleküllerin yapısında bulunan anyonik fonksiyonel gruplar nedeni ile biyosorpsiyon kabiliyetine sahiptir [Das ve Dash, 2017].

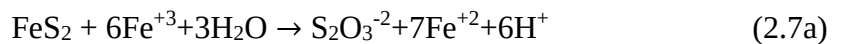
Literatürlere göre kompleksoliziz genellikle heterotrof mikroorganizmalar tarafından sentezlenen organik asitler ile ilişkilendirilse de [Dong vd., 2023], kemoototrof organizmalar tarafından sentezlenen hücre dışı polimerik maddeler (EPS) de biyoliçing aktivitesini olumlu yönde etkilemektedirler [Ye vd., 2021].

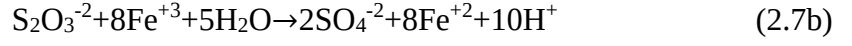
2.5.1.3. Redoksoliziz

Kemoototrof bakteriler, demir ya da kükürt gibi elementleri oksitleyerek enerji üretirler. Örneğin demir bakterileri, ferro iyonunu (Fe^{+2}) ferrik iyonuna (Fe^{+3}) oksitleyerek enerji üretirler (2.6a). Oluşan ferrik iyonu (Fe^{+3}) mineraller içerisindeki metalleri oksitleyerek ayrışmalarını sağlar ve bu esnada yeniden ferro iyonuna (Fe^{+2}) indirgenir (2.6b) [Hong vd., 2023; Li, Z vd., 2024; Panda vd., 2024].

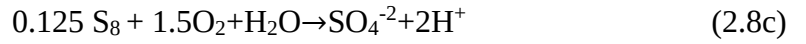
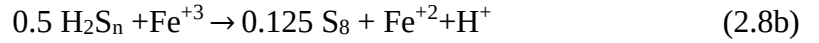
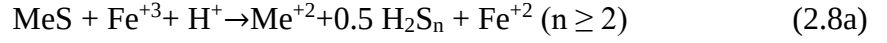


Bir diğer örnek olan kükürt oksitleyen bakteriler metal sülfür minerallerini oksitleyebilmektedir [Sundramurthy vd., 2020]. Metal sülfürlerinin biyoliçinginde iki temel yolak görev almaktadır. Bu yolaklar tiyosülfat ve polisülfür yolakları olarak bilinir [Ghassa vd., 2014; Schueler vd., 2024]. Bunlardan ilki olan tiyosülfat yolağı; genelde pirit (FeS_2), molibdenit (MoS_2) ve tungsten disülfür (WS_2) biyoliçinginde kullanılır. Demir oksitleyici bakteriler tarafından yükseltgenen Fe^{+3} iyonlarının mineral ile reaksiyona girmesi sonucu tiyosülfat ($\text{S}_2\text{O}_3^{-2}$) açığa çıkar (2.7a). Tiyosülfat ve diğer aracı kükürt bileşikleri sülfür bakterileri tarafından yükseltgenirler (2.7b) [Schueler vd., 2024].





Polisülfür yolağında ise sfalerit (ZnS), galenit (PbS), kalkopirit (CuFeS₂) vbg minerallerin bünyesinde bulunan sülfür bileşikleri oksitlenirler. Bu işlemde demir oksitleyici bakteriler tarafından yükseltgenen Fe⁺³ iyonları rol alır (2.8a). Ortaya çıkan sülfür, sülfürik aside yükseltgenir (2.8b ve 2.8c) [Schueler vd., 2024].



Biyoliçing işleminde demir ve kükürt oksitleyen bakterilerin bir arada konsorsiyum halinde kullanılması ile metallerin liçinginin hızlandığı literatürde gösterilmiştir [Schueler vd., 2024].

2.5.1.4. Biyoakümülyasyon

Biyoakümülyasyon mikroorganizmaların metabolik aktiviteleri sonucunda metalleri aktif taşıma ile hücre içine almaları işlemi olarak bilinir. Biyosorpsiyondan farklı olarak biyoakümülyasyon aktif taşıma ile çalıştığı için enerji harcamaktadır [Behera ve Das, 2023; Dong vd., 2023; Panda vd., 2024]. Bakteri hücrelerinde bulunan sistein amino asidi yönünden zengin metalotiyoninin kurşun, çinko, kadmiyum, bakır vbg ağır metallerin biyoakümülyasyonunda görev aldığı bildirilmiştir [Donati, 2018].

2.5.1.5. Biyomineralizasyon

Biyomineralizasyon sırasında metal iyonları, hücreler tarafından sentezlenen metabolik ürünlere ya da hücrelerin yüzeyindeki organik gruplara bağlanarak mineral çökeltileri oluştururlar [Das ve Dash, 2017; Maleke vd., 2019; Zhou vd., 2024]. Biyomineralizasyon sonucu ortamda serbest halde bulunan metal iyonlarının daha kararlı bileşiklere dönüştürüldüğü de literatürlerde gösterilmiştir. Bu durum her ne kadar biyoremediasyon için kullanışlı olsa da metalleri minerallerden ayırma sırasında hedeflenen işlemin tam tersi gerçekleştiğinden, biyoliçing için tercih edilmemektedir [Donati, 2018].

2.5.2. Kurşun ve Çinko Biyoliçingi

Literatürlere göre konvansiyonel yöntemler ile kurşun ve çinko üretimi yüksek maliyetlidir. Ayrıca flotasyon işlemi sonrasında kullanımı da maliyetli olabilir [Seetharaman, 2014; Abdollahi vd., 2022]. Buna karşın biyoliçing yöntemi ile kurşun ve çinko cevherlerini minerallerinden ayıştırmak, yüksek enerji sarfıyatı gerektirmeyen bir yöntemdir ve çevreye zararlı gazlar salınmadığından doğa dostu bir yöntemdir. Buna ek olarak bu yöntemle flotasyon işlemi sonrasında ortaya çıkan atıklarda kalan kurşun ve çinko cevherlerinin geri kazanılması mümkündür [Ghassa vd., 2014, Kordloo vd., 2023; Xue vd., 2024].

Maden atıkları da ayrıştırılabilecek ve endüstriyel uygulamalarda kullanılabilecek miktarlarda metal bileşikleri içermektedirler. Bu nedenle maden atıklarını biyoliç etmek, ağır metallerin toprak ve sudan uzaklaştırılmasına yardımcı olduğu gibi, bunların yeniden kullanılmalarına da olanak sağlar [Dong vd., 2023, Panda vd., 2024].

Literatür bilgisine göre genellikle biyoliçing yönteminde kurşun-çinko minerallerinden ağır metalleri ayıştırmak için demir ve kükürt oksitleyen kemoototrof bakteriler kullanılmaktadır [Ahmadi vd., 2020; Sajjad vd., 2020; Sundramurthy vd., 2020; Ye vd., 2021; Kordloo vd., 2023; Xue vd., 2024]. Demir bakterileri ortamdaki ferro iyonunu (Fe^{+2}) oksitleyerek enerji üretirler. Bu sırada oluşan ferrik iyonları (Fe^{+3}) sfalerit vbg bileşiklerin yapısında bulunan metal iyonlarını yükseltgeyerek minerallerden ayrışmalarına neden olurlar [Lei vd., 2016].

Kükürt oksitleyen bakteriler ise metal sülfürleri doğrudan, çözünür bileşikler olan metal sülfatlara oksitleyebilirler [Sundramurthy vd., 2020]. Kurşun sülfat bileşiği ($PbSO_4$) son derece düşük çözünürlüğe sahip olduğundan ($K_{sp}=1.8 \times 10^{-8}$), literatürlere göre kükürt oksitleyen bakteriler, kurşun biyoliçinginde kullanıldığında etkili sonuçlar alınamamıştır [Ye vd., 2017; Schueler vd., 2024].

Ye ve arkadaşlarına göre (2021) kemoototrof bakterilerin, metabolik aktiviteleri sonucu sentezledikleri hücre dışı polimerik maddelerin (Extracelular polymeric substance, EPS) metallerin biyoliçing oranını artırdığı gözlemlenmiştir [Ye vd., 2021]. Literatürlerde kurşun-çinko cevherlerini ve maden atıklarını biyoliç etmek için çoğu zaman maden yatakları çevresinden izole edilen bakterilerin kullanıldığı bildirilmiştir. Biyoliçing için kullanılan kemoototrof bakteriler mezofil ya da orta derece termofil

olabilirler ve genellikle asidofildirler. [Ahmadi vd., 2020; Sajjad vd., 2020; Ye vd., 2021; Kordloo vd., 2023]. Biyoliçing esnasında sülfürik asit oluşumu gerçekleştiği ve ortam pH'ı daha fazla düştüğü için proses hızlanabilir [Das ve Dash, 2017].

Yapılan çalışmalara göre biyoliçing için demir bakterilerinin ihtiyacı olan ferro iyonu (Fe^{+2}) kaynağı olarak çoğunlukla demir (II) sülfat $FeSO_4$ kullanılmaktadır, fakat pirit (FeS_2) minerali de aynı amaç doğrultusunda besiyerine eklenebilir [Ghassa vd., 2014; Zahiri vd., 2021]. Kükürt oksitleyen bakteriler için ise ortama elementel kükürt eklenmesi önerilir [Abdollahi vd., 2022; Schueler vd., 2024].

