

ÇUKUROVA ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DOKTORA TEZİ

**Lateritik Nikel Cevherlerinden Nikel Kazanımında Biyoliç
Yönteminin Kullanılabilirliğinin Araştırılması**

Fatıma Masume USLU

Biyoteknoloji Anabilim Dalı

Nisan, 2025

ÇUKUROVA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DOKTORA TEZ ONAYI

Lateritik Nikel Cevherlerinden Nikel Kazanımında Biyoliç
Yönteminin Kullanılabilirliğinin Araştırılması

Fatıma Masume USLU

Biyoteknoloji Anabilim Dalı

Bu Doktora Tezi 15/04/2025 Tarihinde Aşağıdaki Jüri Üyeleri Tarafından Değerlendirilmiş ve Oy Birliği / Oy Çokluğu ile Kabul Edilmiştir.

Jüri : Prof.Dr. Hatice KORKMAZ GÜVENMEZ (Danışman)
: Prof.Dr. Oktay BAYAT
: Prof.Dr. Fatih MATYAR
: Prof.Dr. Ashabil AYGAN
: Doç.Dr. Akın YİĞİN

Bu Tez Fen Bilimleri Enstitüsü, Biyoteknoloji Anabilim Dalında Hazırlanmıştır.

Tez No:

Prof. Dr. Sadık DİNÇER
Enstitü Müdürü

Bu çalışma Ç. Ü. Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi Tarafından Desteklenmiştir.
Proje No: FDK-2017-8718

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaktan yapılan bildirişlerin, çizelge ve fotoğrafların kaynak gösterilmeden kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

İÇİNDEKİLER

ÖZ	I
ABSTRACT	II
TEŞEKKÜR.....	III
ÇİZELGELER DİZİNİ	IV
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	V
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	VII
1. GİRİŞ	1
1.1. Nikel.....	2
1.2. Nikelin Kullanım Alanları	4
1.3. Dünyada ve Türkiye’de Nikel Rezervleri	5
1.4. Sülfütlük ve Lateritik Nikel Yatakları	8
1.4.1. Sülfütlük Nikel Yatakları.....	8
1.4.2. Lateritik Nikel Yatakları.....	9
1.5. Lateritik Nikel Cevherlerinden Nikel Ekstraksiyon Yöntemleri.....	11
1.5.1. Pirometalurjik Yöntemler	12
1.5.2. Hidrometalurjik Yöntemler.....	12
1.6. Biyoliç.....	15
1.6.1. Biyoliç Uygulamasında Kullanılan Mikroorganizmalar	15
1.6.2. Metal Sülfür Cevherlerin İşlenmesinde Biyoliç Mekanizması	17
1.7. Çalışmanın Amacı.....	20
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR.....	23
2.1. Bakır Cevherinde Biyoliç.....	24
2.2. Uranyum Cevherinde Biyoliç	25
2.3. Altın Liçi.....	26
2.4. Lateritik Nikel Cevherlerinde Biyoliç.....	26
3. MATERYAL ve METOD.....	35
3.1. Materyal.....	35
3.1.1. Cevher Örneği.....	35
3.1.2. Mikroorganizmalar	35
3.1.3. Besiyerleri.....	35
3.2. Metod.....	37
3.2.1. Bakteri İzolasyonu	37
3.2.2. İzole Edilen Bakterilerin Tanımlanması	39
3.2.3. Cevher Numuneleri.....	40
3.4. Bakteri Kültürünün Hazırlanması.....	42

3.5. Biyoliç Deneyleri.....	43
3.6. Biyoliç Deneylerinde Çalışılan Parametreler.....	44
3.6.1. Pülp Yoğunluğunun Biyoliç Verimine Etkisinin Belirlenmesi	44
3.6.2. Tanecik Boyutunun Biyoliç Verimine Etkisinin Belirlenmesi.....	45
3.6.3. Başlangıç pH'ının Biyoliç Verimine Etkisinin Belirlenmesi.....	45
3.6.4. Sıcaklığın Biyoliç Verimine Etkisinin Belirlenmesi	45
3.7. Çözünen Nikel Miktarının Belirlenmesi	45
3.8. Biyoliç Çözeltisinden Nikel Eldesi.....	46
3.8.1. Biyoliç Çözeltisinden Demirin Uzaklaştırılması	47
3.8.2. Biyoliç Çözeltisindeki Nikelin Çöktürülmesi.....	48
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	51
4.1. Bakteri Süşlarının Tanımlanması	51
4.3. Biyoliç Deneylerinde Kullanılan Süşün Seçilmesi.....	54
4.4. Biyoliç Süresine Bağlı pH Değişimi	54
4.4.1. Pülp Yoğunluğuna Bağlı pH Değişimi	54
4.4.2. Tanecik Boyutuna Bağlı pH Değişimi.....	57
4.4.3. Başlangıç pH'ına Bağlı pH Değişimi.....	58
4.4.4. Cevher Türüne Bağlı pH Değişimi	60
4.5. Cevherlerden Nikel Çözünmesi.....	65
4.5.1. Pülp Yoğunluğunun Nikel Çözünme Verimine Etkisi.....	65
4.5.2. Tanecik Boyutunun Nikel Çözünme Verimine Etkisi	67
4.5.3. Cevher Türünün Nikel Çözünme Verimine Etkisi.....	70
4.5.4. Başlangıç pH'ının Nikel Çözünme Verimine Etkisi	71
4.5.5. Sıcaklığın Nikel Çözünme Verimine Etkisi.....	73
4.6. Biyoliç Çözeltisindeki Metal Miktarlarının Belirlenmesi.....	78
4.6.1. Biyoliç Çözeltisinden Demirin Uzaklaştırılması	78
4.6.2. Biyoliç Çözeltisinden Nikelin Çöktürülmesi.....	78
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	81
KAYNAKLAR	87
ÖZGEÇMİŞ	95

**Lateritik Nikel Cevherlerinden Nikel Kazanımında Biyoliç
Yönteminin Kullanılabilirliğinin Araştırılması**

Fatıma Masume USLU

Danışman: Prof. Dr. Hatice KORKMAZ GÜVENMEZ

Biyoteknoloji Anabilim Dalı

ÖZ

Bu çalışmada laterit nikel cevherinden nikel kazanımı için biyoliç yönteminin uygulanabilirliği araştırılmıştır. Gördes lateritik nikel yatağından alınan limonit ve nontronit tipi cevherlerin biyoliçinde aktif çamurdan izole edilen 3A kodlu doğal izolat *Acidithiobacillus ferrooxidans* kullanılmıştır. Optimum biyoliç koşullarını belirlemek için pülp yoğunluğu, tanecik boyutu, başlangıç pH'sı ve sıcaklığın biyoliç verimine etkisi araştırılmıştır. Maksimum verim nontronit tipi cevherde (%75) %1,5 pülp yoğunluğu, -0,038 mm tanecik boyutu, 2,5 başlangıç pH'ı ve 30°C'de gerçekleşmiştir. Limonit tipi cevherde ise (%62) 25°C'de, başlangıç pH'sı 2,0'de %1,5 pülp yoğunluğu ve -0,038 mm tanecik boyutunda gerçekleşmiştir. *Acidithiobacillus ferrooxidans* 25°C'de optimum aktivite göstermiştir. Çözünen nikel hidroksit çöktürme yöntemi ile çöktürülmüştür (>%98). Nontronit tipi cevherden elde edilen çökeltide nikel oranı %82 Limonit tipi cevherden elde edilen çökeltide nikel oranı %69 düzeyinde saptanmıştır. Bu çalışmadan elde edilen verilere göre; kemolitotrofik bakterilerin dolaylı biyoliçi ile Gördes laterit nikel cevherinden nikel çözünmesi yapılabileceği sonucuna varılmıştır. Kimyasal liç ile oluşabilecek potansiyel çevre kirliliği, yüksek maliyet gibi olumsuzluklar nedeniyle; biyoteknolojik yöntemlerin endüstride kullanılması önemli bir avantajdır.

Anahtar Kelimeler: *Acidithiobacillus ferrooxidans*, Biyoliç, Laterit, Nikel

**Investigation of the Usability of Bioleaching Method in Nickel
Recovery from Lateritic Nickel Ores**

Fatma Masume USLU

Advisor: Prof. Dr. Hatice KORKMAZ GÜVENMEZ

Department of Biotechnology

ABSTRACT

In this study, the applicability of bioleaching method for nickel recovery from laterite nickel ore was investigated. *Acidithiobacillus ferrooxidans*, a natural isolate coded 3A isolated from activated sludge, was used in the bioleaching of limonite and nontronite type ores taken from Gördes lateritic nickel deposit. In order to determine the optimum bioleaching conditions, the effects of pulp density, particle size, initial pH and temperature on bioleaching efficiency were investigated. Maximum nickel dissolution (75%) in the nontronite ore sample was achieved at 30⁰C temperature, 1,5% pulp density, initial pH 2,5 and -0,038 mm particle size. Maximum nickel dissolution (62%) in limonite ore was achieved at 25⁰C temperature, 1,5% pulp density, initial pH 2,0 and -0,038 mm particle size. *Acidithiobacillus ferrooxidans* showed optimum activity at 25⁰C. The dissolved nickel was precipitated by hydroxide precipitation method (>98%). Dissolved nickel hydroxide was precipitated by precipitation method (>98%). The nickel ratio in the precipitate obtained from nontronite type ore was determined as 82% and the nickel ratio in the precipitate obtained from limonite type ore was determined as 69%. According to the data obtained from this study; it was concluded that nickel dissolution can be done from Gördes laterite nickel ore by indirect bioleaching of chemolithotrophic bacteria. Due to the potential environmental pollution that may occur with chemical leaching and the negativities such as high cost; the use of biotechnological methods in the industry is an important advantage.

Keywords: *Acidithiobacillus ferrooxidans*, Bioleach, Laterite, Nickel

TEŞEKKÜR

Danışmanlığımı yapmış olan, bilgi ve tecrübeleriyle beni yönlendiren hocam Prof. Dr. Hatice KORKMAZ GÜVENMEZ'e teşekkürlerimi sunarım.

Tez izleme komitemde yer alan, yardım ve desteklerini benden esirgemeyen Prof. Dr. Oktay BAYAT ve Prof. Dr. Fatih MATYAR'a teşekkür ederim.

Yüksek Lisans ve Doktora eğitim sürecim boyunca yardım ve desteklerini gördüğüm, bilgi ve tecrübelerini benden esirgemeyen hocalarım Prof. Dr. Sadık DİNÇER ve Prof. Dr. Osman GÜLNAZ'a minnet ve teşekkürlerimi sunarım.

Doktora eğitim sürecimde benden manevi desteğini ve yardımlarını esirgemeyen, bilgilerinden faydalandığım hocalarım Doç. Dr. Erdal KUŞVURAN'a ve Uzman Dr. Emin ZÜMRÜTDAL'a teşekkür ederim.

Tezime buldukları katkılardan dolayı jüri üyelerim Prof. Dr. Ashabil AYGAN ve Doç. Dr. Akın YİĞİN hocalarıma teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmamda yapmış oldukları katkılardan dolayı Öğr. Gör. Dr. Yasin ÇİNÇİN'e, Doç. Dr. Mahmut ALTINER'e, Ertuğrul ÇANAK ve Dr. Öğr. Üyesi Nil YAPICI'ya teşekkürlerimi sunarım.

Manevi desteklerini benden esirgemeyen arkadaşlarım Uzman Biyolog Asya ÇIBLAKBAŞ'a, Dr. Biyolog Anıl DELİK'e, Uzman Biyolog Cansu YAVAŞ'a, Uzman Biyolog Yağmur SEDETALTUN'a Dr. Biyolog Mahir DEMİR'e, Dr. Biyolog Hojjat GHOLAMİ'ye, Uzman Belkız ERDİNÇ AYAZ'a ve Sibel ÜSTÜN'e teşekkür ederim.

Tez çalışmamda kullandığım numuneleri temin ettiğim Meta Nikel Kobalt A.Ş firmasına teşekkür ederim.

Finansal desteklerinden dolayı Çukurova Üniversitesi BAP birimine teşekkür ederim.

“2211-C Yurtiçi Öncelikli Alanlar Doktora Burs Programı” kapsamında teşvik bursu aldığım TÜBİTAK-BİDEB'e teşekkürlerimi sunarım.

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge1.1. Dünyada nikel cevheri üretimi (USGS, 2025).....	6
Çizelge1.2. Dünya nikel rezervi dağılımı (USGS, 2025)	6
Çizelge1.3. Türkiye’de bulunan nikel rezerv alanları (Korkut, 2022).....	8
Çizelge1.4. Nikel cevherlerinde bulunan bazı minareller (Abalı ve ark., 2020)	11
Çizelge 3.1. Biyoliç deneylerinde uygulanan sabit ve değişken parametreler.....	37
Çizelge 3.2. PCR reaksiyonu karışımı	40
Çizelge 3.3. PCR koşulları	40
Çizelge 4.1. İzolatlara ait 16 S’likr DNADizilerininBlast Sonuçları	51
Çizelge 4.2. Cevher numunelerinin XRF analiz sonucu	52
Çizelge 4.3. <i>At.ferrooxidans</i> kültürlerinin başlangıç ve Son pH değerleri.....	54
Çizelge 4.4. Limonit cevhere ait deneylerin pH verileri	63
Çizelge 4.5. Nontronit cevhere ait deneylerin pH verileri.....	64
Çizelge 4.6. Limonit cevhere ait nikel çözünme sonuçları (kırmızı renkle verilen sonuçlar % cinsindedir).....	75
Çizelge 4.7. Nontronit cevhere ait nikel çözünme sonuçları (kırmızı renkle verilen sonuçlar % cinsindedir).....	76
Çizelge 4.8. Limonit cevherde sıcaklığın biyoliç verimine etkisi	77
Çizelge 4.9. Nontronit cevherde sıcaklığın biyoliç verimine etkisi.....	77
Çizelge 4.10. Nikelin nontronit ve limonit tipi cevherlerde net çözünme verimleri.....	77
Çizelge 4.11. Biyoliç çözeltilisindeki çözünmüş metal konsantrasyonları	78
Çizelge 4.12. Demir çöktürmesinden sonra çökelen metal miktarları(%)	78
Çizelge 4.13. Çöktürme işlemlerinden sonra çökelen metal miktarları (%)	78
Çizelge 5.1. Farklı çalışmalarda elde edilen nikel çözünme verimleri.....	83