Kurşun ve çinko minerallerini içeren cevher ve maden atıklarının biyoliçingi için mikroorganizmalarla yapılan araştırmalarda, bakteri konsorsiyumlarından da faydalandığı görülmektedir [Ahmadi vd., 2020; Zahiri vd., 2021; Aghazadeh vd., 2023; Schueler vd., 2024]. Literatürlerde kurşun ve çinko biyoliçinginde en yaygın kullanılan suşlar *Acidithiobacillus*, *Leptosprillum*, *Sulfobacillus*, *Ferropasma* türleri olarak gösterilmektedir [Ahmadi vd., 2020; Sundramurthy vd., 2020; Ye vd., 2021; Zahiri vd., 2021; Aghazadeh vd., 2023; Schueler vd., 2024]. Kurşun ve çinkonun biyoliçingi için heterotrof mikroorganizmalar da nadiren kullanılmaktadır. Schueler ve arkadaşlarına göre (2024) mikroorganizmalar sentezledikleri organik asitler ile kurşun ve çinkoyu minerallerden ayırıştırıp mobilize edebilmektedirler [Schueler vd., 2024].

3. GEREÇLER

3.1. Kullanılan Besiyerleri

Tryptic Soy Broth (LabM, LAB004), Triptik Soy Agar (Merck, 1054580500), Nutrient Broth (Merck, 1054430500), Nutrient Agar (Merck, 1054500500).

3.2. Kullanılan Cihazlar

Etüv (Binder ED 115, Avusturya), 30°C Çalkalamalı İnkübatör (New Brunswick Scientific Innova 43, ABD), 30°C Çalkalamalı İnkübatör (Edmund Bühler TH15, Almanya), Masa Üstü Soğutmalı Santrifüj (Gyrozen 1248R, Güney Kore), Masa Üstü Soğutmalı Santrifüj (Labofuge 400, Heraeus, Almanya), Hassas Terazî (BL3100, Sartorius, Almanya), Hassas Terazî (BL2015, Sartorius, Almanya), Yarı Mikro Terazî (Shimadzu, AUW220D, Japonya), Dijital Isıtıcılı Manyetik Karıştırıcı (Msh-20D, Daihan Scientific, Güney Kore), Isıtıcılı Manyetik Karıştırıcı (MR Hei-Standard, Heidolph, Almanya), Mikrodalga Fırın (BMO23, Bluesky, Çin), Biyogüvenlik Kabini Sınıf II A2 (Tezsan, Türkiye), Biyogüvenlik Kabini Sınıf II A2 (Kendro HeraSafe HS12, Birleşik Krallık.), +4°C Buzdolabı (Regal, Türkiye), -20°C Dondurucu (Regal, Türkiye), X-ışını Floresans Spektrometresi (ZSX Primus IV, Rigaku, Japonya), İndüktif Eşleşmiş Plazma Optik Emisyon Spektroskopisi (Perkin Elmer, ABD), Otoklav (CL-40L, ALP, Japonya), Otoklav (OT-90L, Nüve, Türkiye), Otoklav (HV-110L, Hirayama, Japonya), Distile Su Cihazı (Türkiye).

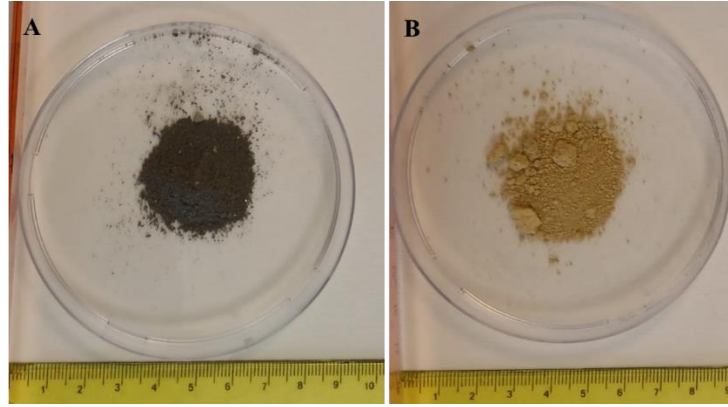
3.3. Kullanılan Sarf Malzemeleri

SCHOTT cam tüp 10 mL, ISOLAB plastik petri, Labtek plastik petri, ISOLAB cam Erlenmayer flask 250 mL, ISOLAB dereceli cam pipet 5 mL/ 10 mL, Falcon tüp 15 mL/50 mL, SCHOTT 1000 mL cam şişe, ISOLAB 500 mL cam şişe, TGI 100 mL cam şişe, ISOLAB 1000 µL Mikropipet ucu, AXYGEN 200 µL Mikropipet ucu

4. YÖNTEMLER

4.1. Kullanılacak İzolatların Seçilmesi

Bu çalışmada cevher ve flotasyon atığında bulunan kurşun (Pb) ve çinko (Zn) metallerinin adı geçen kaynaklardan izole edilen bakteriler yardımıyla biyolojik olarak iyileştirilmesi yani biyoliç edilmesi planlanmıştır. Bu amaçla bakterilerin izolasyonu, biyoliç edilecek cevher ve flotasyon atığı Balıkesir Balya Kurşun – Çinko Madeni zuhurları Gebze Teknik Üniversitesi, Yer ve Deniz Bilimleri Enstitüsü aracılığı ile temin edildi (Şekil 4.1).



Şekil 4.1: 90mmx15mm petri plaklarda cevher (A) ve flotasyon (B) zuhurları.

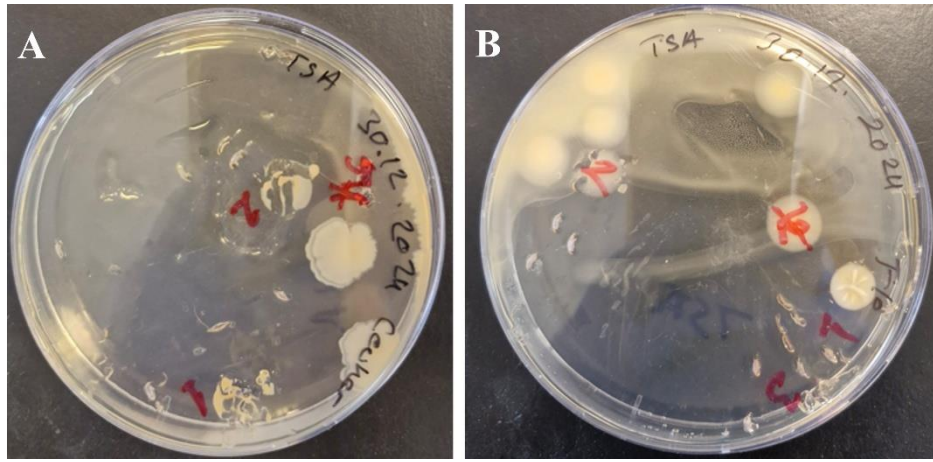
Materyalin laboratuvarımıza ulaşmasını takiben cevher ve flotasyon atığından bakteri izolasyonu için örnekler 1/100 oranında steril dH₂O ile sulandırılarak seyreltilmiş ve 5 ml Tryptic Soy Broth (TSB-LabM, Birleşik Krallık) besiyerine uygun miktarda ekilmiştir. Örnekler 30 °C’de etüvde 24 – 48 saat (h) büyümeye bırakılmıştır (Şekil 4.2).



Şekil 4.2: İzolatların ön üretim ortamı.

4.2. İzolatların Üretimi ve Seçimi

Ön üretim aşamasını takiben, üreme olan TSB içeren tüplerden 10'ar μ l mikroorganizma örnekleri yine nispeten zengin ve katı besiyeri olan Triptik Soy Agar (TSA) (Merck, Almanya) içeren petri plaklarına aktarıldı. Örnekler 30 °C sıcaklıkta inkübatörde (Binder ED 115, Avusturya) 48-96 h üremeye bırakıldı. Böylece elimizdeki cevher ve flotasyon atığı örneklerindeki mikroorganizma florası belirlenmeye çalışıldı (Şekil 4.3).



Şekil 4.3: Cevher (A) ve flotasyon atığından (B) üreyen izolatlardan örnekler.

Üreme olan her bir petrideki koloniler, üreme süreleri dikkate alınarak, ayrı ayrı petrilere saflaştırılmak için çizgi plaka yöntemi ile yeniden TSA besiyerine ekildi ve 30 °C sıcaklıkta, 48-96 h etüvde (Binder ED 115, Avusturya) üremeye bırakıldı. Bu noktada saflığı dikkate alınarak, biri cevherden (Cevher 2; C2) biri flotasyon atığından (Flotasyon 8; F8) olmak üzere iki bakteri örneği seçildi ve biyoliçing çalışması için kullanıldı.

4.3. Belirlenen İzolatların Biyoliçing Çalışmasında Kullanılması

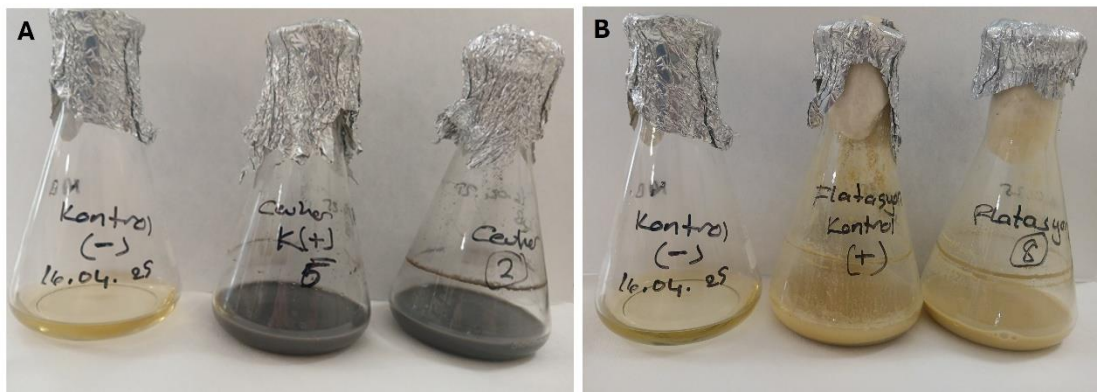
Seçilen 2 izolat (C2 ve F8), büyük ölçekli çalışmada kullanmak üzere çoğaltıldı. Buna göre; Bölüm 4.1 ve 4.2'de anlatıldığı şekilde ön kültürleri önce 5 ml TSB içinde ve daha sonra daha zayıf besiyeri olan 10 ml Nutrient Broth (NB) (Merck, Almanya) içinde çoğaltıldı. Hazırlanan örnekler 30°C'de inkübatör (New Brunswick Scientific

Innova 43, ABD) içinde 150 rpm'de çalkalanarak 48-96 h büyümeye bırakıldı. Biyoliçing çalışması için 250 ml erlenler kullanıldı. Çalışmada 1/5 havalandırma oranı esas alındı. Deneme için kullanılan besiyerleri; cevherden izole edilen bakteri için, 50 ml NB içinde 5 g cevher; flotasyon atığından izole edilen bakteri için de 50 ml NB ve 5 g flotasyon atığı olarak hazırlandı. İzolatlardan eşit miktarda bakteri alınarak uygun deneme erlenine biyoliçing denemesi için inoküle edildi. Erlen içerikleri Tablo 4.1'de gösterildi.

Tablo 4.1: Deney düzenekleri hakkında bilgi.

Erlen Hacmi: 250 ml. Havalandırma Oranı: 1/5 50 ml. → Deney Ortamı 200 ml. → Havalandırma		
Negatif Kontrol	50 ml. → Besiyeri	
Pozitif Kontrol	50 ml. → Besiyeri + Cevher	50 ml. → Besiyeri + Flotasyon Atığı
Cevher İzolatı	50 ml. → Besiyeri + Bakteri (C2) + Cevher	
Flotasyon Atığı İzolatı	50 ml. → Besiyeri + Bakteri (F8) + Flotasyon Atığı	

Erlenler 30°C'de inkübatör içinde 150 rpm'de çalkalanarak büyümeye bırakıldı. Örneklerden 24 h, 48 h, 96 h ve 120 h 10'ar ml örnek alındı. Erlenlerde kalan miktar 120 h örnekleme sonrasında çalkalamalı inkübatörden çıkartılarak normal etüvde 30°C'de 2 hafta (15 Gün) inkübasyonuna devam edildi (Şekil 4.4).



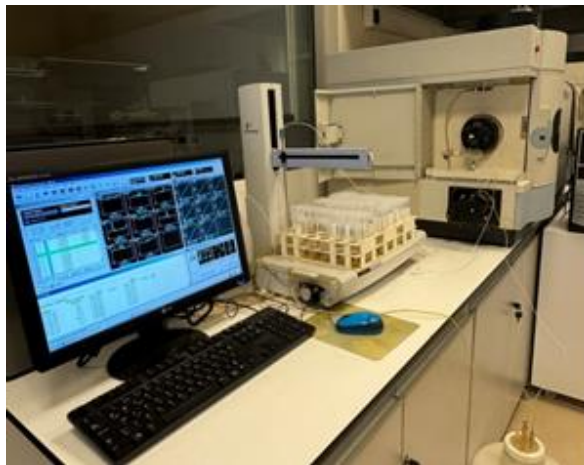
Şekil 4.4: Kontrol erlenleri (+), (-) ve Cevher (A) ve flotasyon atığı (B).

Çalışma boyunca alınan 10 ml örnekler 5 dk 3500 rpm'de santrifüjlendi (Gyrozen 1248R, Güney Kore) ve üst sıvı ile çökelekler ayrıldı. İki hafta (15 Gün) sonucundaki

üst sıvılar ICP-OES (Perkin Elmer, ABD) ile metal analizine alındı. Çökelek şeklinde kalan cevher ve flotasyon atığı örnekleri de XRF (ZSX Primus IV, Rigaku, Japonya) ile analize alındı.

4.4. İndüktif Eşleşmiş Plazma – Optik Emisyon Spektroskopisi (ICP-OES) ile Element Analizleri

Çalışma için seçilen iki örneğe (C2 ve F8) ait sıvı besiyeri örnekleri ICP-OES cihazı (Perkin Elmer, ABD) ile Bakır (Cu), Çinko (Zn), Kurşun (Pb) element analizleri Gebze Teknik Üniversitesi Yer ve Deniz Bilimleri Enstitüsü imkanları ile yapılmıştır. Balıkesir-Balya Kurşun-Çinko Madeni cevher ve flotasyon atığı örneklerinden izole edilen bakteriler ile yapılan çalışmada, iki hafta sonunda alınan besiyeri örnekleri 5 dk 3500 rpm’de santrifüjlendi (Gyrozen 1248R, Güney Kore) ve üst sıvı ile çökelekler ayrıldı. Üst sıvılar steril falkon tüplere 10 ml olarak alınmış, üzerlerine uygun miktarda %65’lik nitrik asitten (HNO_3) birkaç damla eklenmiştir. Falkonlar analizlerin gerçekleşeceği ICP-OES cihazına yerleştirilmiştir. Element analizleri, Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater 3120 B standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Ölçümler mg/L biriminde raporlanmıştır. Cihaz kalibrasyonu, çok elementli stok standart çözeltilerle oluşturulan kalibrasyon eğrileriyle yapılmıştır. Analiz serilerinde reagent blank’ler ve sertifikalı referans materyaller (SRM) kullanılarak kalite kontrol sağlanmıştır. Şekil 4.5.’de ICP-OES cihazı görüntüsü sunulmuştur.



Şekil 4.5: ICP-OES cihazı görüntüsü.

4.5. X-Işını Floresans Spektrometresi (XRF) Element Analizleri

Çalışma için seçilen iki örneğin (C2 ve F8) büyüme ortamlarına eklenen cevher ve flotasyon atığı örneklerinin iki haftalık çalışma sonucu elementel ölçümleri Gebze Teknik Üniversitesi Yer ve Deniz Bilimleri Enstitüsü Laboratuvarı'nda X-Işını Floresans cihazı- XRF (ZSX Primus IV, Rigaku, Japonya) ile gerçekleştirildi. Balıkesir-Balya Kurşun-Çinko Madeni cevher ve flotasyon atığı örneklerinden izole edilen bakteriler ile yapılan çalışmada, alınan besiyeri örnekleri 5 dk 3500 rpm'de santrifüjlendi (Gyrozen 1248R, Güney Kore) ve çökelekler ayrıldı. Elde edilen çökelek haldeki cevher ve flotasyon atığı örnekleri etüvde (Binder ED 115, Avusturya), 105 °C'de 24 saat kurutuldu ve takiben XRF cihazının peletleme aşamasına geçildi. Peletin dağılmaması ve düzgün sıkışması için bağlayıcı olarak Borik asit (H_3BO_3) kullanılmıştır. Peletlerin sıkıştırılacağı hidrolik pres aletinin özel pelet kabına; tabana borik asit, üzerine numune, en son üzerine tekrar borik asit konularak ve 30 ton basınç altında 2 dakika preslenerek hazırlanmıştır. Elde edilen bu peletler, XRF cihazında analiz edilmiştir. Cihaz sonuç çıktısı % kütle olarak sunulmuştur. Analizlerin gerçekleştirildiği XRF cihazı Şekil 4.6.'da görülmektedir.



Şekil 4.6: Cevher ve Flotasyon atığı analizlerinin yapıldığı XRF cihazı görüntüsü.

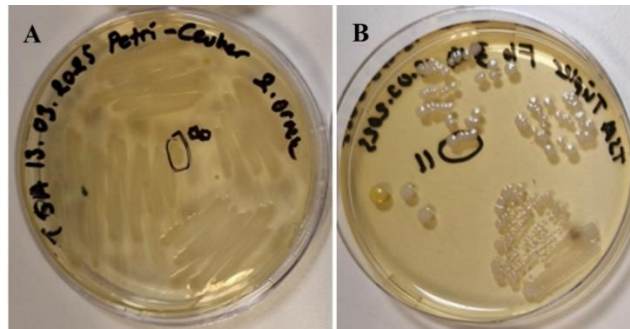
5. BULGULAR

5.1. Cevher ve Flotasyon Atığı İzolatların Üretimi ve Seçilimine Ait Bulgular

Kurşun ve çinko, tıptan, askeri teknolojiye, mekanikten, elektroniğe kadar geniş kullanım alanları ile en önemli metaller arasında gösterilmektedirler. Kurşun ve çinko genellikle sülfür cevherleri içerisinde, bir arada bulunurlar [Tombul ve Ünver, 2022]. Bu metallerin üretiminde pirometalurjik ve hidrometalurjik yöntemlerden faydalanılır. Bu yöntemler yüksek sıcaklıklara ihtiyaç duyduğu için enerji sarfıyatı, ortaya çıkan sera gazları ve çevreye salınan diğer zararlı maddeler nedeniyle ciddi dezavantajlar içerir [Seetharaman, 2014; Hellgren vd., 2024].

Bu mantıktan yola çıkarak, çalışmamızda Balıkesir Balya Kurşun – Çinko Madeninden temin edilen cevher ve flotasyon atığında bulunan kurşun (Pb) ve çinko (Zn) metallerinin adı geçen kaynaklardan izole edilen bakteriler yardımıyla biyolojik olarak iyileştirilmesi gerçekleştirilmiştir.