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Önemli nikel minerallerine örnekler (MTA, 2018)	3
Şekil 1.2. Nikel Kullanım Alanlarının Dağılım Grafiği (Çoban, 2014).	5
Şekil 1.3. Sülfütlük ve Lateritik Nikel Yataklarının Dünyadaki Dağılımı (MTA, 2018).....	7
Şekil 1.4. Lateritik Nikel Yataklarındaki Tabakalaşma ve Mineral Dağılımı (Parlak, 2017)	10
Şekil 1.5. Nikel Kazanımında Kullanılan Yöntemler.....	15
Şekil 3.1. İzolasyon Besiyerinde Bakteri Gelişimi (a: tiyosülfatlı besiyerinde bakteri gelişimi, b: demirli besiyerinde bakteri gelişimi).....	38
Şekil 3.2. Demir içeren besiyerinde mikroorganizmanın 10 günlük gelişimi (soldan sağa: 2.gün, 4.gün, 7.gün ve 10.gün).....	38
Şekil 3.3. Tiyosülfatlı Besiyerinde Bakteri Gelişimi.....	39
Şekil 3.4. 3A Suşunun Gram Boyaması	39
Şekil 3.5. Farklı Tanecik Boyutundaki Limonit ve Nontronit tipi Cevherler (a: Nontronit tipi cevher, b ve c: Limonit tipi cevher)	41
Şekil 3.6. Bakteri Üreme Eğrisi.....	43
Şekil 3.7. Biyoliç Deneylerinin Gerçekleştirilmesi.....	44
Şekil 3.8. Nikelin AAS ölçümlerinde kullanılan standart eğri grafiği	46
Şekil 3.9. Metal Hidroksitlerin pH'ya Bağlı Çökelme Grafiği (Medusa programı ile çizilmiştir). 47	
Şekil 3.10. Hidroksit Çöktürme Yöntemiyle Demirin Çöktürülmesi.....	48
Şekil 3.11. Hidroksit Çöktürme Yöntemiyle Nikelin Çöktürülmesi	49
Şekil 4.1. Limonit zondan alınan cevher numunesine ait XRD Grafiği.....	53
Şekil 4.2. Nontronit zondan alınan cevher numunesine ait XRD Grafiği	53
Şekil 4.3. Limonit Zondan Alınan Cevher Örneğinde Pülp Yoğunluğa Bağlı pH Değişimi (Deney koşulları: başlangıç pH:2,00, 150 dev/dk, 30°C, -0,063 mm tanecik boyutu)	55
Şekil 4.4. Nontronit Zondan Alınan Cevher Örneğinde Pülp Yoğunluğa Bağlı pH Değişimi (Deney koşulları: başlangıç pH:2,00, 150 dev/dk, 30°C, -0,038 mm tanecik boyutu)...	56
Şekil 4.5. Limonit Zondan Alınan Cevher Örneğinde Tanecik Boyutuna Bağlı pH Değişimi (Deney koşulları: başlangıç pH: 2,0 150 dev/dk, 30°C).....	57
Şekil 4.6. Nontronit Zondan Alınan Cevher Örneğinde Tanecik Boyutuna Bağlı pH Değişimi (Deney koşulları: başlangıç pH: 2,0 150 dev/dk, 30°C,).....	58
Şekil 4.7. Limonit Cevherde Başlangıç pH'sına Bağlı pH değişimi (Deney koşulları: 150 dev/dk, 30°C, %1,5 pülp yoğunluğu, tanecik boyutu -0,063 mm).....	59
Şekil 4.8. Nontronit Cevherde Başlangıç pH'sına Bağlı pH Değişimi (Deney koşulları: 150 dev/dk, 30°C, %1,5 pülp yoğunluğu, tanecik boyutu -0,063 mm)	60
Şekil 4.9. Cevher Türüne Bağlı pH Değişimi (Deney koşulları: başlangıç pH: 2,0 150 dev/dk, 30°C, %1,5 pülp yoğunluğu).....	61

Şekil 4.10. Limonit Zondan Alınan Cevher Örneğinde Pülp Yoğunluğunun Nikel Çözünme Verimine Etkisi (Deney koşulları: başlangıç pH: 2,0 150 dev/dk, 30°C, -0,063 mm) ...	65
Şekil 4.11. Nontronit Zondan Alınan Cevher Örneğinde Pülp Yoğunluğunun Nikel Çözünme Verimine Etkisi (Deney koşulları: başlangıç pH: 2, 150 dev/dk, 30°C, -0,038 mm)	66
Şekil 4.12. Limonit Zondan Alınan Cevher Örneğinde Tanecik Boyutunun Nikel Çözünme Verimine Etkisi (Deney koşulları: başlangıç pH: 2,0 150 dev/dk, 30°C)	67
Şekil 4.13. Nontronit Zondan Alınan Cevher Örneğinde Tanecik Boyutunun Nikel Çözünme Verimine Etkisi (Deney koşulları başlangıç pH:2,0 150 dev/dk, 30°C).....	68
Şekil 4.14. Cevher türüne bağlı nikel çözünmesi (Deney koşulları: başlangıç pH:2,0 150 dev/dk, 30°C, %1,5 pülp yoğunluğu)	70
Şekil 4.15. Limonit Cevherde Başlangıç pH'sına Bağlı Nikel Çözünmesi (Deney koşulları:150 dev/dk, 30°C, %1,5 pülp yoğunluğu, tanecik boyutu -0,063 mm)	72
Şekil 4.16. Nontronit Cevherde Başlangıç pH'sına Bağlı Nikel Çözünmesi (Deney koşulları: 150 dev/dk, 30°C, %1,5 pülp yoğunluğu, tanecik boyutu -0,063 mm)	73
Şekil 4.17. Limonit Cevherde Sıcaklığın Biyoliçe Etkisi (Deney koşulları: 150 dev/dk, 30°C, %1,5 pülp yoğunluğu, -0,063 mm tanecik boyutu)	73
Şekil 4.18. Nontronit Cevherde Sıcaklığın Biyoliçe Etkisi (Deney koşulları: 150 dev/dk, 30°C, %1,5 pülp yoğunluğu, -0,063 mm tanecik boyutu).....	74
Şekil 5.1. Deneyleri Özetleyen Akım Şeması	84

SİMGELER VE KISALTMALAR

AMD	:Asit Maden Drenajı
AOBS	: Adana Organize Sanayi Bölgesi
AR-G	: Araştırma- Geliştirme
Au	: Altın
BLAST	: Basic Local Alignment Search Tool
Ca ²⁺	: Kalsiyum (II) iyonu
Co	: Kobalt
Cu	: Bakır
DNA	: Deoksiriboz Nükleik Asit
EÜAŞ	: Elektrik Üretim Anonim Şirketi
Fe	: Demir
Fe ²⁺	: Demir (II) iyonu
HPAL	: High Pressure Acid Leaching (Yüksek Basıncılı Asit Liçi)
kPa	:Kilopaskal
M	: Molar
mA	: Miliamper
Mg	: Magnezyum
mg	: Miligram
Mg ²⁺	: Magnezyum (II) iyonu
MgCl ₂	: Magnezyum Klorür
mL	: Mililitre
mM	: Milimolar
Mn:	: Mangan
Mn ²⁺	: Manganez (II) iyonu
MTA	: Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü
µg	: Mikrogram
µL	: Mikrolitre
µM	: Mikromolar
µmol	: Mikromol
Ni	: Nikel
Ni ²⁺	: Nikel (II) iyonu
Nm	: Nanometre
OD	: Optik Dansite
PCR	: Polymerase Chain Reaction (Polimeraz Zincir Reaksiyonu)

dev/dk : Dakikada devir sayısı

S : Kükürt

sp : Species

USGS :United States Geological Survey (Amerika Birleşik Devletleri Jeoloji Araştırmaları)

XRD :X-Ray Diffraction (X-Işını Difraksiyonu)

XRF :X-Işını Floresans Spektometresi

YBAL : Yüksek Basıçlı Asit Liçi

Zn²⁺ : Çinko (II) iyonu



1. GİRİŞ

Nikel, günümüz ekonomisinin canlılığına önemli ölçüde katkıda bulunan birçok modern endüstriyel ve metalurjik uygulamada hayati öneme sahip stratejik bir metaldir. Nikel, üstün tokluk, dayanıklılık, korozyon direnci, özel manyetik ve elektronik özellikler ve aşırı sıcaklığa dayanma gibi karakteristik özellikleri sayesinde yüksek sıcaklık ve elektrik dirençli alaşımlar dahil olmak üzere hem demirli hem de demirsiz birçok alışımda yaygın olarak kullanılmaktadır. Nikel alaşımları uzun vadeli mukavemeti ve dayanıklılığı gibi benzersiz karakteristik özellikleri sebebiyle kimya, petrokimya, enerji ve havacılık endüstrileri gibi uygulamalar için kritik öneme sahiptir (Behera ve Mulaba-Bafubiandi, 2015).

Gelişen teknolojiyle birlikte artan endüstriyel faaliyetler nikel talebi de giderek artırmaktadır. Nikel ve diğer değerli matelerin talebindeki hızlı artış nedeniyle dünya çapındaki yüksek kaliteli cevher rezervleri endişe verici bir hızla azalırken, henüz çıkarılmayı bekleyen düşük tenörlü, zayıf kalitedeki cevherler; rezervlerin çoğunluğunu oluşturmaktadır. Ancak, düşük metal içerikli rezervlerin geleneksel teknikler kullanılarak işlenmesi, yüksek enerji ihtiyacı ve sermaye girdileri nedeniyle çok pahalıdır (Hosseini Nasab ve ark., 2021).

Bir diğer önemli sorun, bu teknolojilerin kullanılması ile açığa çıkan yüksek düzeydeki kirlilikten kaynaklanan çevresel maliyetlerdir.

Biyoteknoloji; pirometalürji veya kimyasal metalürji gibi geleneksel yöntemler ile karşılaştırıldığında, bu sorunlara en umut verici ve en devrimci çözümlerden biri olarak kabul edilmektedir. Sermaye maliyetlerini önemli ölçüde azaltırken, aynı zamanda çevre kirliliğini azaltma potansiyeline sahiptir. Biyolojik işlemler, genellikle toksik kimyasallar eklenmeden ılımlı koşullar altında gerçekleştirilir. Biyolojik süreçlerin ürünleri, gaz halindeki atıklara göre muhafaza ve arıtmaya daha uygun olan sulu çözeltilerdir (çelik, 2009).

Günümüzde endüstride kullanılan nikelin kaynağı sülfidik ve lateritik yataklardır. Sülfidik yataklar yüksek tenörlüken lateritik yataklar nikel açısından düşük tenöre sahiptir.

Dünyadaki karasal nikel rezervlerinin yaklaşık %70'ini sülfidik yataklar oluşturmaktadır (Asadrokt ve Zakeri, 2022). Öte yandan, uzun süreli mekanik ve kimyasal ayrışma işlemlerinin bir sonucu olarak oluşan nikel lateritler, dünyadaki yıllık nikel üretiminin ancak %40'a varan bir kısmını karşılamaktadır (Çetintaş, 2014., Huang ve Lv, 2011).

Yüksek tenörlü nikel sülfid cevherlerinin dünya çapındaki rezervleri, metale olan hızlı talep nedeniyle azalmaktadır. Yüksek tenörlü sülfid rezervlerinin hızla azalmasıyla birlikte, geleneksel metalurjik işlemlerle ekonomik olarak işlenemeyen düşük tenörlü nikel cevherleri giderek daha önemli nikel kaynakları haline gelmektedir (Sun ve ark., 2019).

Lateritik nikel cevherleri, nikel, kobalt, demir, silisyum, alüminyum ve krom gibi çeşitli elementleri içerir ve dolayısıyla alternatif bir nikel kaynağı oluşturmaktadır. Bu cevherler yüzeye yakın bulunduğundan ucuz açık ocak teknikleri ile kolayca çıkarılır (Moskalyk ve Alfantazi, 2002).

Geleneksel ekstraksiyon yöntemlerine bakıldığında, lateritik nikel cevherlerinin, sülfürik cevherlere kıyasla daha çok işletme maliyeti gerektirmesi ve düşük nikel kazanımı üreticileri sülfürik cevherlere yönlendirmektedir. Ancak, gün geçtikçe artan endüstriyel faaliyetlere bakıldığında nikel olan talep giderek artmaktadır. Bu sebeple son yıllarda nikel kaynağının çoğunluğunu oluşturan lateritik nikel cevherlerinin işlenmesi için alternatif yöntemler araştırılmakta ve geliştirilmektedir. Biyoliç uygulamaları bu alternatif yöntemler arasında ön plana çıkan süreçlerdir. (Meshkini ve Bayragh, 2022; Zhou ve ark.; 2019).

Düşük tenörlü metalin bulunduğu ve geleneksel tekniklerin verimli bir şekilde uygulanamadığı cevherlerde, biyoliç uygulamalarının büyük bir potansiyele sahip olduğu gösterilmiştir (Çelik, 2009; Sun ve ark., 2022).

Biyoliç terimi genel olarak, mikroorganizmaların etkisiyle metallerin çözünmesini ifade eder. Biyoliç yöntemiyle iki şekilde metal kazanımı elde edilir; (1) direk olarak hedef metalin çözünmesini sağlayarak, (2) biyooksidasyon ile minerallerin yapısını açarak; böylece minerallerin bir ön arıtma işlemine uygun olması ve diğer kimyasalların minerale daha iyi nüfuz etmesi ve metalin çözünürlüğünün artması sağlanır (Rawlings, 2005).

Nikel lateritlerinden nikel ekstraksiyonunda mikroorganizmaları kullanma girişiminde bulunan ilk araştırmalar, esas olarak heterotrofik mikroorganizmaların kullanımına odaklanmıştır. Bu mikroorganizmalar sitrik, laktik, oksalik, asetik, formik, malik, süksinik ve glutarik asitler gibi organik asitler salgırlar (Pawłowska ve Sadowski, 2017; Tang ve Valix, 2006;).

Ancak, heterotrofik organizmaların kullanımı, ticari ölçekli koşullar altında istenmeyen organizmalar tarafından olası kontaminasyon tehlikesi arz etmektedir. Ayrıca heterotrofik mikroorganizmaların gelişimi için büyük miktarda karbon kaynağına gereksinim vardır. Sonuç olarak bu yöntemler ticarileştirilememiştir (Rawlings, 2005).

Kemolitotrof bakterilerin laterit cevherlerde kullanımı ise yaygın olmamakla birlikte son yıllarda araştırmaların bu yönde yoğunlaştığı görülmektedir. Kemolitotrof mikroorganizmaların kullanıldığı biyoliç işlemlerinde sülfürik asit üretimi sağlanır ve üretilen asit ile cevherin mineral matriksinden metal iyonları salınır (Çelik, 2009).

1.1.Nikel

Nikel yerkabuğunun %0,008 kadarını oluşturan, çekirdeğin derin kısımlarında silis, demir, magnezyum ve oksijenden sonra en bol bulunan beşinci elementtir. Nikel mineralleri birçok jeolojik ortamda yatak ve kayaçların bileşimine girmektedir (Çetintaş, 2014). Hem kalkofildir (kükürt ile ortaktır), hem de siderofildir (demir ile ortaktır) (Lorand ve Luguët, 2016). Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü (MTA)'nın raporuna göre en önemli nikel mineralleri; kloantit (NiAs₂), pentlandit [(FeNi)S], nikelin (NiAs), millerit (NiS), anaberjit [Ni₃(AsO₄)₂8H₂O] ve garniyeritdir [(NiMg)₃Si₂O₅(OH)₄].