Materyalin laboratuvarımıza ulaşmasını takiben, Bölüm 4.1 ve 4.2’de ki basamaklar takip edilmiş ve ön kültür için TSB besiyeri kullanılmıştır. Uygun miktarda ekilen örnekler, uygun sıcaklık ve sürede büyütülmüştür. Takiben örnekler TSA katı besiyerine ekilmiş, aynı sıcaklıkta, 48 – 96h büyütülmüştür. Katı besiyerinde koloni halde elde edilen mikroorganizmalar yine TSA besiyerine saflaştırılmak amacıyla, çizgi ekim tekniğiyle ekilmiş aynı sıcaklık ve sürelerde büyütülerek ve saflaştırılmıştır. Bu noktada saflığı dikkate alınarak, biri cevherden (Cevher 2; C2) biri flotasyon atığından (Flotasyon 8; F8) olmak üzere iki bakteri örneği seçilerek çalışmamızda kullanılmıştır (Şekil 5.1).



Şekil 5.1: Cevher (A) ve flotasyon atığından (B) seçilen izolatların çizgi ekim sonuçları.

5.2. Seçilen İzolatlarla Gerçekleştirilen Büyük Ölçekli Çalışmaya Ait Bulgular

Seçilen iki izolat (C2 ve F8), büyük ölçekli çalışmada kullanmak üzere Bölüm 4.3'teki gibi 250 ml erlenlerde hazırlanmış, 30°C, 150 rpm ve 24-120 h çalkalanarak, sonra 15 gün (2 hafta) tamamlanana, kadar durağan şekilde aynı sıcaklıkta tutularak çalışma tamamlanmıştır. Çalkalanarak büyütülen mikroorganizmalardan 24 h, 48 h, 96 h ve 120 h örnekler alınmıştır. Son olarak 2 haftayı tamamlayan erlenlerde çalışmaya dahil edildi. Bölüm 4.3'te ki şekilde işlenen örnekler Gebze Teknik Üniversitesi GEBZE-LAB imkanları ile analize alındı. Buna göre örneklerin sıvı kısımları ICP – OES analizine, katı kısımları ise XRF analizine alındı.

5.3. Kimyasal Analizlere Ait Bulgular

Maden örneklerinin biyolojik iyileştirme veya biyoliçing çalışmaları kapalı bir sistem olarak değerlendirilir. Diğer bir deyişle ölçüm sonuçlarındaki azalma veya artmalar çalışılan örneklerdeki bileşenlerin metabolize olup açığa çıktığını veya başka bir bileşene dönüştüğünü gösterir ve bu değerlere göre yorumlar yapılır. Çalışmamızda kullanılan Balıkesir – Balya kurşun-çinko madeni cevher zuhuru örnekleri ve bu örneklerden izole edilen C2 bakterisi ve flotasyon atığı örneklerinden izole edilen F8 bakterisi araştırma sonuçları buna göre değerlendirilmiştir. Her iki bakterinin XRF ve ICP – OES sonuçları beraber irdelendiğinde; cevherden izole ettiğimiz C2 bakterisi çinko ve kurşunu; flotasyon atığından izole ettiğimiz F8 bakterisi de çinko metabolize etmektedir. Bu sonuçlara göre C2 ve F8 bakterisinin biyoliçing yaptığı görülmektedir. Bakterilerin biyoliçing kabiliyetinin ve kullandıkları metabolik yolların daha detaylı anlaşılması için daha kapsamlı çalışmalara ihtiyaç vardır.

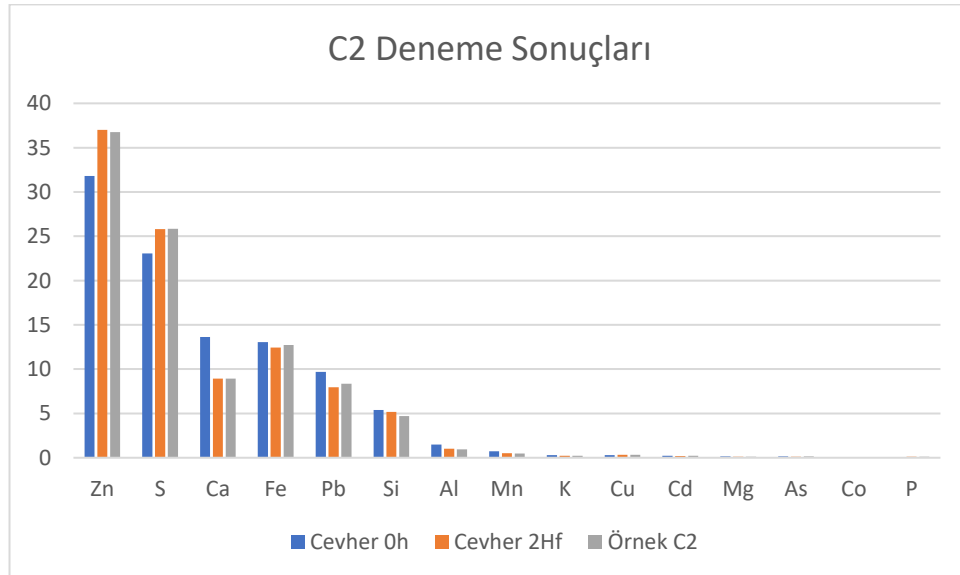
5.3.1. X-Işını Floresans Spektrometresi (XRF) Analizlerine Ait Bulgular

Cevherden izole edilen C2 bakterisi iki haftalık çalışma süresi sonunda çalışma ortamına eklenen cevherin bileşenleri XRF ölçümleri ile belirlenmiş (Tablo 5.1) ve kontroller ile karşılaştırılarak değerlendirilmiştir (Şekil 5.2). Buna göre; kurşun (Pb) cevheri özelinde bakıldığında, C2 bakterisinin 0 h'e göre kurşunu azalttığı, biyoremede ettiği görülmektedir. Bununla beraber 2 haftalık (+) kontrol örneğinde de kurşun miktarında azalma görülmektedir. Bu sonuç bakterinin biyoliç ile kurşun miktarına

etki edebildiğini göstermektedir. Çinko (Zn) cevherinde ise durum daha ilginç görülmektedir. Burada C2 bakterisi başlangıç örneğine göre cevheri ters biyoliç ederek zenginleştirmiş görülmektedir. Bununla beraber kurşunu ve çinkoyu hangi formlara-bileşiklere çevirerek tuttuğu, metabolize ettiği bilinmemektedir. Bu konuda daha detaylı araştırmalara ihtiyaç vardır.

Tablo 5.1: Deney öncesi (0 h), deney sonrası (2Hf) ve C2 bakterisi örneğini içeren deney ortamının cevher bileşenlerinin XRF ölçüm sonuçları.

Komponentler	Cevher 0h	Cevher 2Hf	Örnek C2
Zn	31,8019	36,9896	36,7652
S	23,073	25,8007	25,8334
Ca	13,6385	8,9139	8,9209
Fe	13,0565	12,4254	12,74
Pb	9,6876	7,9601	8,3583
Si	5,3764	5,1636	4,7199
Al	1,4876	1,0118	0,9567
Mn	0,7123	0,5039	0,4806
K	0,3	0,2247	0,2111
Cu	0,2845	0,339	0,3444
Cd	0,2319	0,1961	0,2116
Mg	0,1658	0,0956	0,097
As	0,1467	0,1267	0,1617
Co	0,025	0,0109	0
P	0,0124	0,118	0,1057

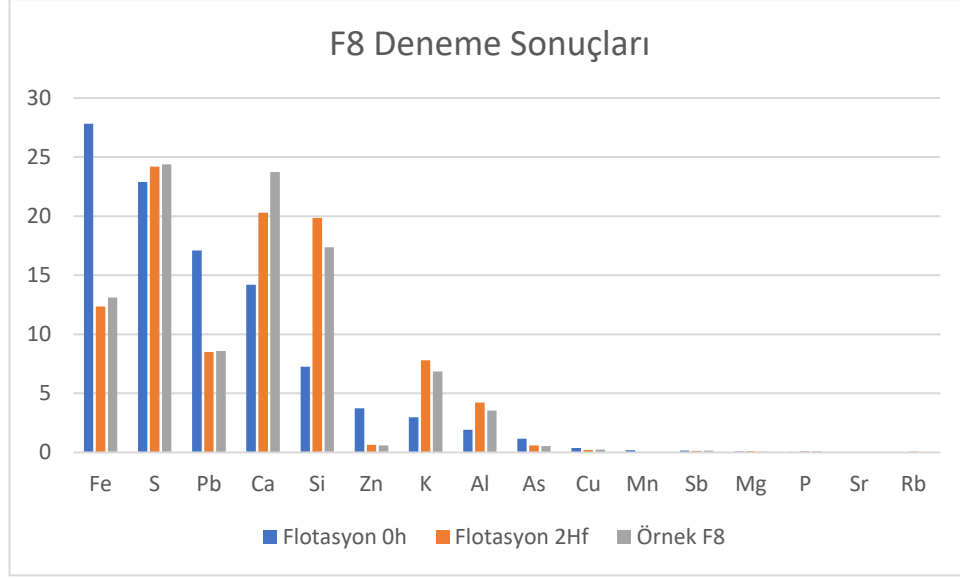


Şekil 5.2: Deney öncesi (0 h), deney sonrası (2Hf) ve C2 bakterisi örneğini içeren deney ortamının cevher bileşenlerinin XRF ölçüm sonuçlarının grafiği.

Benzer şekilde ham flotasyon atığından izole edilen F8 bakterisi de iki haftalık çalışma süresi sonunda flotasyon atığı bileşenleri XRF ölçümleri ile irdelenmiştir (Tablo 5.2) ve kontroller ile karşılaştırılarak değerlendirilmiştir (Şekil 5.3). Buna göre; kurşun (Pb) ve çinko (Zn) cevherlerine bakıldığında, F8 bakterisinin başlangıç örneğine göre kurşunu ve çinkoyu ciddi oranda azalttığı, oldukça iyi biyoliç yeteneğine sahip olduğu anlaşılmaktadır. Bununla beraber kurşunu ve çinkoyu hangi formlara-bileşiklere çevirerek tuttuğu bilinmemektedir. Bunun için daha detaylı araştırmalara ihtiyaç vardır.

Tablo 5.2: Deney öncesi (0 h), deney sonrası (2Hf) ve F8 bakteri örneğini içeren deney ortamının flotasyon atığı bileşenlerinin XRF ölçüm sonuçları.

Komponentler	Flotasyon 0h	Flotasyon 2Hf	Örnek F8
Fe	27,822	12,3681	13,1229
S	22,9047	24,1896	24,3759
Pb	17,0961	8,4982	8,5857
Ca	14,1928	20,2995	23,7438
Si	7,2533	19,8515	17,3617
Zn	3,7363	0,6535	0,604
K	2,9864	7,8146	6,8476
Al	1,9196	4,2335	3,5385
As	1,1579	0,5891	0,5435
Cu	0,3769	0,2082	0,2392
Mn	0,1868	0,0199	0,0163
Sb	0,168	0,1251	0,1593
Mg	0,0722	0,1057	0,0815
P	0,0503	0,1071	0,1126
Sr	0,042	0,0548	0,0497
Rb	0,0347	0,0692	0,0617



Şekil 5.3: Deney öncesi (0 h), deney sonrası (2Hf) ve F8 bakteri örneğini içeren deney ortamının flotasyon atığı bileşenlerinin XRF ölçüm sonuçlarının grafiği.

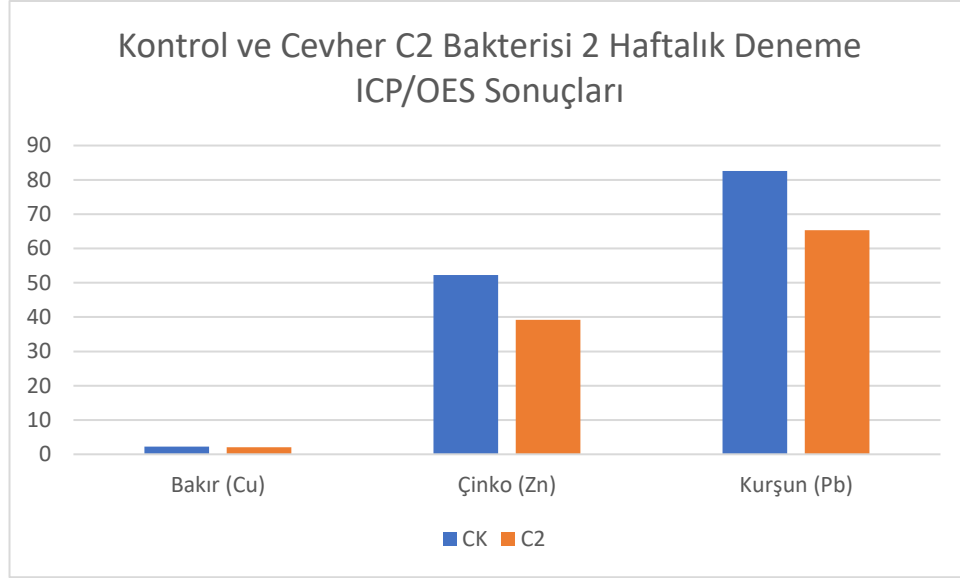
Bu veriler ışığında denemeye alınmış cevher ve flotasyon atığı örnekleri üzerinde yapılan XRF çalışmalarına göre cevherden izole ettiğimiz C2 bakterisi özellikle kurşunu ve zenginleştirme adına çinko cevherini; flotasyon atığından izole ettiğimiz F8 bakterisinin de kurşun ve çinkoyu ciddi miktarda metabolize ettiği belirlenmiştir.

5.3.2. İndüktif Eşleşmiş Plazma Optik Emisyon Spektroskopisi (ICP-OES) Analizlerine Ait Bulgular

Biyoliçing işleminin kapalı bir sistem olması mantığından yola çıkarak iki haftalık deney süresi boyunca cevherin ve C2 bakterisinin içinde bulunduğu nispeten fakir bir besiyeri olan NB'a geçen bileşenler de ICP-OES yardımıyla ölçülmüş (Tablo 5.3) ve sonuçlar grafiğe aktarılmıştır (Şekil 5.4). ICP-OES sonuçlarına göre, bakır (Cu) kurşun (Pb) ve çinko (Zn) cevherleri C2 bakterisi ile kontrol örneğine göre bakır cevherinde az, kurşun ve çinko cevherinde ciddi miktarda biyoremediasyona uğratarak parçaladığı ve biyolojik iyileştirme gerçekleştirdiği görülmektedir. Bununla beraber adı geçen cevherlerin hangi kimyasal formlara çevrildiğini anlamak için daha detaylı çalışmalara ihtiyaç duyulmaktadır.

Tablo 5.3: Deney sonrası (2Hf-CK) ve C2 bakteri örneğini içeren deney ortamının cevher bileşenlerinin ICP-OES ölçüm sonuçları.

Komponentler	CK	C2
Bakır (Cu)	2,25	2,054
Çinko (Zn)	52,26	39,21
Kurşun (Pb)	82,54	65,35

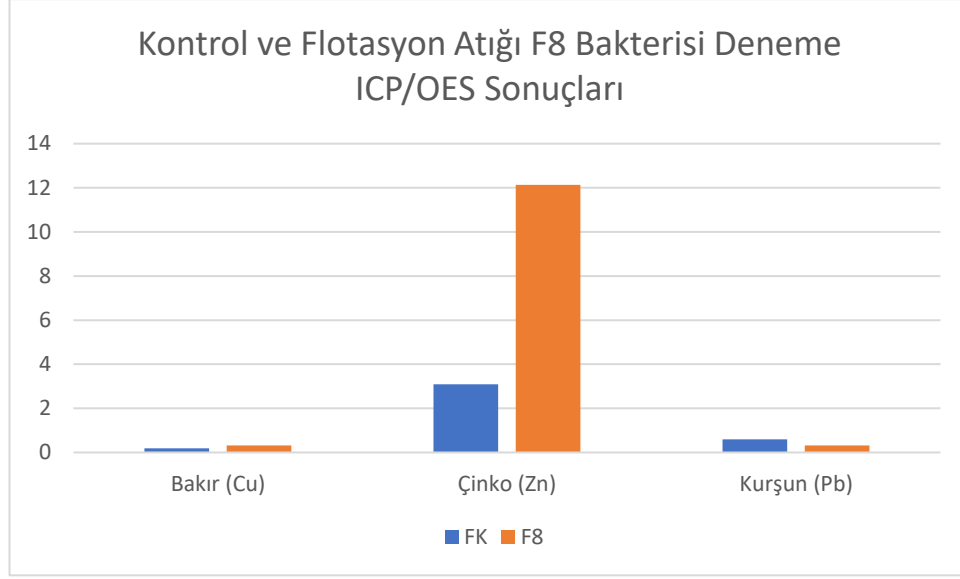


Şekil 5.4: Deney sonrası (2Hf-CK) ve C2 bakteri örneğini içeren deney ortamının cevher bileşenlerinin ICP-OES ölçüm sonuçlarının grafiği.

Benzer şekilde iki haftalık deney süresi boyunca flotasyon atığı ve F8 bakterisinin içinde bulunduğu NB besiyerine geçen bileşenler ICP-OES yardımıyla ölçülmüş (Tablo 5.4) ve sonuçlar grafiğe aktarılmıştır (Şekil 5.5). ICP-OES sonuçlarına göre, biyolojik iyileştirme vasıtasıyla F8 bakterisi ile kontrol örneğine bakıldığında bakır (Cu) ve çinko (Zn) cevherlerinde ciddi miktarda zenginleşme, kurşun (Pb) cevherinde ise ciddi miktarda parçalanma görülmektedir. Buna karşın adı geçen cevherlerin hangi kimyasal formlara çevrildiği bilinmemektedir. Buradaki metabolik yolların aydınlatılması için daha detaylı çalışmalara ihtiyaç duyulmaktadır.

Tablo 5.4: Deney sonrası (2Hf-FK) ve F8 bakteri örneğini içeren deney ortamının flotasyon atığı bileşenlerinin ICP-OES ölçüm sonuçları.

Komponentler	FK	F8
Bakır (Cu)	0,194	0,322
Çinko (Zn)	3,095	12,13
Kurşun (Pb)	0,59	0,312



Şekil 5.5: Deney sonrası (2Hf-FK) ve F8 bakteri örneğini içeren deney ortamının flotasyon atığı bileşenlerinin ICP-OES ölçüm sonuçlarının grafiği.

Üst sıvıdan yapılan ICP-OES analizi çalışma sonuçlarına göre; cevherden izole ettiğimiz C2 bakterisinin çinko ve kurşunu, F8 bakterisinin de kurşun, çinko ve bakırı metabolize ettiği, parçaladığı ve/veya bünyesinde tuttuğu doğrulanmış ve XRF sonuçları ile uyumlu sonuçlar gösterdiği anlaşılmıştır.

6. TARTIŞMA

Kurşun ve çinko, en yaygın kullanılan demir dışı metaller arasındadır [Tombul ve Ünver, 2022]. Ülkemiz de kurşun-çinko rezervleri açısından zengindir [Mudd vd., 2017; Yarlugkal Altınışık, 2019], ve bu nedenle Türkiye Dünya'nın önde gelen kurşun üreticileri arasında yer almaktadır [U.S Geological Survey, Mineral Commodity Summaries, 2025]. Hem ülkemizde hem de Dünya'da maden cevherlerinden kurşun ve çinko üretimi yüksek enerji sarfiyatını gerektiren, sürdürülebilir olmayan, yüksek maliyetli ve zararlı maddelerin emisyonuna neden olan yöntemler ile gerçekleştirilmektedir [Seetharaman, 2014].