Garnierit



Anaberjit



Nikelin



Kloantit



Millerit



Pentlandit

Şekil 1.1. Önemli nikel minerallerine örnekler (MTA, 2018)

Nikel (Ni), atom numarası 28 ve atom kütlesi 58.6934, yoğunluğu 8,90 g/cm³, olan parlak, gümüşü beyaz bir metaldir. Elektronik konfigürasyonu [Ar] 3d⁸4s²'dir. Metalurjik avantajlarından bazıları arasında 1453°C'lik yüksek erime noktası, korozyona ve oksidasyona karşı yüksek direnç, iyi termal ve elektriksel iletkenlik, ferromanyetik özellikler, katalitik davranış, elektrokaplama kolaylığı ve yüksek sıcaklıklarda mükemmel güç ve tokluk sayılabilir (Pechlivani, 2013).

Nikel hem sülfür hem de laterit (oksit) cevherlerinden çıkarılır. Nihai ürünleri katot, toz, briket ve pelet şeklinde mevcuttur. Diğer ürünler ferronikel ve nikel kimyasallarıdır.

Nikelin ana pazarları, paslanmaz çelik, demir dışı alaşımlar, inşaat endüstrilerinde, çatal bıçak takımlarında, havacılıkta ve askeri uygulamalarda kullanılan alaşımlardır.

Nikel ayrıca pillerde, yakıt hücrelerinde ve madeni paralarda da kullanılır. Ek olarak, nikel alaşımları kimya, petrokimya ve enerji endüstrilerinde önemli bir hammaddedir. (Nasuh, 2014).

1.2. Nikelin Kullanım Alanları

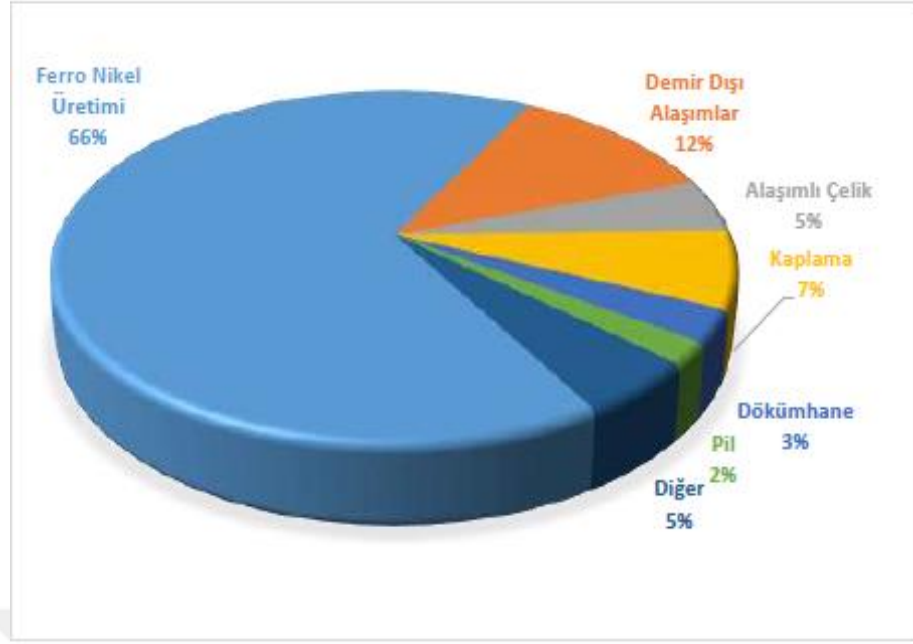
Nikel içeren malzemeler modern teknolojiye 200 yıldan fazla süredir önemli bir yer edinmiştir. Nikel sahip olduğu nitelikler sayesinde endüstride gerek metal alaşımları, gerekse de paslanmaz çelik olarak kullanılabilir. Ticari olarak %99,5 saflıkta dökülmüş ve dövülmüş haldeki nikel, yüksek korozyon direnciyle, ayrıca mukavemet, yüksek süneklik, elektrik ve ısı iletkenliği özelliklerinden dolayı endüstride geniş ve önemli bir kullanıma sahiptir. Nikel alaşımları kostik çözeltilerin taşınması ve muhafazasında, petrol endüstrisinde, hastane ve ev aletlerinin yapımında, gemi ve uçak endüstrisinde, yapı malzemelerinde, elektrikli makinelerin parçalarında, yakıt hücrelerinde, tekrar şarj edilebilir bataryalar, madeni paralalar, magnetler, cerrahi kablolar ve enstrüman tellerinde kullanılmaktadırlar (Keskin, 2019).

Nikel kullanımı son 30 yılda birincil olarak paslanmaz çelik endüstrisi üzerine yoğunlaşmıştır. Nikelin yüksek korozyona dayanımı onun pek çok kullanım alanına sahip olmasını sağlayan temel özelliğidir. Bu yüzden denizcilik uygulamalarında, yağ, gaz, güç endüstrisinde ve kimyasal sanayide %7 Ni içeren paslanmaz çelikler kullanılır. Ayrıca evlerde kullanılan mutfak eşyaları paslanmaz çeliğin en geniş kullanım alanlarından biridir (Çoban, 2014).

Bir başka örnek olarak deniz suyuna temas eden yüzeylerde bakır-nikel alaşımları kullanılır. Ayrıca nikelin elektrolitik olarak kaplanması da önemli kullanım alanlarından. Diğer metallerin üzerine nikel kaplama yapılarak uzun süreli korozyona dayanıklılık özelliği kazandırılır. Bu anlamda nikelin en büyük kullanım alanları paslanmaz çelik ve kaplamalardır.

Nikelin kullanıldığı alanlardan biri de uzay ve havacılık sektörüdür. Yüksek sıcaklıklarda mukavemet gösterme özelliği sayesinde jet motorlarında nikel süper alaşımları kullanılmaktadır. Bu alan nikel kullanımının %11'ini oluşturmaktadır.

Nikel ve alaşımları yüksek hidrojen absorbe edebilme özelliğinden dolayı elektronik eşyalarda, özellikle taşınabilir bilgisayarların ve telefonların tekrar şarj edilebilir bataryalarında kullanılmaktadır. Ayrıca elektromanyetik özelliğinden dolayı transformatörlerde, antenlerde nikel kullanılmaktadır. Nikel oksitler yakıt pillerinde elektrot olarak kullanılmaktadır. Şekil 1.2.'de nikel kullanım alanlarının dağılımı verilmiştir.



Şekil 1.2. Nikel Kullanım Alanlarının Dağılım Grafiği (Çoban, 2014).

1.3. Dünyada ve Türkiye’de Nikel Rezervleri

Dünyada bilinen en önemli nikel yatakları; Avustralya, Brezilya, Rusya, Yeni Kaledonya Adaları, Küba, Filipinler ve Endonezya’da bulunmaktadır (MTA, 2018).

Amerika Birleşik Devletleri Jeoloji Araştırmaları (USGS) 2025 raporundaki verilere göre 2024 yılındaki nikel üretimine baktığımızda Endonezya 2,200,000 Mton ile 1.sırada yer almaktadır. Filipinler, Rusya, Yeni Kaledonya ve Avustralya Endonezya’yı takip eden ilk 5 ülkedir. Çizelge1.1.’de 2023 ve 2024 yıllarındaki dünyadaki nikel üretim verileri gösterilmiştir.

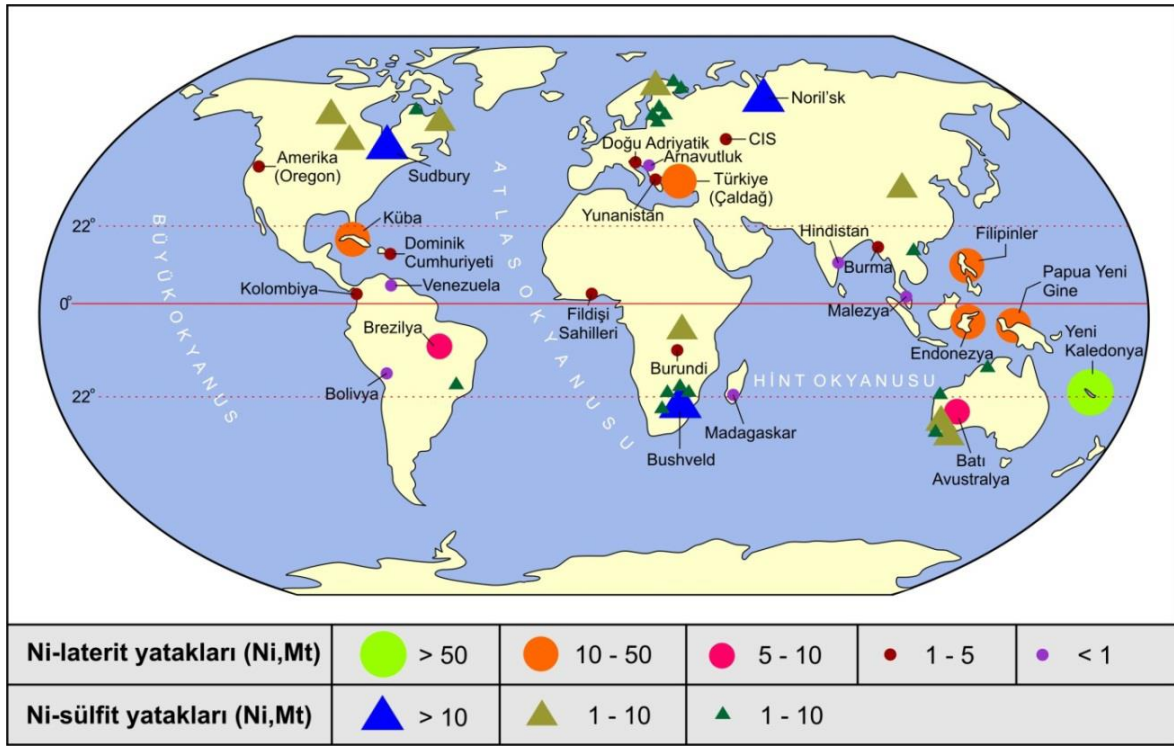
Dünya metal nikel rezervinin toplamı 130 milyon ton görünür ve muhtemel rezerv toplamı ise 350 milyon tondur. Çizelge1.2.’de dünya rezervi dağılımı verilmiştir. Sülfidik ve lateritik nikel yataklarının dünyadaki dağılımı Şekil 1.3.’te verilmiştir.

Çizelge1.1. Dünyada nikel cevheri üretimi (USGS, 2025)

Ülke	2023	2024
Amerika Birleşik Devletleri	16,400	8,000
Avusturalya	149,000	110,000
Brezilya	82,700	77,000
Kanada	159,000	190,000
Çin	117,000	120,000
Endonezya	2,030,000	2,200,000
Yeni Kaledonya	231,000	110,000
Filipinler	413,000	330,000
Rusya	210,000	210,000
Diğer Ülkeler	340,000	300,000

Çizelge1.2.Dünya nikel rezervi dağılımı (USGS, 2025)

Ülke	2024 Yılı Nikel rezervi (Mton)
Amerika Birleşik Devletleri	340,000
Avusturalya	24,000,000
Brezilya	16,000,000
Kanada	2,200,000
Çin	4,400,000
Endonezya	55,000,000
Yeni Kaledonya	7,100,000
Filipinler	4,800,000
Rusya	8,300,000
Diğer Ülkeler	>9,100,000
Toplam	>130,000,000



Şekil 1.3. Sülfitik ve Lateritik Nikel Yataklarının Dünyadaki Dağılımı (MTA, 2018).

Ülkemizde hem lateritik hem de sülfitik nikel yatakları mevcuttur (Çizelge 1.3) MTA (Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü)'nin maden arama faaliyetleri sonucunda sülfitik ve lateritik tip cevher varlığı tespit edilmiştir. Yapılan araştırmalar sonucu Manisa ve Eskişehir illerinde en büyük nikel rezervleri tespit edilmiştir. Bu rezervler Manisa-Gördes, Manisa-Turgutlu-Çaldağ, ve Eskişehir-Mihalıççık-Yunus Emre yörelerine bulunur. Ayrıca; Sivas-Divriği-Gümüş, Bitlis-Pancarlı,Uşak-Banaz, Bursa-Orhaneli-Yapköydere, Hatay-Payas-Dörtyol ve Bolu-Mudurnu-Akcaalan'da nikel yatakları tespit edilmiştir (Çiftçi ve Atik, 2014).

Ekonomik değere sahip işletilebilir nikel rezervleri Manisa ve Eskişehir'deki madenlerdir. Bahsi geçen diğer yörelerdeki cevherler düşük tenörlü olduklarından işletilmeleri mevcut şartlarda ekonomik değildir. İşletilmekte olan yataklarda tüvenan (ham) cevherden nikel saflaştırmak için zenginleştirme tesisleri kurulmuştur. 2000'li yıllarla nikel fiyatlarının hızla yükselmesiyle özel sektör girişimleri başlamış ve nikel madenciliğinde hareketlenme olmuştur. Ülkemizde de nikel madenciliği birkaç özel firma tarafından yapılmaktadır. 40 milyon ton nikel cevheri rezervi olduğu bilinmekle beraber, bu rezervin büyük çoğunluğunu 30 milyon ton cevher rezervi ile Manisa-Çaldağ sahası oluşturmaktadır. Çaldağ yöresinde 29,7 milyon ton ham cevher mevcuttur. Bu sahada ortalama %0,07 tenörlü kobalt, %21,66 tenörlü demir ve %1,16 tenörlü nikel rezervi bulunmaktadır. Çaldağ Nikel A.Ş. tarafından açık ocak işletimi uygulanmakta ve 20 yıl boyunca üretim faaliyetlerinin devam edeceği öngörülmektedir. Sahadaki nikel rezervi 400 bin tondur. Hem Manisa-Çaldağ hem Manisa-Gördes' te bulunan nikel yatağı lateritik yataklar olup, Gördes'teki cevher %1 nikel tenörlüdür ve

300 bin ton civarında metal nikel rezervi bulundurulur. Bu saha Meta Nikel Kobalt A.Ş. tarafından işletilmektedir. Zenginleştirme tesislerinde hidrometalurjik yöntemler uygulanarak yüksek basınçlı liç gerçekleştirilmektedir. Bu tesiste 2016 yılından itibaren ticari üretim yapılmaya başlanmıştır ve üretilen nikel ihraç edilmektedir. Bu firmanın, Uşak ve Eskişehir illerinde de nikel-kobalt yatırım projelerinin yanı sıra farklı bölgelerde de arama ve rezerv geliştirme ön çalışmaları devam etmektedir. Eskişehir-Mihalıççık-Yunus Emre yöresindeki nikel cevheri sahası %1 oranında nikel içermektedir. Bu saha Fe-Ni Madencilik Limited Şirketi tarafından işletilmekte, çıkarılan demir ve nikel yurtdışına ham cevher olarak ihraç edilmektedir (MTA,2018).

Çizelge1.3.Türkiye’de bulunan nikel rezerv alanları (Korkut, 2022)

SAHA	CEVHER TİPİ
Manisa-Turgutlu-Çaldağ	Lateritik
Manisa-Gördes	
Eskişehir-Mihalıççık-Yunus Emre	
Uşak-Banaz	
Bolu-Mudurnu-Akçaalan	
Hatay-Payas-Dörtyol	
Bitlis-Pancarlı	Sülfitik
Bursa-Orhaneli-Yapköydere	
Sivas-Divriği-Güneş	

1.4. Sülfitik ve Lateritik Nikel Yatakları

Çıkarılan nikelin büyük kısmı iki tür cevher yatağından gelir; lateritik cevherler ve sülfürlü cevherler. Bu iki cevherin her ikisi de ekonomik öneme sahiptir. Nikelin oluştuğu diğer iki yatak, hidrotermal yataklar ve deniz tabanındaki manganez nodülleridir (Göktaş, 2007).

1.4.1. Sülfitik Nikel Yatakları

Sülfitik nikel yatakları bazik magmatik ve ultra bazik kayalardan gelişir. Bu ultramafik kayalar magnezyum ve demirce zengindir. Sülfürlü cevherlerde nikel; demir, kobalt ve bakır gibi değerli metallere birlikte bulunur. Nikel çoğunlukla kalkopirit ($CuFeS_2$) ve pirotinle ($Fe_{1-x}S$) birlikte bulunan pentlandit minerallerinin içeriğinde bulunmaktadır. Ayrıca, bu tip yataklarda platin ve bakır içeren minerallere de rastlanır (Çoban, 2014).

1.4.2. Lateritik Nikel Yatakları

Lateritler; karadaki nikel kaynaklarının yaklaşık %70' ini temsil eder, çoğunluğu tropikal ile subtropikal iklimlerde bulunur (Stankovic ve ark., 2020; Watling, 2007).

Laterit yataklar bulunduğu coğrafi bölgeye göre önemli mineralojik farklılıklar gösterir (Krause ve ark.,1998). Lateritik tortular genellikle yüzeye çok yakın bulunur (yaşa ve ayrışma derecesine göre tipik olarak 50 m'den daha az derinlikte), bu nedenle ucuz açık ocak teknikleriyle kolayca çıkarılırlar.

Nikel lateritler, dünya yüzeyinde ultramafik kayaların uzun süreli mekanik ve kimyasal ayrışmasının artık ürünleridir. Su varlığında kararsız olan çeşitli orijinal mineraller çözünür veya parçalanır böylece ortamda daha kararlı olan yeni mineraller oluşur. Bunun sonucunda ana kayadaki nikel ve kobalt içeriği 3 ile 30 kat artmış olur.

Nikel lateritler mineralojisine göre oksit yatağı, kil silikat yatağı ve hidro silikat yatağı olarak sınıflandırılır (Elias, 2002). Ferronikel limonit ((Fe,Ni)O(OH).nH₂O), ortalama %1.0-1.6 nikel tenörlü götitten oluşan oksit yatağıdır.

Hidro silikat yataklarına hidro magnezyum-nikel silikatların karışık bir yapısı hakimdir ve garnierit, ((Ni,Mg)SiO₃.nH₂O), olarak bilinir. En yüksek küresel nikel tenörleri ortalama %1,8-2,5 dur. Kil silikat yatağı, ortalama %1,0-1,5 nikel tenörlü nontronittir (Gleeson ve ark., 2003).

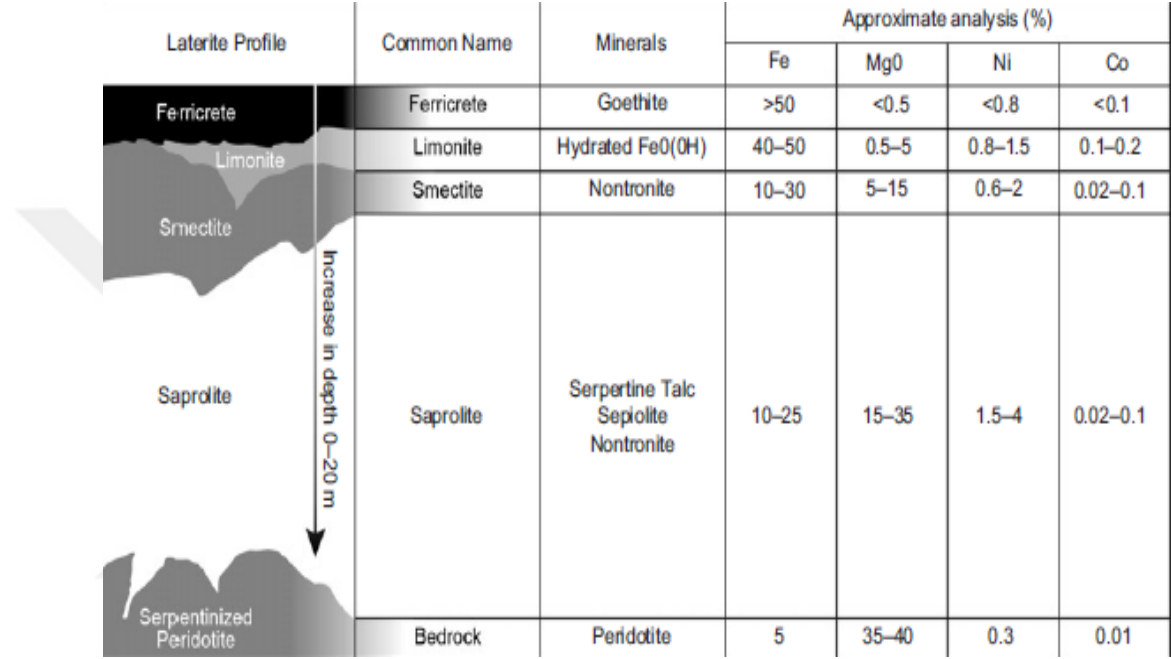
Laterit yataklar, peridotit gibi bazı ana kayaların bozunması ile oluşurlar. Peridotit çok az piroksen (Mg,Fe)₂Si₂O₆ ve olivin (Mg,Fe)₂SiO₄ içermektedir (Thorne ve ark., 2012). Bozunmanın etkisiyle kademeli olarak cevher içindeki magnezyum içeriği azalır ve bozunum devam ettikçe demir içeriği artar (Butt ve Cluzel., 2013). Mineral içeren su bozunmuş kayaç boyunca ilerleyerek sızar. Bu süreçte magnezyum, silika, demir ve nikel su içerisinde çözünür. Yatağın yukarısına doğru, hava ile oksitlenen demir, götit gibi hidratlı demir oksit formunda çöker. Genellikle nikel ve kobalt da demir ile birlikte çöker.

Bu tarz laterit yatak zonları için "Limonit" terimi kullanılır. Ferrözdemir oksitlenir ve kristal ferik hidroksitler daha çok götit (α -FeOOH) ve azınlıkla hematit (α -Fe₂O₃) olarak çökerler (Thorne ve ark., 2012). Magnezyum ve silika, ana kayaya yakın çökerek serpentin Mg₃Si₂O₅(OH)₄ gibi magnezyum silikatlarını oluşturur. Bu tabakaya sıklıkla "saprolit" denilmektedir (König, 2021). Saprolit: ana kayanın en aşağıdaki tabakasını ifade eder. Çoğunlukla serpentin ve hidratlı magnezyum silikattan Mg₃Si₂O₅(OH)₄ oluşmuştur. Bu tabakada nikel, magnezyumun yerini alarak garniyeriti (Mg,Ni)₃Si₂O₅(OH)₄ oluşturur (Butt ve Cluzel., 2013).

Killer, limonit ya da saprolit tabakaların da olmalarının yanında, saprolitin yukarısında yetersiz drene olmuş, geçiş bölgesi diyebileceğimiz kısımda bulunur. Bu tabaka saprolit/garnierit ve nontronit (Na_{0,3}Fe₂(Si,Al)₄O₁₀(OH)₂.nH₂O) gibi bazı kil minerallerini içerir. Bu bölgede nikel nontronit ile birleşik olarak bulunur.

Ana kayadan limonit zona ilerledikçe, silisyum kısmen uzaklaşır, magnezyum giderek azalırken demir oranı giderek artar. Sonuçta nontronit ve alüminosilikatlar en aşağı tabakada, limonit

(FeOOH) bu profilin daha yukarı aşağı kısmında baskın hale gelir ve sarı limonit bölgesi olarak adlandırılır. Daha fazla magnezyum elimine oldukça demir artar ve yüksek demirli kırmızı limonit bölgesi oluşur. En üst yüzeyde yapıyı erozyondan koruyan sert demirli dış tabaka oluşabilir, bu tabaka Ferrikret, olarak adlandırılır ve nikel - kobalt seviyesi ticari seviyenin oldukça altındadır. Her lateritik cevher aynı profile olmayabilir. Cevher tabakaları bulunduğu bölgeye göre değişebilir; tabakaların tamamı gözlenmeyebilir ya da birbiri içine karışmış olabilir (König, 2021). Şekil 1.4.'de laterit nikel yatağının profili gösterilmiştir.



Şekil 1.4. Lateritik Nikel Yataklarındaki Tabakalaşma ve Mineral Dağılımı (Parlak, 2017)

Sülfür cevherlerinin nikel tenörü tipik olarak %1-4 arasında değişir. Lateritler ve sülfürün işlenmesi arasındaki en büyük fark, sülfürün eritilebilen ve yüksek tenörlü konsantrasyonlar üreten flotasyon ve manyetik ayırma gibi zenginleştirme işlemlerine uygun olmasıdır. Bunun nedeni, sülfür cevherlerinde, nikelin mineraller boyunca dağıldığı lateritlerin aksine, nikelin çoğunun sülfür minerallerinde yoğunlaşmasıdır. En yaygın nikel sülfür minerali, nikel üretiminin yaklaşık %75'ini oluşturan pentlandit((Fe, Ni)₉S₈) mineralidir (Giaveno ve Donati, 2001; Pillay, 2015).

Sülfür ve lateritik cevherlerde bulunan nikel kaynağı bazı mineraller Çizelge 1.4.'de verilmiştir.

Çizelge 1.4. Nikel cevherlerinde bulunan bazı minareller (Abalı ve ark., 2020)

Cevher Yatak tipi	Mineral İsmi	Mineral formülü
Sülfürlü yatak	Pentlandit	$(Fe,Ni)_9S_8$
	Millerit	NiS
	Heazlewoodit	Ni_3S_2
	Gersdorffit	$NiAsS$
	Nikelin	$NiAs$
	Awaruit	$Ni_2Fe - Ni_3Fe \{Ni_{2,5}Fe\}$
	Violarit	$FeNi_2S_4$
	Bravoit	$(Fe,Ni,Co)S_2$
	Haapalait	$2(Fe,Ni)S \cdot 1,6(Mg,Fe)(OH)_2$
	Annabergit	$Ni_3(AsO_4)_2 \cdot 8(H_2O)$
Lateritik Yatak	Olivin	$(Mg,Fe)_2SiO_4$
	Ortopiroksen	$(Mg,Fe) SiO_3$
	Serpantin	$Mg_3Si_2O_5(OH)_4$
	Nikelli serpantin	$(Mg,Fe,Ni)_3Si_2O_5(OH)_4$
	Garniyerit	$(NiMg)_3Si_2O_5(OH)_4$
	Nontronit	$Na_{0,3}Fe_2(Si,Al)_4O_{10}(OH)_2 \cdot nH_2O$
	Kuvars	SiO_2
	Götüt	$FeOOH$
	Asbolan (lithioporit, kriptomelan)	Mn, Fe, Co, Ni oksit

1.5. Lateritik Nikel Cevherlerinden Nikel Ekstraksiyon Yöntemleri

Laterit cevherler sülfür cevherlerinin aksine mineralojik ve kimyasal olarak karmaşıktır, bu da onların işlenmesini daha karmaşık ve pahalı hale getirir. Nikel, lateritik cevherlerde diğer minerallerin küçük bir bileşeni olarak bulunur, bu nedenle laterit cevherlerinden nikel üretmek için büyük miktarda cevherin işlenmesi gerekir (Elias, 2002). Bilinen herhangi bir geleneksel zenginleştirme yöntemi nikeli konsantre etmeye uygun değildir (Stankovic ve ark., 2024; Valix ve ark., 2001).

Lateritlerinden nikel kazanımı şu anda geleneksel pirometalurjik ve hidrometalurjik yöntemlerle yapılmaktadır. Prosesinin seçimi mineralojideki farklılığa bağlı olarak değişmektedir. Bu nedenle nikel laterit cevherlerinin üç sınıfı da işleme gereklilikleri ve ekonomik değer açısından farklılık gösterir (Gleeson ve ark., 2003; Oxley ve ark., 2016).

Birincil gang elementleri olan demir, silika ve magnezya (magnezyum oksit) konsantrasyonu en uygun arıtma sürecini belirler. Örneğin, ergitme cüruf oluşturmak için bir miktar magnezya gerektirir. Bu nedenle, düşük magnezya ve yüksek demir içeriğine sahip limonitin işlenmesi için uygun bir yöntem değildir. Asit liçi ise; aşırı asit tüketimine sebep olduğu için yüksek magnezya seviyelerine sahip cevherlerde uygulanmaz (Taylor, 1997; Watling ve ark., 2014).

Başka bir deyişle, ergitmede, beslemedeki silikanın magnezyuma oranı, ergiyik sıcaklıklarının ve cüruf reaktivitesinin ve viskozitesinin kontrolünde kritik öneme sahiptir. Pirometalurjik işlemeye uygun olana (örneğin saprolit ve garnierit) kıyasla hidrometalurjik işlemeye uygun (örneğin limonit, nontronit/smektit) neredeyse iki kat daha fazla laterit kaynağı vardır (Elias, 2002). Hidrometalurjik işlemeye daha uygun olan, düşük nikel içeriğine sahip laterit cevherlerin daha fazla olması, gelecekteki tesislerin daha ucuz ve çevre dostu işleme yöntemlerine odaklanması gerektiğini göstermektedir (Meshkini ve Bayragh, 2022).

1.5.1. Pirometalurjik Yöntemler

Bu yöntem, nikel açısından daha zengin silikat fraksiyonunu işler. Ekonomik bir proje için minimum %1,7 Ni (düşük enerji maliyeti ile) veya %2,1 Ni (yüksek enerji maliyeti ile) gereklidir (Dalvi ve ark., 2004). Uygulamadaki iki süreç, ferronikel ergitme ve mat ergitmedir.

Nikel mat üretimi, 1,8 ile 2,2 SiO₂/MgO oranı aralığında düşük ergime noktalı cüruf için uygundur; ferronikel ise >2 veya <2,5 SiO₂/MgO oranı aralığındaki yüksek ergime noktalı cüruf için uygundur (Dalvi ve ark., 2004).