Son yıllarda yapılan çalışmalara göre kurşun-çinko cevherlerinin işlenmesi sırasında ortaya çıkan maden atıkları da geri kazanılabilecek miktarlarda kurşun, çinko ve diğer ağır metalleri bünyelerinde barındırır. Bu nedenle bu atıkların değerlendirilmesiyle de kurşun, çinko ve diğer ağır metaller geri kazanılabilir ve metallerin üretiminde cevher madenlerine alternatif olabilirler [Mudd vd., 2017]. Maden atıklarının değerlendirilmesi ile aynı zamanda atıkların bünyesinde bulunan çevreye zararlı ağır metallerin uzaklaştırılması mümkündür [Dong vd., 2023].

Kurşun, çinko ve diğer ağır metallerin biyoliçing ile minerallerden ayrıştırılması konvansiyonel yöntemler ile karşılaştırıldığında düşük maliyetli, çevre dostu ve sürdürülebilir bir yöntem olarak görülmektedir [Panda vd., 2024]. Biyoliçing işlemi ile ayrıştırılarak kurşun, çinko ve diğer ağır metallerin elde edilmesi yönündeki çalışmalar son yıllarda hızla artmaktadır [Ahmadi vd., 2020; Sundramurthy vd., 2020; Sajjad vd., 2020; Ye vd., 2021; Zahiri vd., 2021; Aghazadeh vd., 2023; Xue vd., 2024; Schueler vd., 2024].

Çalışmamızda, Balıkesir-Balya'da bulunan, Türkiye'nin en eski, en büyük ve en önemli kurşun-çinko rezervlerinden biri olan maden yatağının işletilmesi sonucu açığa çıkan cevher ve çevreye bırakılan flotasyon atıkları ile biyoliçing çalışması yapılmıştır. Bu biyolojik iyileştirme çalışmasında maden alanından alınan cevher ve flotasyon atığından izole edilen bakteriler başarıyla kullanılmıştır.

Literatürlere göre yapılan biyoremediasyon çalışmalarında genellikle ağır metaller ile kontamine olmuş bölgelerden izole edilen mikroorganizmalar kullanılmaktadır. Bunun nedeni bu bölgelerde yaşayan bakterilerin bulundukları yere bağlı olarak

genetik yapılarını ağır metallere dirençli şekilde modifiye etmeleri olabilir **[Behera ve Das, 2023]**. Bu özellikleri nedeniyle pek çok çalışmada maden alanlarından izole edilen bakterilerin, ağır metalleri biyoliç edebildiği gösterilmiştir **[Zhang vd., 2018; Ahmadi vd., 2020; Sajjad vd., 2020; Ye vd., 2021; Kordloo vd., 2023; Li, Z vd., 2024; He vd., 2024]**. Ayrıca yapılan çalışmalarda genellikle ağır metallerin maden atıklarından ve konsantrelerinden biyoliç edilmesinin, cevherlerden doğrudan biyoliç edilmesine göre daha etkili olduğu bildirilmektedir **[Zhang vd., 2018; Sajjad vd., 2020; Barnett vd., 2020; Zahiri vd., 2021; He vd., 2024; Ahmadi vd., 2020; Ye vd., 2021; Kordloo vd., 2023; Rus vd., 2024; Li, Z vd., 2024]**.

Çalışmamız da bu veriler ışığında kurgulanmıştır. Buna göre; cevherden izole edilen C2 bakterisinin iki haftalık biyoliçinginin XRF sonuçlarına göre; kurşun (Pb) cevheri özelinde bakıldığında, başlangıç örneğine göre kurşunu azalttığı, çinko (Zn) cevherinde ise ters biyoliç yaparak zenginleştirdiği görülmektedir. Bununla beraber kurşunu ve çinkoyu hangi formlara-bileşiklere çevirerek tuttuğu, metabolize ettiği bilinmemektedir (Tablo 5.1 ve Şekil 5.2). Yine C2 bakterisinin ICP-OES sonuçlarına baktığımızda, kontrol örneğine göre bakır, kurşun ve çinko cevherlerinde ciddi miktarda biyoremediasyon ile biyolojik olarak parçaladığı ve iyileştirme yaptığı görülmektedir (Tablo 5.3 ve Şekil 5.4). Metabolik olarak bu metallerin hangi formlara çevrildiği bilinmemektedir. Bu nedenle daha detaylı kimyasal yapı çalışmalarına ihtiyaç duyulmaktadır.

Bu sonuçlar metindeki literatürlere uygunluk göstermektedir. Buna karşın literatürlerde genellikle çinko metalinin çok parçalandığı ama kurşun metalinin daha az parçalandığı ve genellikle çöktüğüne rastlanmaktadır **[Ye vd., 2021; Xue vd., 2024; Schueler vd., 2024]**. Bizim çalışmamızda ise bu genellemeden farklı olarak cevher izolatomuz C2 bakterisi hem kurşunu ve çinkoyu hem de bakırı parçalıyor görülmektedir. Bu orijinal bir sonuçtur. Ek olarak Balıkesir-Balya kurşun-çinko madeninden temin edilen cevher izolatu bakterimizin farklı yeteneklere sahip bir tür olduğunu göstermektedir. Dolayısıyla izolatomuzun yeni ve endemik bir tür olma olasılığı vardır.

Çalışmamızda flotasyon atığından izole ettiğimiz F8 bakterisinin iki haftalık biyoliçinginin XRF sonuçlarına baktığımızda; F8 bakterisinin başlangıç örneğine göre kurşunu ve çinkoyu ciddi oranda azalttığı, oldukça iyi biyoliç yeteneğine sahip olduğu anlaşılmaktadır (Tablo 5.2 ve Şekil 5.3) ama kurşun ve çinkoyu hangi formlara-

bileşiklere çevirdiği bilinmemektedir. ICP-OES sonuçlarına göre, F8 bakterisi ile yapılan biyolojik iyileştirmede kontrol örneği ile karşılaştırıldığında, bakır (Cu) ve çinko (Zn) cevherlerinde ciddi miktarda zenginleşme, kurşun (Pb) cevherinde ise ciddi miktarda parçalanma görülmektedir (Tablo 5.4 ve Şekil 5.5). Buna karşın adı geçen cevherlerin hangi kimyasal formlara çevrildiği bilinmemektedir. C2 ve F8 ile yapılan çalışmamızda bakterilerdeki metabolik yollar ve biyoliçing sonucunda oluşan bileşiklerin kimyasal yapılarının belirlenmesi için daha detaylı çalışmalara ihtiyaç duyulmaktadır. F8 bakterisi ile yapılan çalışma da literatürlere uygunluk göstermektedir. Buna karşın flotasyon atığından izole edilen F8 bakterisi de kurşun ve çinkoyu oldukça iyi, bakırı ise az oranda parçalıyor görülmektedir. Bu da orijinal bir sonuçtur. Balıkesir-Balya kurşun-çinko madeninden temin edilen flotasyon atığı izolatomuzun farklı yeteneklere sahip bir tür olduğu düşünülebilir ve yeni bir endemik tür olma olasılığı vardır.

Bu veriler ışında sonuçlara ve literatürlere bakıldığında kurşun-çinko minerallerinin biyoliçingi sonucunda genellikle çinko parçalanırken, kurşun biyoliçinginin oldukça düşük olduğu gösterilmiştir [Ye vd., 2021; Xue vd., 2024; Schueler vd., 2024]. ICP-OES ölçümlerine göre C2 bakterisinin F8 izolata göre kurşunu, çinkoyu ve bakırı daha yüksek oranlarda biyoliç ederek parçaladığı F8 bakterisinin ise çinko ve bakır miktarını arttırdığı, zenginleştirdiği görülmüştür (Tablo 5.3 ve 5.7). Literatürlere bakıldığında, kurşun-çinko biyoliçinginin genellikle demir ya da kükürt oksitleyen kemoototrof bakteriler yardımıyla yapıldığı görülmektedir [Ahmadi vd., 2020; Sundramurthy vd., 2020; Ye vd., 2021; Zahiri vd., 2021; Aghazadeh vd., 2023; Schueler vd., 2024].

Bu veriden yola çıkarak izolatlarımız C2 ve F8’de demir veya kükürt bakterisi olma olasılığı vardır. Yapılan farklı çalışmalarda, biyoliçing için kemoototrof bakteriler kullanıldığı da görülmektedir. Bu çalışmalarda kullanılan kemoototrof bakterilerin düşük çözünürlüğe sahip kurşun sülfat ($PbSO_4$) bileşikleri oluşturarak kurşunu çöktürdüğü gösterilmiştir [Ye vd., 2017; Schueler vd., 2024]. Bizim çalışmamızda kullandığımız C2 ve F8 bakterileri ise kemoototrof olabilirler. Bununla beraber kurşunu çöktürmekten çok metabolize ediyor görülmektedirler. Bir diğer literatürde biyoliçing çalışmasında kemoheterotrof bakteriler kullanıldığında kurşunun flotasyon atığından geri kazanıldığı gösterilmiştir. Bununla birlikte kurşun biyoliçingi yüksek oranda gerçekleştirilmemiştir [Schueler vd., 2024]. Bu veriden yola çıkarak

Çalışmamızda kullandığımız C2 ve F8 bakterilerinin kemoheterotrof olma olasılığı da vardır.