Bu proses, cevherin kurutulmasını, bir döner fırında kalsinasyonunu/indirgenmesini ve karbon ve/veya kükürt mevcudiyetinde elektrikli fırınlarda ergitilmesini içeren yüksek enerji gerektiren bir prosesdir. Ferronikel (indirgenmiş Fe-Ni alaşımı) doğrudan paslanmaz çelik üretimi için kullanılabilir. Ham metal veya mat, daha ileri işlemler için geleneksel sülfid prosesine katılabilir veya nihai ürünü üretmek için rafine edilebilir (Dalvi ve ark., 2004).

1.5.2. Hidrometalurjik Yöntemler

Operasyonda olan, pilot aşamasında olan veya değerlendirilen bir dizi hidrometalurjik süreç vardır. En yaygın olan prosesler aşağıda açıklanmıştır (Şekil 1.5).

Yüksek basınç asit liçi (YBAL)

Bu proses, cevherin yüksek basınçta (4500 kPa) ve yüksek sıcaklıklarda (250°C) otoklavda yıkanmasını içerir. Limonitik lateritler, düşük magnezyum ve silika içeriği ve dolayısıyla düşük asit tüketimi nedeniyle bu işlem için idealdir (Georgiou ve Papangelakis, 1998; Smith ve ark., 2017).

Magnezyum ve alüminyum güçlü asit tüketicileridir ve yüksek seviyelerde alüminyum otoklavda alünit ((H₃O)Al₃(SO₄)₂(OH)₆) oluşumuna neden olabilir. Ekonomik bir proje için minimum tenör gereksinimi %1,3 Ni'dir (Dalvi ve diğerleri, 2004).

Kilimsi lateritlerde, bulamaçlarda ve kilin parçalanmasıyla salınan çözeltilerde koloidal silika varlığı, YBAL'de kullanılırsa yüksek basınçlı pompalama ve katı-sıvı ayırımı ile ilgili sorunlara neden olabilir (Elias, 2002).

YBAL prosesi demir ve alüminyum ekstraksiyonunu en aza indirirken yüksek seviyelerde nikel ve kobalt çıkarmada başarılı olduğu kanıtlanmıştır. Ayrıca, YBAL prosesinin düzgün çalışması gelişmiş ekipman, yüksek derecede proses kontrolü ve uzmanlık gerektirir (Dalvi ve ark., 2004).

Korozyona dirençli titanyum kaplı otoklav gerektirdiği için ilk yatırım maliyeti yüksektir. Buna rağmen proseste nikelin ve demirin kobalta karşı seçimli olarak çözünmesi ve yüksek verimde nikel eldesi (%90 ve üzerinde) nedeniyle diğer proseslere karşı tercih edilmektedir. Aşağıda anlatılan Caron prosesine kıyasla daha az enerji gerektirir ayrıca atmosferik asit liçiyile kıyaslandığında daha az asit tüketimi gerektirir. Dünyada yüksek basınç sülfürik asit liçi üzerine çalışan tesisler Moa Bay (Küba), MurrinMurrin (Avustralya), Ravensthorpe (Avustralya), Coral Bay (Filipinler) ve Goro (YeniKaledonya)'da bulunmaktadır (Çoban,2014). Manisa-Gördes'teki (Türkiye) tesiste de bu yöntem kullanılmaktadır (MTA, 2018).

Bu prosesin genel akım şemasına baktığımızda, ham cevher otoklavlarda genel olarak 0,2-0,5 asit/cevher oranında 75-120 dakika liç süresince, 3,3-5,5 MPa basınç altında 250°C sıcaklıkta liç işlemine tabi tutulmakta ve beslemedeki nikel ile kobaltın %90'dan fazlası çözelti fazına alınmaktadır. Katı/sıvı ayırımını takiben yüklü çözeltiden nikel ile kobalt ayrılmakta ve saflaştırılarak elde edilmektedir (Çoban, 2014).

Caron Prosesi

Bu proses yüksek demirli limonitik cevherleri veya limonit ve saprolit karışımı cevherleri işlemek için kullanılabilir. Ancak fazla silis nikel geri kazanımını azaltır (Elias, 2002). İşlem, indirgeyici bir atmosferde kurutma ve kavurmayı, ardından düşük basınçlı amonyak liçini içerir (Gleeson ve ark., 2003).

Bu proses ilk defa 1924 yılında Martinus Hendricus Caron tarafından uygulanmıştır. Caron prosesinde hidrometalurjik ve pirometalurjik yöntemler birlikte uygulanmaktadır. Ham cevher öncelikle kurutulur, daha sonra yaklaşık 700°C fırınlarda, indirgen gaz ortamında (CO, CO+CO₂ veya CO+H₂) nikel, kobalt ve demir metalik hale indirgenir. Oluşan kütle 200°C'nin altına kontrollü olarak soğutularak tekrar oksitlenme engellenmektedir. Daha sonra metaller, amonyum (karbonat-amonyak) özeltisi ile çözelti fazına alınmaktadır. Katı-sıvı ayırımından sonra liç çözeltisinin

kaynatılarak amonyak uzaklaştırılır ve bazik nikel karbonatın çökmesi sağlanır. çökelti ise 1200°C’de kalsine edilerek nikel oksite dönüştürülmektedir. Bu yöntemle daha yüksek magnezyum içerikli cevherler işlenebilmekte ancak yüksek basınç liçine kıyasla daha maliyetli oluşu ve daha düşük Ni kazanım (%60-80) sebebiyle daha az tercih edilmektedir. Dünyada Caron prosesine yönelik tesisler, PuntaGorda (Küba), Nicaro (Küba), Yabulu (Avustralya) ve Tocantins (Brezilya)’te bulunmaktadır (Nasuh, 2014).

Atmosferik Asit Liçi

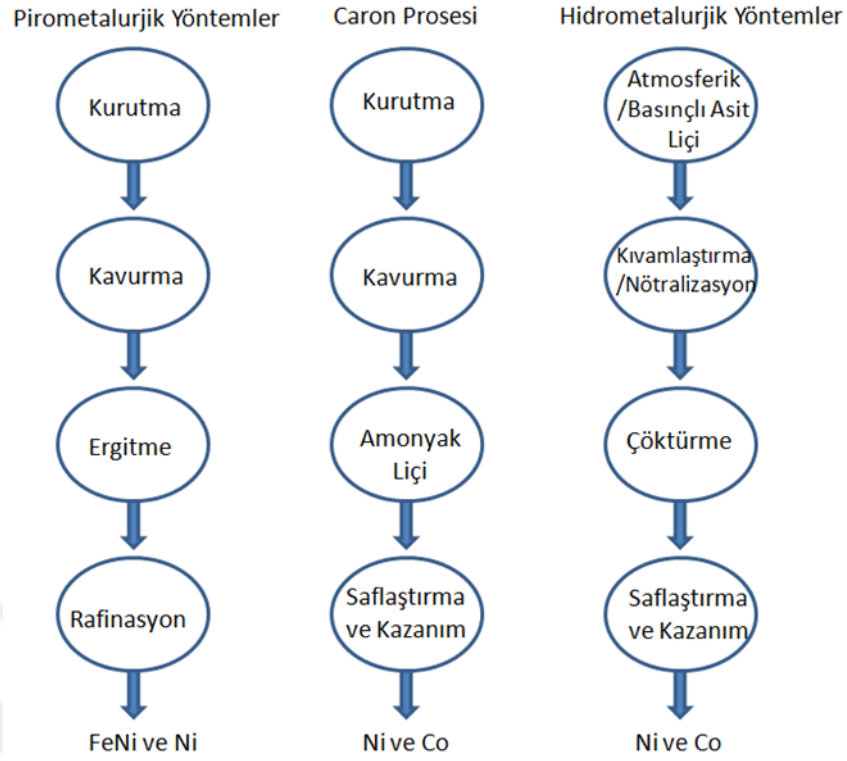
Bu yöntem saprolitik ve limonitik cevherler için kullanılmaktadır. Lateritlerin atmosferik basınçta liçi karıştırmalı ve yığın liçi olarak 2’ye ayrılır. Her iki yöntemde de genellikle sülfürik asit olmak üzere inorganik ve organik asit altında 100-110°C’ye kadar sıcaklıkta ve normal basınç altında çözündürme gerçekleştirilir.

Asit tüketimi her ton başına 700-1100 kg aralığındadır. Metal kazanım değerleri ise %60-90 nikel ve %20-50 kobalt arasında değişmektedir.

Yığın liçinde liç süresi en az birkaç ay devam etmektedir. %85’e kadar nikel kazanımı yapılabilir. Bu proseste ham cevher kırıldıktan sonra geçirimsiz bir yüzey üzerine birkaç metre olacak şekilde yığılır, daha sonra damlatma yöntemiyle sülfürik asit uygulanarak nikel çözeltiliye alınır (Agatzini-Leonardou ve ark., 2009).

Karıştırmalı liçte yığın liçine göre daha kısa sürelerde liç işlemi tamamlanmaktadır. Bu yöntemde öğütülen cevher manyetik karıştırıcı tanklara alınır ve sülfürik asit ile çözündürülür. Sürekli karıştırma yapıldığından ve öğütülmüş cevherin yüzey alanının artmasından dolayı reaksiyon daha çabuk gerçekleşir.

Atmosferik asit liçinin, magnezyum içeriği yüksek saprolitik cevherlerin değerlendirilebilmesi, yüksek maliyetli otoklavlara ihtiyaç duymaması, yüksek verimde metal elde edilebilmesi gibi avantajları vardır. Ancak bu liç yönteminin en büyük dezavantajı nikel ve kobaltın yanında yüksek oranlarda demirinde çözeltiliye geçmesidir. Çözeltiliye geçirilen nikel ve kobalt dışındaki Fe, Al, Cr, Mn ve Mg gibi kirleticiler daha sonra bu elementlerin çöktürülmesi ve/veya nikel ve kobaltın çözeltiliden ayrılması ile giderilerek nikel ve kobalt saflaştırılmaktadır. Manisa-Çaldağ’da sülfürik asitin kullanıldığı yığın liçi yöntemi pilot ölçekte uygulanmıştır (Nasuh, 2014).



Şekil 1.5. Nikel Kazanımında Kullanılan Yöntemler

1.6. Biyoliç

Yüksek dereceli ve kolaylıkla işletilebilen mineral yataklar giderek azalmaktadır. Düşük dereceli metalik değeri işlemek ve geri kazanmak için biyoteknolojiyi kullanmak, metal endüstrisi üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Son yıllarda **biyoliç**, madencilik ve mineral endüstrisinde ön plana çıkmaktadır (Çelik, 2009).

Biyoliç, mikroorganizmaların aktivitesi yardımıyla mineral, konsantre ve atıklardan metallerin çözüldürülerek elde edilmesi işlemidir.

Biyoliç işleminin alternatif bir yöntem olarak tercih edilmesi;

***çevre dostu olması,**

***düşük operasyon maliyeti,**

***kolay uygulanabilirliği ve**

***düşük tenörlü cevherlere uygulanabilmesinden kaynaklıdır** (Hosseini Nasab ve ark., 2020; Yang ve ark., 2019).

1.6.1. Biyoliç Uygulamasında Kullanılan Mikroorganizmalar

Metal ekstraksiyonu ile ilgili biyohidrometalurjik işlemlerde önemli olan mikroorganizmalar, beslenme gereksinimlerine göre, kemolitotrofik ve heterotrofik mikroorganizmalar olmak üzere iki gruba ayrılabilir.

Kemolitotrof Mikroorganizmalar

Bakteriyel liçte yer alan kemolitotrofik bakteriler arasında, asidofilik, demir veya kükürt oksitleyici mikroorganizmalar en çok çalışılan ve ticari uygulamalarda en çok kullanılan mikroorganizmalardır (Rawlings, 2005).

Acidithiobacillus ferrooxidans (*At. ferrooxidans*), *At. caldus*, *At. thiooxidans* ve *Leptospirillum ferrooxidans* bakterileri biyoliç uygulamalarında yaygın olarak kullanılan asidofilik (optimum gelişimi pH 3.0'ün altında gösteririler) mikroorganizmalardır (Vardanyan ve ark., 2015).

At. ferrooxidans.

Bu mikroorganizma ilk defa 1950'de Colmer ve ark. tarafından bitümlü kömür madeninin atık drenaj suyundan izole edilmiştir. Bu mikroorganizmanın asidofilik, ototrofik demir oksitleyici bir bakteri olduğunu saptanmış ve 1951'de *Thiobacillus ferrooxidans* olarak adlandırmışlardır. Daha sonra Kelly ve Wood, tarafından 2000 yılında *At. ferrooxidans* olarak yeniden adlandırılmıştır (Ehrlich, 2004).

Bu bakteri, hareketli, spor yapmayan, gram negatif, çubuk şeklinde 0,3-0,5x1,0-1,7µm boyutundadır (Karavaiko ve ark., 2006) ve inorganik mineral ortamında üreyebilecek ideal bir fizyolojiye sahiptir (Mason ve Rice, 2002). Tek bir polar flagellum vasıtasıyla hareket eder (Jensen ve Webb, 1995). Tek karbon kaynağı olarak CO₂ kullanarak ürer ve ferröz demir iyonunun oksidasyonunun yanı sıra kükürt ve indirgenmiş kükürt bileşiklerinin oksidasyonundan enerji elde eder. Ayrıca anaerobik koşullarda bakteri, terminal elektron alıcısı olarak ferrik demir ve elektron vericileri olarak indirgenmiş kükürt veya metal sülfürleri kullanabilir (Campodonico ve ark., 2016; Hallberg ve ark., 2011).

Heteretrof Mikroorganizmalar

Hem bakteri hem de mantar türleri dahil olmak üzere birçok heterotrofik mikroorganizma, özellikle oksidik, silisli veya karbonlu materyalleri liç yetenekleriyle bilinir. Heterotrofik mikroorganizmalar, düşük dereceli nikel lateritlerden nikeli geri kazanma arayışında da incelenmiştir (Valix ve ark, 2001, Tang ve Valix, 2006). Bu mikroorganizmalar, ototrofların aksine, enerjilerini ve besinlerini elde etmek için biyokütleyle ihtiyaç duyarlar.

Heterotroflar, ototrofların biyolojik ürünlerine mutlak bir bağımlılığa sahiptir. Bunun nedeni, büyümek için karbonlarını yalnızca ototroflar tarafından üretilen organik maddelerle beslenerek elde etmeleridir. Birçok bakteri ve fungus cinsi (*Bacillus*, *Pseudomonas*, *Cyanobacteria*, *Aspergillus*, *Penicillium*, *Rhizopus*, *Streptomyces* vb.) biyoliç işleminde kullanılır (Mishra, 2007). *Aspergillus* ve *Penicillium* küfleri biyoliç uygulamalarında yaygın olarak çalışılan iki heterotrofik mikroorganizmadır.

Bu suşların etkinliğinin hidroksikarboksilik asitlere, özellikle sitrik asit üretme yeteneklerine bağlı olduğu bulunmuştur. Üretilen asitler genellikle pH'yı düşürerek metal çözünmesini artırma ve

çözünebilir organik-metalik kompleksler halinde şelatlama yoluyla çözünür metallerin yükünü arttırma gibi ikili etkilere sahiptir (Sajjad ve ark., 2019).

Nikel lateritlerin dışında, çinko cevherlerinin biyoliçinde spodumenden $[LiAl(SiO_3)_2]$ lityum ekstraksiyonunda, kuvars kumlarının işlenmesinde heterotrofik mikroorganizmaların kullanımı test edilmiştir. Kalsiyum ve demiri uzaklaştırmak için boksitin biyolojik olarak zenginleştirilmesi (Vasan ve ark., 2001) ve düşük dereceli boksit cevherinden alüminyumun geri kazanılması gibi uygulamalarda kullanımları söz konusudur (Ghorbani ve ark., 2007). Ancak şu anda bu mikroorganizmaların madencilik endüstrisinde bilinen bir ticari uygulaması bulunmamaktadır.

1.6.2. Metal Sülfür Cevherlerin İşlenmesinde Biyoliç Mekanizması

Mikroorganizmaların katı malzemelerden metalleri liç ve mobilize etme yeteneği üç mekanizmayla gerçekleşir (Mishra, 2007);

- * Redoks reaksiyonları
- *Organik veya inorganik asitlerin oluşumu
- *Şelat oluşturuç maddelerin salınımı

Bu prensiplere bağılı olarak genel olarak 2 tip biyoliç mekanizmasından bahsedilebilir. Bunlar doğrudan ve dolaylı bakteriyel liç mekanizmasıdır. Doğrudan liç de bakterinin mineral yüzeyine tutunması ve hedef metalle direk teması söz konusudur. Dolaylı liç mekanizması ise mikroorganizmalar tarafından üretilen reaktiflerinin rol oynadığı işlemleri kapsamaktadır.

Kemolitotrofbakterilerin sülfürlü minerallerin liçinde kullanımı oldukça yaygındır. Eşitlik 1 ve 2 sülfürlü ve demirli minerallerin bakteriyel oksitlenmesini göstermektedir (Simate, 2009).



Bu tepkimelerde açığa çıkan demir sülfat (eşitlik 3) ve sülfürik asit (eşitlik 4) sayesinde metal çözüldürülmesi dolaylı liç mekanizmasına, eşitlik 1'de sülfürlü mineraldeki metalin çözünmesi doğrudan liç mekanizmasına örnektir.



Bazı araştırmacılar, dolaylı bakteriyel liç mekanizmasını tiyosülfat ve polisülfid olmak üzere iki gruba ayırmışlardır (Schippers ve Sand, 1999; Sand ve ark., 2001).Her iki mekanizmada da hücrelerin minerale bağlanması ve mineral yüzeyi ile fiziksel temas halinde olması gerekir; hücreler bir ekzopolimer (*extracellular polymeric layer*) salgılayarak mineral yüzeyine tutunur. Bu ekzopolimerik zarflar, glukuronik asit kalıntılarıyla kompleks oluşturan ferrik demir bileşikleri içerir.

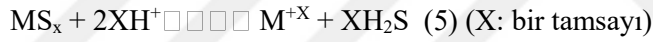
Bunlar, birincil oksidasyon mekanizmasının bir parçasıdır; tiyosülfat, kükürt bileşiklerinin oksidasyonu sırasında ara ürün olarak oluşur; periplazmatik boşlukta veya hücre zarında kükürt veya politiyonat granülleri oluşur.

Sülfidlerin mineralojisi ve elektron konfigürasyonu, liç mekanizmasının türünü belirler (Hanford ve Vargas, 2001; Sand ve ark., 2001). Yalnızca metal atomlarının yörüngelerinden türetilen değerlik bantlarına sahip metal sülfidler, protonlar tarafından okside edilemez (asitte çözünmez). Buna karşılık, hem metal hem de sülfür orbitallerinden türetilen valans bantlarına sahip metal sülfürler, asitte az ya da çok çözünür (Ndlovu ve Monhemius, 2005).

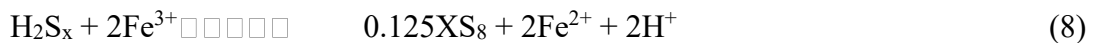
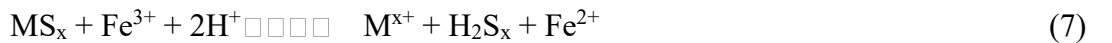
Tiyosülfat mekanizması ferrik demirin, tiyosülfat üreten asitte ve çözünmeyen metal sülfidlerle (FeS₂, MoS₂ ve WS₂) kimyasal reaksiyonunu içerir (Schippers ve Sand, 1999).

Asidik çözeltilerde, özellikle ferrik demir varlığında kararsız olan tiyosülfat, ferrik demir ile tetratiyonat (S₄O₆²⁻) disülfan-monosülfonik asit (HSSSO₃⁻) ve tiyonat aracılığıyla bir dizi reaksiyona girer ve nihai ürün sülfat olur (Schippers ve ark., 1996).

Polisülfid reaksiyon mekanizması, asitte çözünür sülfidlerin (ZnS, NiS, CoS, CuFeS₂ ve PbS) ferrik demir ve protonlar tarafından oksidasyonunu içerir. Proton aracılı çözünme, serbest metal iyonları ve hidrojen sülfür oluşturur (eşitlik 5) ve oluşan hidrojen sülfid, mikrobiyal olarak sülfürik aside oksitlenir (eşitlik 6) (Johnson, 2003).



Ferrik demirin metalle tepkimesi, ferröz demir ve polisülfid oluşturur (eşitlik 7). Polisülfidler, kükürdün polimerize edildiği ve indirgendiği genel bir bileşik sınıfıdır, genellikle M₂S_n (n > 2) formundadır ve tipik n değeri 6'dan fazla değildir (Klauber, 2008). Polisülfid, ferrik demir ile oksitlenerek elementel kükürt üretir (eşitlik 8). Üretilen kükürt, deneysel ve çevresel koşullar altında oldukça karardır ve yalnızca *At. thiooxidans* (Schippers ve Sand, 1999) gibi kükürt oksitleyici mikroplar tarafından sülfürik aside indirgenebilir (eşitlik 9). Oluşan sülfürik asit, sülfür metallerinin proton saldırısı ile çözünmesini artırır (Johnson, 2003).



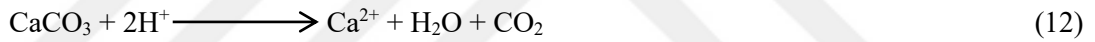
Bakterilerin hem tiyos \longrightarrow : polisülfid mekanizmalarındaki rolü, liç reaksiyonları tarafından tüketilen ferrik demir ve protonları yeniden üretmektir (Hanford ve Vargas, 2001).

Bazı heterotrofik mikroorganizmalar, karbonhidratlardan organik asit üretme yeteneğine sahiptir. Bu metabolitler; hidroksit, silikat ve karbonat minerallerini çözerek yan ürün olarak nikel ve diğer metalleri açığa çıkarırlar.

Organik asitler, proton açığa çıkararak mineral çözünmesine katkıda bulunurlar. Organik asitler ayrıca çözültideki metal iyonlarıyla kompleks oluşturarak metal aktivitesini azaltabilir ve mineralin görünür çözünürlüğünü artırabilir (McKenzie ve ark., 1987).

Organik asitlerin ana etkisi, katı-çözelti arayüzünde metal-organik komplekslerin oluşabilmesi, kation-oksijen bağlarını zayıflatması ve böylece çözünme reaksiyonunu katalize etmesi olabilir. Bu durumda çözünme, organik asidin yüzeydeki metal iyonunu indirgelediği redoks reaksiyonları ile sağlanır (McBride, 1989). Aşağıda verilen eşitlikler nikelin çözünmesini sağlayan olası reaksiyonlardan bazılarıdır (Tzeferis, 1992):

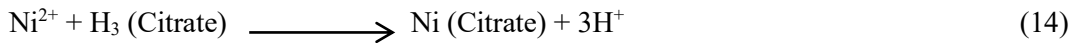
Asit Liçi:



İndirgeme:



Kompleksleşme/Şelasyon:



Heterotrofik mikroorganizmaların kullanımı, ticari ölçekli koşullar altında istenmeyen organizmalar tarafından kontaminasyon tehlikesi arz etmektedir. Ayrıca, heterotrofik mikroorganizmaların gelişimi için çok miktarda karbon kaynağına ihtiyaç duyulması nedeniyle ticari ölçekte uygulanabilir olması pek olası değildir (Rawlings, 2005).

Sülfid cevherlerin işlenmesinde kemolitotrofik bakterilerin kullanımı, mineral işleme endüstrisinde iyi kurulmuş ve ticari açıdan uygulanabilir bir teknolojidir. Ancak, sülfid olmayan cevherler veya nikel lateritler gibi kükürt oranı düşük minerallerin kemolitotrofik mikroorganizmalar kullanılarak etkili bir şekilde çözülmesi zordur. Bunun nedeni, sülfid olmayan cevherlerin

kemolitotrofik mikroorganizmalar için enerji sağlamak için yeterli indirgenmiş kükürt içermemesidir.

İndirgenmiş sülfürün kemolitotrofik mikroorganizmalar tarafından sülfürik aside oksidasyonu, sülfid olmayan cevherlerin çözündürülmesinde esastır.

At. ferrooxidans, *At. caldus* ve *Leptospirillum ferrooxidans* gibi kemolitotrofik bakteriler kullanılarak sülfürik asit üretimi mümkündür. Bu mikroorganizmalar, heterotroflardan farklı olarak, CO₂'ti tek karbon kaynağı olarak kullanırlar ve enerjilerini indirgenmiş kükürt ve/veya ferröz demirin oksidasyonundan elde ederler ve sonuçta sülfürik asit üretirler (Hanford ve Vargas, 2001).

Üretilen sülfürik asit, pH'yı bakteri faaliyetleri için uygun seviyelerde tutar ve nikel laterit cevherlerinin etkili bir şekilde liç edilmesine yardımcı olabilir. Hidrojen iyonları metal katyonlarını cevher matrisinden uzaklaştırabilir, böylece metallerin çözünmesi sağlanır.

1.7.Çalışmanın Amacı

Düşük tenörlü laterit nikel yataklarında Ni çeşitli mineral fazlarında dağınık halde bulunmaktadır. Bu nedenle nikel kazanımı için çok fazla cevherin işlenmesi gerekmektedir. Laterit cevherlerin işlenmesinde kullanılan pirometalurjik ve hidrometalurjik yöntemler, yüksek sermaye ve yüksek operasyon maliyeti gerektirdiği için nikel üretiminin çoğunluğu sülfürlü nikel cevherlerinden karşılanmaktadır. Biyoliç çevre dostu ve ekonomik bir yöntem olması sebebiyle laterit nikel cevherlerinin işlenmesinde alternatif bir uygulama olarak ön plana çıkmaktadır.

Günümüzde sülfürlü minerallerin kemolitotrofik bakteriler kullanılarak liç edilmesi, mineral biyoteknolojisinin en çok çalışılan ve ticari olarak yararlanılabilen bir uygulama olmasına rağmen, nikel lateritler gibi sülfürlü olmayan okside minerallerin bakteriler tarafından kullanılarak çözünmesine ilişkin sınırlı bilgi bulunmaktadır.

Mikroorganizmalar kullanılarak yapılan nikel çözünümü ile ilgili çalışmalar çoğunlukla heterotrofik mikroorganizmalar tarafından organik asit (sitrik, asetik, laktik, malik, formik asit) sentezlenmesine odaklanmıştır. Fakat bu yöntemler kontaminasyon riski, fazla miktarda karbon kaynağı ihtiyacı gibi olumsuz nedenlerle ticarileşmemiştir. Bu sebeple son yıllarda yapılan biyoliç çalışmaları kemolitotrof mikroroganizmalara yönelmiştir.

Bu çalışmada doğal izolat *Acidithiobacillus ferrooxidans* bakterisi nikel liçinde kullanılarak lateritik nikel cevhrinde biyoliç yönteminin uygulanabilirliği araştırılmıştır. *At. ferrooxidans* kemolitotrof mezofil bir bakteridir. Ferröz demiri ve indirgenmiş sülfürlü bileşikleri okside edebilmektedir.

Laterit nikel cevherleri kobalt, alüminyum, magnezyum ve demir gibi değerli metalleri içerir, bununla birlikte ferröz demir veya önemli miktarda indirgenmiş kükürt içermediğinden kemolitotrofik bakterilerin birincil oksidasyonu gerçekleştirmesi mümkün değildir. Ancak sülfürik asit üretmek için piritin (FeS₂) veya benzer demir/kükürt minerallerinin birincil oksidasyonu bu minerallerin liç ortamına eklenmesiyle mümkün olmaktadır.

Bu çalışmada; biyoliç ortamına *At. ferrooxidans*'ın gelişimi ve sülfirik asit üretimi için kükürt eklenmiştir. Bakterinin primer metabolit olarak üretmiş olduğu sülfirik asitin liç işlemini gerçekleştirmesi ve optimum biyoliç koşullarının belirlenmesi hedeflenmiştir.





2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Mikroorganizmaların madencilikte ilk kullanımı, gözlemlenen etkilerden mikroorganizmaların sorumlu olduğu netleşmeden çok önce gerçekleşti. 1556'da İspanya, Sevilla'daki Rio Tinto bakır madeninde, Rio Tinto nehrinden gelen suyun bakır içeren birikintilere uygulandığında bakırın çözüldüğü ve daha sonra küçük birikintiler olarak tekrar çöktüğü keşfedilmiştir. Kanıtlar nehir suyunun bölgedeki mikrobiyal aktivite sonucu yüksek oranda ferrik demir içerdiğini göstermektedir, bu sayede bakır çözülmüştür (Mishra, 2007).



Şekil 2.1. Rio Tinto'da mikrobiyal demir oksidasyonu sonucu oluşan görüntü (Amils ve ark., 2014)

O dönemde insanlar muhtemelen bu sürece bir anlam veremediler ancak, şuan bunun biyomineralizasyonun kaydedilen ilk kullanımı olduğunu biliyoruz. Madenciler farklı dönemlerde sülfidik cevherlerin veya bakır içeren cevher artıklarının sulanmasının, zamanla bakırın mobilizasyonuna yol açtığını ve bunun daha sonra çözüldüğü bakır sülfat olarak veya uygun bir kimyasal işlemden sonra metalik bakır olarak geri kazanılabileceğini kaydetti. Ancak bu etkiye bir mikroorganizmanın yol açtığı 1900'li yıllarda keşfedilmiştir.