Çalışmamız genel olarak değerdendirildiğine Balıkesir-Balya kurşun-çinko maden yatağı cevher zuhurundan izole edilen C2 bakterisi XRF analiz sonuçlarına göre deneme ortamındaki katı madde 5 g maden cevher zuhurunda; kurşunu parçalıyor, çinko miktarını ise zenginleştirerek biyolojik iyileştirme yapıyor görölmektedir. Çalışmada kullanılan sıvı besiyerinde ICP-OES yöntemi ile yapılan analize göre ise C2 bakterisi kurşunu, çinkoyu ve bakırı biyoliçing ile parçalamaktadır. Benzer şekilde maden sahasından alınan flotasyon atığından izole edilen F8 bakterisi XRF analiz sonuçlarına göre Balya maden sahasından gelen flotasyon zuhurunda, hem kurşunu hem de çinkoyu parçalıyor yani biyoliç ediyor görölmektedir. Çalışmada kullanılan sıvı besiyerinde yapılan ICP-OES analizlerine göre ise F8 bakterisi çinkoyu ve bakırı biyolojik iyileştirme ile zenginleştirirken, kurşunu biyoliçing ile parçalamaktadır. Özetle izolatlarımızın cevher ve flotasyon zuhurlarını daha işlenebilir, zengin bir atık haline getirdiğini de söylemek mümkündür.

Bu sonuçlar ışığında 15 megaton cevher rezervi ve 3 milyon tonun üzerinde flotasyon atığı bulunan Balıkesir-Balya kurşun-çinko maden sahasından izole edilen bakteriler sayesinde kurşun, çinko, bakır ve benzeri ağır metallerin çevre dostu bir yöntem ile ayrıştırılması, bunun için özgün bakteri türleri ve yöntemleri geliştirilmesi mümkündür. Çalışma sonucunda elde edilen bakterilerin yeni ve endemik tür olma olasılığı ve kullanılan yöntemin geliştirilerek, bir reaktör tasarlanması ve bu tasarımın patentlenme olasılığı oldukça yüksektir.

KAYNAKLAR

- Abd El-Aziz Z. K., El-Sayed M. H., Abd El-Ghany A. A., (2016), "Microbial Bioremediation of Lead by Lead-Resistant *Pseudomonas chlororaphis* Strain Hel-KE'-14 Isolated from Industrial Wastewater", *International Journal of Pharmaceutical Research & Allied Sciences*, 5 (4).
- Abdollahi H., Mirmohammadi M., Ghassa S., Jozanikohan G., Boroumand Z., Tuovinen O. H., (2022), "Acid bioleaching of select sphalerite samples of variable Zn- and Fe-contents", *Hydrometallurgy*, 212, 105897.
- Aghazadeh S., Abdollahi H., Gharabaghi M., Mirmohammadi M., (2023), "Bioleaching of zinc, copper and antimony from a tetrahedrite concentrate using acidophilic microorganisms", *Hydrometallurgy*, 219, 106075.
- Ağdemir N., Kırıkoglu M. S., Lehmann B., Tietze J., (1994), "Petrology and alteration geochemistry of the epithermal Balya Pb-Zn-Ag deposit, NW Turkey: a reconnaissance study", *Mineralium Deposita*, 29, 366-371.
- Ahmadi M., Hosseini M. R., Ahmadi A., Foroutan A., (2020), "Continuous bio-hydrometallurgical extraction of zinc from a bulk lead-zinc flotation concentrate on a pilot scale", *Minerals Engineering*, 156, 106529.
- Akçıl A., Çiftçi H., (2003), "Küre piritli bakır cevherinin liçinde sülfür ve demir oksidasyonu yapan bakterilerin metal kazanımına etkisi", *Yerbilimleri*, 24 (28), 145-154.
- Arslan I., (2010), "Tanzimat'tan Cumhuriyet'e Bir Maden Şehri: Balya (1839-1923)", *The Journal of Academic Social Science Studies*, 3 (2), 41-54.
- Asadi T., Azizi A., Lee J. C., Jahani M., (2017), "Leaching of zinc from a lead-zinc flotation tailing sample using ferric sulphate and sulfuric acid media", *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 5 (5), 4769-4775.
- Aydın İ., (2006), "Madencilik-Şehirleşme İlişkisine Farklı Bir Örnek: Balya", *Marmara Coğrafya Dergisi*, (12), 133-147.
- Barnett M. J., Palumbo-Roe B., Dedy E. A., Gregory S. P., (2020), "Comparison of Three Approaches for Bioleaching of Rare Earth Elements from Bauxite", *Minerals*, 10 (8), 649.
- Baştürk A., (2017), "Balya (Balıkesir) Civarındaki Flotasyon ve İzabe Atıklarının Özelliklerinin Belirlenmesi ve Rezervin Hesaplanması", *Yüksek Lisans Tezi*, Balıkesir Üniversitesi.
- Baştürk A., Aydoğan M. S., (2022), "Balya (Balıkesir, KB Türkiye) Bölgesindeki Flotasyon ve İzabe Atıklarında Jeostatistiksel Parametreler Kullanarak Modelleme ve Kaynak Hesabına Örnek Bir Çalışma", *Türkiye Jeoloji Bülteni*, 65 (1), 1-26.

Behera S., Das S., (2023), “Potential and prospects of Actinobacteria in the bioremediation of environmental pollutants: Cellular mechanisms and genetic regulations”, *Microbiological Research*, 273, 127399.

Bharagava R. N., (2017), “Environmental Pollutants and their Bioremediation Approaches, CRC Press.

Brest K. K., Henock M. M., Guellord N., Kimpiab M., Kapiamba K. F., (2021), “Statistical investigation of flotation parameters for copper recovery from sulfide flotation tailings”, *Results in Engineering*, 9, 1002007.

Bulatovic S M., (2007), “Handbook of Flotation Reagents Chemistry, Theory and Practice: Flotation of Sulfide Ores”, Elsevier Science & Technology Books.

Cebekhulu S., Gomez-Arias A., Matu A., Alom J., Valverde A., Caraballo M. A., Ololade O, Schneider P., Castillo J., (2024), “Role of indigenous microbial communities in the mobilization of potentially toxic elements and rare-earth elements from alkaline mine waste”, *Journal of Hazardous Materials*, 466, 133504.

Chen Q., Xu P., Huang Y., Liu C., Wei B., Xie B., Wang R., Zhong X., Zhang Z., Xu Z., (2025), “A Novel Process for Extracting Lead and Zinc From Low-Grade Lead–Zinc Ore Via Low-Temperature Chlorination Roasting and Water Leaching”, *Journal of Sustainable Metallurgy*, 11 (1), 330-339.

Corbett M. K., Gifford A., Fimognari N., Watkin E. L. J., (2024), “Analysis of element yield, bacterial community structure and the impact of carbon sources for bioleaching rare earth elements from high grade monazite”, *Research in Microbiology*, 175 (1-2), 104133.

Çelebi E. E., Öncel M. S., (2016), “Determination of acid forming potential of massive sulfide minerals and the tailings situated in lead/zinc mining district of Balya (NW Turkey)”, *Journal of African Earth Sciences*, 124, 487-496.

Çelik Balcı N., Gül S., Kılıç M. M, Karagüler N. G, Sarı E., Sönmez M. Ş., (2014), “Balya (Balıkesir) Pb-Zn Madeni Atık Sahasının Biyojeokimyası ve Asidik Maden Drenajı Oluşumuna Etkileri”, *Türkiye Jeoloji Bülteni-Geological Bulletin of Turkey*, 57 (3).

Das S., (2014), “Microbial Biodegradation and Bioremediation”, Elsevier.

Das S., Dash H. R., (2017), “Handbook of Metal-Microbe Interactions and Bioremediation”, CRC press.

Donati E. R., (2018), “Heavy Metals in The Environment: Microorganisms and Bioremediation”, CRC Press.

Dong Y., Zan J., Lin H., (2023), “Bioleaching of heavy metals from metal tailings utilizing bacteria and fungi: Mechanisms, strengthen measures, and development prospect”, *Journal of Environmental Management*, 344, 118511.

Dong Z., Guo X., Yang B., Xiong H., Jiang W., (2022), “One-step extracting lead from galena (PbS) by a vacuum distillation method”, *Vacuum*, 196, 110789.

Fereydouni H., Naseri T., Mousavi S. M., (2025), “Synergistic recovery of Pr, Eu, and Ce from gold mine tailings using bioleaching and oxalic acid pretreatment”, *Scientific Reports*, 15 (1), 4478.

Fuentes M. S., Colin V. L., Saez J. M., (2018), “Strategies for Bioremediation of Organic and Inorganic Pollutants”, CRC Press.

Ghassa S., Boruomand Z., Abdollahi H., Moradian M., Akcil A., (2014), “Bioleaching of high grade Zn–Pb bearing ore by mixed moderate thermophilic microorganisms”, *Separation and Purification Technology*, 136, 241-249.

Giese E. C., Jordao C. S., (2019), “Biosorption of lanthanum and samarium by chemically modified free *Bacillus subtilis* cells”, *Applied Water Science*, 9 (8), 1–8.

He Y., Ma L., Liang X., Li X., Zhu J., He H., (2024), “Resistant rare earth phosphates as possible sources of environmental dissolved rare earth elements: insights from experimental bio-weathering of xenotime and monazite”, *Chemical Geology*, 661, 122186.

Hellgren S., Engström F., Sundqvist Öqvist L., (2024), “The Characterization of Residues Related to the Roasting–Leaching–Electrowinning Zinc Production Route for Further Metal Extraction”, *Metals*, 14 (1), 73.

Hong C., Tang Q., Liu S., Kim H., Liu D., (2023), “A two-step bioleaching process enhanced the recovery of rare earth elements from phosphogypsum”, *Hydrometallurgy*, 221, 106140.

Khan M., Nizamani M. M., Asif M., Kamran A., He G., Li X., Yang S., Xie X., (2025), “Comprehensive approaches to heavy metal bioremediation: Integrating microbial insights and genetic innovations”, *Journal of Environmental Management*, 374, 123969.