Mikroorganizmaların biyoliç uygulamasında kullanılabileceğinin keşfi ve biyoliç çalışmaları 70 yıl öncesine dayanmaktadır. İlk defa 1947 yılında Colmer ve Hinkle, bitümlü kömür yataklarındaki piritin oksidasyonu ile asit maden drenajı (AMD) oluşumuna bakterilerin dahil olduğuna dair kanıt bulundu. Amerika Birleşik Devletleri'nin doğusundaki bitümlü kömür madenlerinde ki AMD sorunuyla ilgili yaptıkları araştırmalarda AMD'deki demir oksidasyonunun mikrobiyal olarak ilerlediği sonucuna vardılar.

1950'de Colmer ve ark. AMD'den asidofilik, ototrofik demir oksitleyici bir bakteri izole etti. Bu mikroorganizma şuan *Acidithiobacillus ferrooxidans* olarak isimlendirilmiş bakteriydi. 1950 -

1960 yılları arasında bu mikroorganizmaya benzer demir ve kükürt oksitleyebilen başka kemolitotrof bakterilerinde olduğu keşfedilmiş ve ayrıntılı olarak çalışılmıştır (Ehrlich, 2004). 1960'lı yıllarda endüstriyel ölçekte biyoliç uygulamalarına başlanmıştır.

Günümüzde başta bakır olmak üzere; altın, uranyum, demir, kobalt magnezyum, krom, çinko gibi birçok değerli metalin ekstraksiyonu ve saflaştırılması mikroorganizmaların dolaylı ya da doğrudan liç mekanizmasıyla çalışılmaktadır. Yaygın olarak çalışılan birkaç metalle ilgili mevcut durum aşağıda özetlenmiştir.

2.1. Bakır Cevherinde Biyoliç

Biyolojik bakır liçi, Avustralya, Kanada, Şili, Meksika, Peru, Rusya ve ABD gibi birçok gelişmiş ülkede uygulanmaktadır. Biyoliçten elde edilen bakır geri kazanımı, dünya bakır üretiminin yaklaşık %25'ini oluşturmaktadır. 1947'de kömür madeni suyundan *At. ferrooxidans*'ın ilk izolasyonunun ardından yapılan çalışmalar, bakır liçinde bu mikroorganizmanın ne kadar etkin olduğunu göstermiştir (Yin ve ark., 2018).

Biyomadenciliğin ilk modern uygulaması 1960'larda Amerika Birleşik Devletleri, Utah şehrinde bulunan Kennecott Bingham kanyonu bakır madeninde bakırın geri kazanılması için yığınların oluşturulması ve sulanmasıyla gerçekleştirilmiştir. Bu tesiste *Acidithiobacillus* cinsi bakterilerle biyoliç gerçekleştirilmiştir. Günlük 200 ton üretim gerçekleştirilen tesis, ülkenin bakır ihtiyacının %25'ni karşılamıştır. 1980-1998 yılları arasında Şili'de kurulan birçok maden işletmesinin biyoliç yöntemini kullanması ile birlikte düşük kaliteli cevherlerden, bakır geri kazanımının dünyadaki toplam bakır üretimindeki oranının %10'dan %25'e yükselmesini sağlamıştır.

Maden işletmelerine baktığımızda bakırın biyoliçinde gerçekleştirilen uygulamalar dünya genelinde aynıdır. Tipik olarak açık ocaklardan çıkarılan bakır cevheri ayrıştırılır; cevherin yüksek tenörlü kısmı ergitme için konsantre edilirken, düşük tenörlü kısım biyoliç işlemine tabi tutulur. Cevher geçirimsiz bir yüzey üzerine uygun boyutlarda bir yığın oluşana kadar istiflenir. Üst kısım tesviye edildikten sonra, asidik liç solüsyonu damlama veya sprey yöntemiyle yığın yüzeyine uygulanır. Bu liç solüsyonu *Achidithiobacillus ferrooxidans* ve *Leptospirillum ferrooxidans* gibi demir okside eden mikroorganizmaları içerir. Yığının en üstündeki bir metrede bakteri kolonizasyonu oluşur. Suda çözünmeyen bakır formları kalkosit (Cu_2S) ve kovelin (CuS) hem kimyasal hem biyolojik olarak oksitlenerek çözünür bakır sülfata dönüşür.

Yığın tabanından süzülen bakırca zengin liç solüsyonu merkezi bir geri kazanım tesisine iletilir. Çoğu büyük ölçekli operasyonda, 0,5-2 g/L bakır içeren biyoliç solüsyonu, demir talaşı/atığı bulunduran sementasyon ünitesine pompalanır ve ardından elektrolize alınır.

Günümüzde biyoliç ile bakır üretilen madenlere birkaç örnek verilebilir. Şili'deki Escondida bakır madeni dünyanın en büyük bakır madenidir. 180.000 ton üretim kapasiteli bu madende klorid liçi ve biyoliç uygulaması birlikte kullanılarak üretim yapılmaktadır.

Çin Zijinshan'da Zijinshang Copper tarafından işletilen bakır madeninde biyoliç uygulamalarıyla %80 verimle yıllık 20.000 ton bakır üretilmektedir.

İran'ın Kirman eyaleti Babek bakır madeni IBCCO tarafından işletilmektedir. Bu işletmede biyoliç yöntemiyle bakırın yanı sıra altın ve gümüşde üretilmektedir.

2.2. Uranyum Cevherinde Biyoliç

Mikroorganizmalar uranyum ve altın içeren maden cevherlerindedeki kullanılırlar. *At. ferrooxidans*'lar elektron alıcısı olarak O₂ ile U⁺⁴'ü U⁺⁶ ya oksitleyebilirler. Ancak, uranyum liçi muhtemelen bakır liçinde olduğu gibi *At. ferrooxidans*'ların katkısıyla Fe⁺²/ün Fe⁺³'e tekrar oksidasyonu sonucu oluşan Fe⁺³/le uranyumun kimyasal oksidasyonuna (eşitlik 15) bağlı olmaktadır. Reaksiyon şu şekilde gözlenir:



Uranyum liçi, *At. ferrooxidans* uranyum mineralleri ile doğrudan etkileşime girmediği için dolaylı mekanizma ile ilerler. *At. ferrooxidans*'ın uranyum liçindeki rolü dolaylı mekanizmanın en iyi örneğidir.

Liç işlemlerinde mikroorganizmaların varlığının uranyum çözünme sürecini katalize etmede faydalı olduğu bulunmuştur (Brierley ve Brierley 1999). Bakteriyel aktivite, pirit ve ferröz demirin oksidasyonu ile sınırlıdır. Süreç, işlenmiş durakların ve yer altı madenlerinin tünellerine liksivantın periyodik olarak püskürtülmesini veya basılmasını içerir. Biyolojik liç, atık altın cevherinden uranyum elde etmek için de başarıyla kullanılmaktadır (Kaksonena ve ark., 2020).

Düşük tenörlü uranyum cevherlerinden biyoliç yöntemiyle uranyum kazanımı 1960'lı yıllardan beri gerçekleştirilmektedir.

Düşük dereceli cevherlerden uranyumun biyoliçinin ticari uygulaması 1960'lara dayanmaktadır. İlk defa Kanada da ticari olarak yıllık 60 ton uranyum üretimi gerçekleştirilmiştir. Kanada, 1977'de Agnew Lake Madeninde kendi cevherinden *At. ferrooxidans* kullanarak yaklaşık 35 ton U₃O₈ üretmiştir (McCready ve Gould 1990). Ticari ölçekteki deneyim, 1980'lerde Denison's Elliot Lake'teki operasyonlar ve Gibraltar madenindeki atık biyolojik liç ile devam etmiştir.

Sulama tipi prosesler yerinde (*in situ*) veya yığın biyoliç içerebilir. Yerinde biyoliç, metallerin çözüldürüldüğü ve doğrudan cevher gövdesinden geri kazanıldığı süreci tanımlar. Bu proses, Kanada, Ontario'daki Denison madeninde düşük dereceli cevherden uranyum elde etmek için kullanılmıştır. Bu operasyonda, bir yer altı ocağında patlatılan cevher aralıklı olarak AMD ile doldurulup, havalandırılmıştır. Liç sıvısı, yaklaşık üç haftalık sürelerle işleme alınmış ve nihayetinde uranyum kazanımı gerçekleştirilmiştir. 1988 boyunca, bu prosesle o zamanki değeri 25 milyon ABD

doları olan yaklaşık 350 ton uranyum elde edilmiştir. Günümüzde bu prosesle uranyum kazanımına devam edilmektedir.

2.3. Altın Liçi

Altın doğal olarak, doğada çoğunlukla arsenik ve pirit içeren minerallerle ilişkili halde bulunmaktadır. *At. ferrooxidans* hapsolmuş altının (Au) serbest bırakılmasında arsenopirit minerallerini çözmek için kullanılır (eşitlik 17).



Altın daha sonra klasik altın madenciliği yöntemleriyle siyanürle komplekslendirilir. Bakırın saflaştırılması geniş saflaştırma tanklarında olurken, altının saflaştırılması bakırdan farklı olarak nispeten daha küçük biyoreaktör tanklarında gerçekleştirilir. Biyolojik saflaştırmanın bu tipinde siyanürle bağlı altının %95'inden fazlasının serbest kalması sağlanmaktadır. Ayrıca, bu madencilik sürecinde arsenik ve siyanür zehirli atıklar olmasına rağmen, her ikisinde altın-liç biyoreaktöründe uzaklaştırılır. Arsenik, ferrik bir presipitat olarak, siyanür (CN-) ise altın geri kazanım sürecinin daha sonraki basamaklarında mikrobiyal oksidasyonla CO₂ ve üreye çevrilerek uzaklaştırılır. Bu yüzden, küçük-ölçekli mikrobiyal altın saflaştırma metodları altın cevherlerinin kavurma ve basınçlı oksidasyon gibi diğer oksidatif ön işlemlere göre daha az maliyetli, daha az kirletici bir alternatif olarak daha popüler hale gelmektedir.

Son yıllarda altın cevherlerinin biyooksidasyonu ticari bir süreç olarak uygulanmaktadır ve bu süreçler, refrakter altın cevherlerinde daha ileri uygulamalar için dünya çapında çalışılmaktadır. K. A. Natarajan ve Indian Institute of Science'daki iş arkadaşları tarafından geliştirilen teknoloji, altın ekstraksiyonu için Hindistan'ın Karnataka kentindeki Hutti Altın Madenlerinde uygulanmaktadır.

Ticari işletme, refrakter altın cevherleri için yığın liçi teknolojisinden faydalanmaktadır. Refrakter sülfürlü altın cevherleri başlıca iki tip sülfür içerir, Bunlar, pirit ve arsenopirittir. biyooksidasyonla pirit ve arsenopiritin sülfürik matrisi kırılmaktadır.

2.4. Lateritik Nikel Cevherlerinde Biyoliç

Binlerce yıldır bilinen ve eritilen kurşun, çinko veya bakır gibi diğer demir dışı metallerin aksine, nikel üretimi ve kullanımı nispeten yenidir; nikel ancak 1700'lerin sonlarında keşfedildi ve kayda değer üretim ancak 1880'lerde başladı

1800'lü yıllar, nikel için ilginç bir dönemdir, çünkü 1870'lerin on yılı boyunca dünyadaki nikelin kaynağı Avrupa'dan (esas olarak Finlandiya ve Almanya) Yeni Kaledonya'ya geçmiştir. O zamanlar dünya nikel tonajı yaklaşık 500 ton/yıldı ve nikelin esas kullanım alanı nikel kaplama ve Alman gümüşü yada nikel-gümüş olarak adlandırılan %65 Cu, %18 Ni ve %17 Zn alaşımıydı.

1870'ler-1880'lerden bu yana, nikel üretimi 2.000 kattan fazla artmıştır.1880'lerde yaklaşık 1.000 ton üretilirken bu rakam 2019'da yaklaşık 2,4 milyon tona yükselmiştir.

Yaklaşık 1880'den 1910'a kadar olan dönem, Yeni Kaledonya'nın laterit cevherlerinden üretilen nikelin nikel üretimine hakim olduğunu gösteriyor. 1910'larda Sudbury (Kanada) sülfür cevherinden çıkarılan nikel üretime hakim olmaya başladığında dünya nikel üretimi yaklaşık 10.000 ton/yıldı. 1950'den sonra, laterit kaynaklardan elde edilen nikel miktarı yavaş yavaş artmıştır.

Son 20 yıla baktığımızda düşük tenörlü lateritik cevherlerden nikel kazanımının önemi daha da artmış ve bu cevherlerin biyoliç gibi; daha maliyetsiz ve çevre dostu yöntemlerle işlenmesi üzerine yapılan çalışmalar yoğunlaşmıştır.

Sülfür cevherlerinin oksidatif biyoliç işlemi endüstriyel ölçekte uygulanmaktadır. Finlandiya'daki Terrafame Sotkamo madeni buna bir örnektir. Bu madende biyoliç ile yıllık 29.600 ton nikel üretilmektedir, buda küresel üretimin %1,2'sini ifade eder (Roberto ve Schippers, 2022).

Ayrıca sülfürlü nikel yataklarından biyoliç yöntemiyle nikel kazanımına dair laboratuvar ölçekli çalışmalar da devam etmektedir.

Ahmadi ve ark (2015) yaptıkları çalışmada, düşük dereceli sülfür tortullarından kobalt, bakır ve nikel gibi değerli madenlerin kazanımı için biyoliç yönteminin kullanılabilirliğini araştırmışlardır. Çalışma çalkalamalı erlen deneyleriyle yürütülmüştür. Bu deneyde asidofil mezofilik mikroorganizmaların (*Leptospirillum ferriphilum*, *At. caldus*, *Sulfobacillus* sp. ve *Ferroplasma* sp.) oluşturduğu karışık kültür ortamı tercih edilmiştir. 45°C'de 150 dev/dk çalkalama hızının uygulandığı yöntemde ortama maya ekstraktı eklenmiştir (% 0,02). Çalışmada bahsi geçen metallerin kazanımında; bakteri inokulasyonunun, başlangıç pH'sının, besiyeri tipinin ve katı madde oranının etkileri incelenmiştir. Sonuçta, bu çalışma ile %5 (w/v) pülp yoğunluğunda bakırın %55'nin, nikelin %98,2'sinin ve kobaltın %59,5'inin, 30 günlük biyoliç yöntemi ile atıktan ekstrakte edilebileceği gösterilmiştir. Çalışmanın bulguları incelendiğinde mikroorganizmaların kullanıldığı liç çalışmalarında kobalt, nikel ve bakır gibi metallerin aynı koşullardaki mikroorganizma kullanılmayan liç yöntemlerine nazaran 3 kat çözünme verimi olduğu bulunmuştur. Yine söz konusu çalışmada pH 1,8 koşulunda nikel ve kobalt kazanımı daha yüksekken bakır kazanımının pH 1,2'de daha yüksek olduğu iddia edilmiştir. Pülp yoğunluğu sonuçları kıyaslandığında; nikel ve kobalt metalleri için düşük yoğunluk daha iyi sonuç verirken, bakır için yüksek yoğunluğun daha iyi sonuç verdiği gösterilmiştir. Çalışmada, redoks potansiyelinin düşük ve yüksek olarak kontrol edildiği iki aşamalı biyoliç yönteminin maksimum verimde kazanım sağlayabileceği belirtilmiştir.