Kordloo M., Abdollahi H., Gharabaghi M., Yadollahi A., Rezaei A., (2023), “Evaluation of the effects of L-cysteine addition on the bioleaching of zinc and cadmium from sphalerite flotation concentrate”, *Minerals Engineering*, 204, 108379.

Laznicka P., (2006), “Giant Metallic Deposits: Future Sources of Industrial Metals”, Berlin: Springer.

Lei Y., Zhang G., Ai C., Zhuang S., (2016), “Bioleaching of sphalerite by the native mesophilic iron-oxidizing bacteria from a lead-zinc tailing”, *Procedia Environmental Sciences*, 31, 554-559.

Li X., Ma L., He Y., Liang X., Zhu J., He H., (2024), “Indigenous microbial influence on REE enrichment and fractionation in South China weathering crusts: Insights from experimental simulations”, *Chemical Geology*, 663, 122263.

Li Z., Gao P., Zhao X., Dong Z., (2024), “Potential and characteristics of rare-earth metals acid bioleaching from the rare-earth-rich tailings with the enriched functional bacterial consortium: Comparison between one-step and two-step processes”, *Chemical Engineering Journal*, 495, 153492.

Luo X., Feng B., Wong C., Miao J., Ma B., Zhou H., (2016), “The critical importance of pulp concentration on the flotation of galena from a low grade lead–zinc ore”, *Journal of Materials Research and Technology*, 5 (2), 131-135.

Maleke M., Valverde A., Vermeulen J. G., Cason E., Gomez-Arias A., Moloantoa K., Coetsee-Hugo L., Swart H., Van Heerden E., Castillo J., (2019), “Biomining and Bioaccumulation of Europium by a Thermophilic Metal Resistant Bacterium”, *Frontiers in Microbiology*, 10, 81.

Marra A., Cesaro A., Rene E. R., Belgiorno V., Lens P. N. L., (2018), “Bioleaching of metals from WEEE shredding dust”, *Journal of Environmental Management*, 210, 180-190.

MTA, Web 1, <https://www.mta.gov.tr/v3.0/bilgi-merkezi/maden-yataklari> (Erişim Tarihi: 18/06/2025).

Mudd G. M., Jowitt S. M., Werner T. T., (2017), “The world's lead-zinc mineral resources: Scarcity, data, issues and opportunities”, *Ore Geology Reviews*, 80, 1160-1190.

Nan T., Yang J., Aromaa-Stubb R., Zhu Q., He H., Lundström M., (2024), “Extracting valuable metals from zinc sulfide concentrate: A comprehensive simulation-based life cycle assessment study of oxidative pressure leaching”, *Minerals Engineering*, 216, 108888.

Owusu-Fordjour E. Y., Yang X., (2023), “Bioleaching of rare earth elements challenges and opportunities: A critical review”, *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 11 (5), 110413.

Özışık G., (2009), “Genetical Investigation of Balya-Balıkesir Lead-Zinc Mineralizations”, Thesis of Master of Science, The Middle East Technical University.

Panda S., Mishra S., Akcil A., Van Hullebusch E. D., (2024), “Biotechnological Innovations in the Mineral-Metal Industry”, Springer International Publishing.

Parlak M., Tunçay T., Parlak A. Ö., (2024), “Heavy metals in tailings and soils in the Pb-Zn mining areas of North-west Türkiye and health risk evaluations”, *International Journal of Agriculture Environment and Food Sciences*, 8 (1), 131-148.

Rao S. R., (2004), “Surface Chemistry of Froth Flotation: Volume 1: Fundamentals”, Second Edition, Springer Science & Business Media.

Rus A. M. M., Winarko R., Chaerun S. K., Mufakhir F. R., Astuti W., Minwal W. P., (2024), “Bioleaching of rare earth elements (REEs) from Indonesian red mud by the

bacterium *Bacillus nitratireducens* strain SKC/L-2", E3S Web of Conferences (Vol. 543, p. 02014).

Sajjad W., Zheng G., Ma X., Xu W., Ali B., Rafiq M., Zada S., Irfan M., Zeman J., (2020), "Dissolution of Cu and Zn-bearing ore by indigenous iron-oxidizing bacterial consortia supplemented with dried bamboo sawdust and variations in bacterial structural dynamics: A new concept in bioleaching", *Science of the Total Environment*, 709, 136136.

Schueler T. A., Schippers A., Goldmann D., (2024), "Bioleaching for metals removal from mine tailings flotation fractions", *Hydrometallurgy*, 225, 106286.

Seetharaman S., (2014), "Treatise on Process Metallurgy: Volume 3: Industrial Processes, Part A", Elsevier.

Shen Z., (2021), "Principles and Technologies of Flotation Machines", Springer.

Sundramurthy V. P., Rajoo B., Srinivasan N. R., Kavitha R., (2020), "Bioleaching of Zn from sphalerite using *Leptospirillum ferriphilum* isolate: effect of temperature and kinetic aspects", *Applied Biological Chemistry*, 63 (1), 44.

Tamzok N., (2005), "Türkiye Madencilik Sektöründe Yapısal Dönüşüm ve Sonuçları", Türkiye 19. Madencilik Kongresi ve Fuarı, İzmir, Türkiye, 9-12 Haziran.

Tatung M., Deb C. R., (2024), "Screening and characterization of heavy metal tolerant rhizobacteria from wild *Musa* rhizosphere from coal mining area of Changki, Nagaland, India and assessment of their growth promoting potential under Cd/Cu contaminated conditions", *South African Journal of Botany*, 165, 217-227.

Tombul T. D., Ünver İ., (2022), "Characterization of Balıkesir Balya Lead-Zinc Ore and Determination of its Particle Shape Factor", *MT Bilimsel*, (22), 67-81.

U.S. Geological Survey (2025), Mineral commodity summaries 2025 (ver 1.2, March 2025).

Varjani S. J., Agarwal A. K., Gnansounou E., Gurunathan B., (2018a), "Bioremediation: Applications for Environmental Protection and Management", New York, NY: Springer.

Varjani S. J., Gnansounou E., Baskar G., Pant D., Zakaria Z. A., (2018b), "Waste Bioremediation", Singapore: Springer.

Xue L., Jianzhi S., Shuang L., He S., Wencheng G., Xinlong Y., Jiankang W., Bowei C., (2024), "Study on bioleaching behavior of sphalerite from lead concentrate in agitator tank", *Journal of Physics: Conference Series*, Vol. 2738, 012012.

Yan Q., Chen Z., (2024), "Various microbes used for the recovery of rare earth elements from mine wastewater", *Bioresource Technology*, 408, 131229.

Yarluğkal Altınışık C., (2019), “Görgü (Malatya) Kurşun-Çinko Cevherinin Karakterizasyonu ve Flotasyonunun Araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, Sivas Cumhuriyet Üniversitesi.

Ye M., Li G., Yan P., Zheng L., Sun S., Huang S., Li H., Chen Y., Yang L., Huang, J., (2017), “Production of lead concentrate from bioleached residue tailings by brine leaching followed by sulfide precipitation”, Separation and Purification Technology, 183, 366-372.

Ye M., Liang J., Liao X., Li L., Feng X., Qian W., Zhou S., Sun S., (2021), “Bioleaching for detoxification of waste flotation tailings: Relationship between EPS substances and bioleaching behavior”, Journal of Environmental Management, 279, 111795.

Zahiri A., Ahmadi A., Foroutan A., Ghadiri M., (2021), “Improvement of zinc bioleaching from a zinc flotation concentrate using mechanical activation”, Minerals Engineering, 163, 106793.

Zhang D. R., Chen H. R., Nie Z. Y., Xia J. L., Li E. P., Fan X. L., Zheng L., (2020), “Extraction of Al and rare earths (Ce, Gd, Sc, Y) from red mud by aerobic and anaerobic bi-stage bioleaching”, Chemical Engineering Journal, 401, 125914.

Zhang L., Dong H., Liu Y., Bian L., Wang X., Zhou Z., Huang Y., (2018), “Bioleaching of rare earth elements from bastnaesite-bearing rock by actinobacteria”, Chemical Geology, 483, 544-557.

Zhou L., Hou S., Duan X., Lu Y., Liao J., Liu N., Zhao R., Zhao C., (2024), “New insights into uranium biomineralization mediated by *Pseudomonas* sp. WG2-6 in the presence of organic phosphorus: Promoting effect of extracellular polymeric substance and formation of U-P nanominerals”, Journal of Hazardous Materials, 480, 136123.

Zhou Z., Wang C., Ma B., Zhang B., Liu D., Xiong H., Deng Y., Xu B., (2023), “Separation of lead sulfide from galena concentrate via two-step vacuum distillation”, Vacuum, 213, 112155.

ÖZGEÇMİŞ

Mehmet AKYILDIZ, 2017 yılında Üsküdar Üniversitesi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi Biyomühendislik bölümünde lisans eğitime başladı ve 2023 yılında mezun oldu. Lisans eğitimi sırasında zorunlu yaz stajını Uludağ Üniversitesi Veteriner Fakültesi Genetik Anabilim Dalında tamamladı. 2023 yılında Gebze Teknik Üniversitesi, Moleküler Biyoloji ve Genetik Bölümünde yüksek lisans eğitime başladı.

TEZ METNİNDEN TÜRETİLEN YAYINLAR

Akyıldız M., Mater Y., (2025), “Kurşun-Çinko Cevheri ve Flotasyon Atığının Yerel İzolatlar ile Biyoliçingi”, 9. GTÜ Lisansüstü Araştırmalar Sempozyumu, Kocaeli, Türkiye, 26 – 27 Mayıs.