Silikat ve oksit cevherlerin biyoteknolojik işlenmesi yalnızca laboratuvar ortamında gerçekleştirilmiştir. Okside cevherlerle ilgili ileri düzeydeki çalışmalar çoğunlukla kobalt ve nikelin kazanılması için laterit cevherlerin biyolojik olarak liç edilmesidir (Santos ve Schippers, 2022).

Çeşitli araştırmalar hem saprolitik hem de limonitik laterit cevherlerinin heterotrofik bakteri veya mantarlar tarafından üretilen organik asitlerle biyoliçine odaklanmıştır (Giese ve ark., 2019).

Valix ve ark (2001) yaptıkları çalışmada *Aspergillusniger* ve *Penicillium* sp. mantarlarını kullanarak lateritik nikel cevherinden nikel kazanımını araştırmışlardır. Yapılan çalışmada kimyasal olarak organik asitler ile nikel çözünmesinin %34,6 olduğu belirtilmiş, mantarlarla yapılan dolaylı biyoliç uygulamasının, kimyasal liçe kıyasla daha verimsiz olduğunu bildirmişlerdir.

Diğer bir çalışmada Mohapatra ve ark (2009) *Aspergillus niger* ile yaptıkları biyoliç çalışmasında, ortama eklenen şeker miktarının artmasıyla biyoliç veriminin arttığını bildirmişlerdir. Yapılan deneylerde F-testi modelleme kullanarak nikel kazanım verileri analiz edilmiştir. Yapılan biyoliç deneylerinde elde edilen en yüksek nikel çözünmesi %31,34' dür. Bu sonuç için optimum koşullar 10,04 g/L şeker konsantrasyonu, %8,75 katı oranı 33,8°C sıcaklık ve 37,5 gün liç süresi olarak bildirilmiştir.

Demirce zengin lateritlerden kobalt ve nikel metallерinin dolaylı biyoliçinin araştırıldığı başka bir çalışmada, *Pseudomonas putida*, *Pseudomonas koreensis*, *Aspergillus niger* ve *Penicillium bilaji* olmak üzere 4 farklı mikroorganizma türünün kullanıldığı farklı medyumlar ile liç prosedürleri gerçekleştirilmiştir. Hakim karboksilik asitin değişkenlik gösterdiği medyumlarda en yüksek liç veriminin (%90.6 nikel, %71.98 kobalt) *Pseudomonas putida*'nın kullanıldığı medyumla elde edildiği bildirilmiştir. Buna ilaveten; Ni ve Co çözünürlüğü için gereken aktivasyon enerjisinin 41,82 ve 43,91 kJ/mol olarak hesaplandığı çalışmada; demir açısından zengin laterit cevherden Ni ve Co'nun çözünme oranının kimyasal olarak kontrol edilen bir reaksiyon mekanizması tarafından gerçekleştiği ileri sürülmüştür (Hosseini Nasab ve ark., 2020).

Ancak heterotrof mikroorganizmalarla yapılan biyoliç, karbon ihtiyacından dolayı kemolitotrofik asidofillerle yapılan biyoliçten daha maliyetli hale gelir.

Liç ortamına eklenen elementel kükürdün *Acidithiobacillus* cinsi bakteriler tarafından oksidasyonu ile üretilen sülfürik asit ile biyoliç uygulamalarında başarılı bir şekilde çalışılmıştır. (Jang ve Valix 2017).

Behera ve ark (2018) *At. ferrooxidans* ile yaptıkları çalışmada; nikel ve bakır barındıran Güney Afrika sülfürlü nikel cevheri konsantrasyonunda X-ışını kırınımı analizi ile pentlandit ve kalkopiritin belirgin mineral fazları olduğunu ortaya koydu. Biyoliçte pülp yoğunluğu, tanecik boyutu, bakteri inokulum miktarı, ortamın pH'sı ve liç süresi gibi parametrelerin etkisini karşılaştırmışlardır. Deneyler 30°C'de çalkalamalı inkübatörde (150 dev/dk) gerçekleştirilmiştir. Araştırmanın sonuçlarına göre; liç süresi, cevherin pülp yoğunluğu ve tanecik boyutu biyoliçteki en önemli değişkenlerdir. Optimum koşullarda (2% pülp yoğunluğu, pH 1,5'te ve 0,075 mm tanecik boyutunda) 15 günlük liç çalışmasının sonucunda maksimum nikel (%82), kobalt (%76) ve bakır (%25,6) çözüldüğü raporlanmıştır.

Mezofilik asidofillerin kullanıldığı başka bir biyoliç çalışmasında, Manisa (Türkiye)'deki Çaldağ nikel yatağından sağlanan düşük tenörlü nikel laterit cevherinden nikel (Ni) ve kobalt (Co) gibi değerli metallерin ekstraksiyonu için saf ve karışık mezofilik asidofil kültürleri kullanılmıştır (*At. ferrooxidans*, *Leptospirillum ferrooxidans* ve *At. thiooxidans*). Cevherin biyoliçinde; pülp

yoğunluğu, saf/karışık kültür, dışarıdan eklenen elementel kükürt ve ferröz demir miktarı gibi değişkenler incelenmiş, sonuç olarak pülp yoğunluğundaki artışın, her iki kültüründe liç aktivitesini olumsuz yönde etkilediği, karışık kültürün (*At. ferrooxidans* ve *At. thiooxidans*) biyoliçte daha başarılı olduğu bulunmuştur. %7 elemental kükürt, 2,24 g/L ferröz demir ve %1 (katı madde) içeren karışık kültürde 40 gün sonunda Ni ve Co'nun maksimum çözünmesi %97 ve %95 olarak bulunmuştur (Çiftçi ve Atik, 2017).

Saprolitik lateritlerin biyoliçi, mikroorganizmalarla inorganik veya organik asit üretmesiyle olabilirken indirgeyici (reductive) biyoliç, limonitik laterit cevherlerin biyoliçi için umut veren bir yöntemdir (Hetz ve Schippers., 2024).

İndirgeyici biyoliç, bir cevherin veya başka bir katı maddenin mikroorganizmalar tarafından katalize edilen kimyasal indirgeme reaksiyonuyla çözünmesi anlamına gelir. *At. ferrooxidans* kullanılarak anaerobik şartlarda limonitik lateritde indirgeyici biyoliç işlemi, laboratuvar ölçeğinde gösterilmiş ve Ferredox prosesi olarak tanımlanmıştır (Johnson ve Du Plessis 2015; Smith ve ark. 2017).

Burada ana reaksiyon, *At. ferrooxidans*'ların yanı sıra birkaç asidofilik bakteri tarafından katalize edilebilen, ortama eklenen elementel kükürdün oksidasyonuna bağlı olarak ferrik demirin disimilatif indirgenmesidir, kükürt elektron vericisi olarak görev yaparken ferrik demir elektron alıcısı olarak görev yapar (Schippers ve ark., 2014).

Ferredox mekanizması ile limonit cevherlerde, ototrof asidofilik bakterilerle, anaerobik indirgeyici çözünme yoluyla kobalt ve nikel kazanımının sağlanabildiği literatürde mevcuttur. Ancak, bu indirgeyici çözünmenin tek başına *At. thiooxidans* bakterisi kullanılarak düşük pH'da (pH<1) ve aerobik şartlarda da gerçekleştiğinin gösterilmesi, okside demir indirgenmesiyle ilgili bazı soru işaretleri ortaya çıkarmıştır (Stanković ve ark. 2022). Çünkü ferrik demirin *At. thiooxidans*'lar tarafından indirgenemediği daha önce tespit edilememiştir.

Konuyla ilgili mevcut bir hipotez, elementel kükürdün sülfürik aside enzimatik oksidasyonu sırasında oluşan hidrojen sülfür veya tiyosülfat gibi ara kükürt bileşiklerinin veya biyolojik olarak aktive edilmiş kükürdün kendisinin (Johnson ve ark.; 2021), ferrik demir için kimyasal indirgeyici olarak görev almasıdır.

Aerobik indirgeyici biyoliç, lateritlerin anaerobik indirgeyici çözünmesine göre, anoksik bir atmosfer sağlamak için nitrojen gazıyla gazlaştırmaya gerek olmaması ve gelişmiş kükürt oksidasyonu sayesinde daha az asit tüketimi içermesi gibi avantajlara sahiptir.

Limonitik lateritlerin indirgeyici biyolojik yöntemiyle liç edilmesi düşük pH'da anaerobik ve aerobik koşullar altında mümkündür (Marrero ve ark., 2020). İndirgeyici biyoliç teknolojisi, mevcut madenlerde metal geri kazanımını arttırma ve işletilmeyen cevherleri, limonit stoklarını ve hatta laterit cevher işlenmesinden kaynaklanan artıkları değerli kaynaklara dönüştürme potansiyeline sahiptir. İndirgeyici biyoliç işleminin önündeki en büyük engeller, önemli miktarda nikel taşıyan götit

gibi demir oksitlerin düşük reaktivitesi ve tank liçinin yüksek maliyetidir. Bu nedenle, yığın biyoliçi yada havuz biyoliçi gibi yeni modeller geliştirilmelidir (Stankovic ve ark. 2022).

Ferrik demir minerallerinin indirgenerek çözüldüğü, böylece nispeten düşük (30-45°C) sıcaklıklarda cevherden nikelin çıkarılmasının kolaylaştırıldığı bir başka çalışmada, limonitik cevherden nikelin biyoliç ile çözünmesi için demir-indirgeyen asidofiller kullanılmıştır. Bu çalışmada; demir indirgeyen asidofilik bakterilerin farklı türleri, ana demir mineralinin götit olduğu laterit limonitik cevherden, nikeli çözme yetenekleri açısından karşılaştırılmıştır. Sonuçta; *At. ferrooxidans*'ın asidik koşullarda (pH:2) uygun maliyetli bir enerji kaynağı (elementer kükürt) kullanarak metallerin çözünmesine aracılık ettiği bulunmuştur. Bu çalışmada bakteriler öncelikle aerobik olarak çoğaltılmış, nikel cevherinin eklenmesi ile koşullar anaeroba çevrilmiştir. Sonuçta 14 gün içinde cevherde bulunan nikelin %70'den fazlasının liç çözeltilisine geçtiği ancak, havalandırılan kültürlerde bu oranın %10 da kaldığı bildirilmiştir. (Hallberg ve ark., 2011)

Aerobik ve anaerobik yöntemlerin araştırıldığı bir başka çalışmada; *At. thiooxidans* kullanılarak aerobik redüktif çözünme, *At. ferrooxidans* kullanılarak anaerobik redüktif çözünme araştırılmıştır. *At. thiooxidans*'ın kullanıldığı aerobik redüktif çözünme işleminin, ferröz demirin çıkarılmasında, manganez, kobalt ve nikelin çözülmesinde, *At. ferrooxidans*'ın kullanıldığı anaerobik redüktif çözünme işlemine nazaran çok daha efektif olduğu raporlanmıştır (Marrero ve ark., 2017).

Biyoliçte aerobik indirgeyici yöntemin araştırıldığı bir başka makalede, *At. thiooxidans*'ın aracılık ettiği ferrik demir indirgememesinin, nikel laterit cevherinden metal kazanımı sağladığı gösterilmiştir. Sonuç olarak; *At. thiooxidans* ve *At. ferrooxidans*'ın kullanıldığı aerobik yöntemin, *At. ferrooxidans* kullanan anaerobik yöntem ile sadece 7 günde benzer miktarlarda nikel (%53-57) ve kobalt (%55-60) çıkarılmasını sağladığı bildirilmiştir. Çevre dostu olması, daha düşük maliyet vb. gibi çeşitli yönlerden daha avantajlı olduğu savunulan aerobik yöntemin anaerobik yöntem nazaran tercih edilebileceği vurgusu yapılmıştır (Marrero ve ark., 2015).

Laterit cevherlerin işlenmesinin nikel talebini karşılamak ve Fe, Co, Cu, Sc ve V gibi metallerin kazanımına katkıda bulunmak için bir çözüm olduğu yaygın olarak kabul edilse de, azaltılmış enerji ve reaktif girdilerine izin veren yeni ve sürdürülebilir işleme yöntemleri hala eksiktir. Bu sebeple laterit cevherlerden biyoliç yöntemiyle nikel eldesi ticari ölçekte uygulanamamaktadır. Ancak konuyla ilgili yapılan araştırmalar devam etmektedir. Literatürde bulunan birkaç çalışma daha aşağıda özetlenmiştir.

Hosseini Nasab ve ark (2021) Kobalt ve nikel gibi değerli metallerin doğrudan ve dolaylı biyoliçini araştırdıkları çalışmada, demir açısından zengin laterit cevherden biyoliç yöntemi ile ekstraksiyon için asidofilik heterotrof *Delftia acidovorans* ve asidofilik ototrof *At. ferrooxidans* bakterilerini kullanmıştır. Her iki bakteriyi de aynı koşullarda ürettikten sonra, metabolik ürünleriyle 90 °C, 3 saat ve 370 dev/dk karıştırma hızında liç işlemi uygulanmıştır. Dolaylı biyoliçten elde edilen sonuçlarda; *At. ferrooxidans* ve *Delftia acidovorans* süpernatantlarının sırasıyla %83,65 ve %80,18'e varan yüksek nikel kazanım gösterdiği raporlanmıştır. Bununla birlikte; *Delftia acidovorans*'ın

dolaylı biyoliçinin, 30°C'de çalkalayıcı inkübatörde (150 dev/dk) 30 gün boyunca gerçekleştirilen doğrudan biyoliçiye nazaran daha efektif olduğu gösterilmiştir. Dolaylı biyoliçte aktivasyon enerjilerine bakılarak etkili mekanizmanın kimyasal olarak kontrol edilen bir reaksiyon ile gerçekleştiği ayrıca belirtilmiştir

Laterit madencilğinde genellikle atık ürün olarak kabul edilen limonitlerden nikel ve kobalt gibi metallerin biyoliç yöntemi ile kazanımının araştırıldığı bir çalışmada, oksitlenmiş minerallerin indirgeyici çözünmesini katalize etmek için asidofilik bakteriler kullanılmıştır. Özellikle *Acidithiobacillus sp.* suşunun etkisinin araştırıldığı bu çalışmada, elementer sülfürün (ES) aerobik biyo-oksidasyonunun, oksitlenmiş demir ve manganez minerallerinin çözünmesiyle tüketilen dengeyi sağlamak için yeterli asitliği üretebilmesine rağmen indirgeyici süreci hızlandıran düşük redoks potansiyellerinin gelişimini engellediği ancak, demir tüketen türlerin ise elementel kükürtün anaerobik oksidasyonu ile bu durumu aştığı, gösterilmiştir. Demir solunumu yapmayan, *Acidithiobacillus spp.*'nin saf kültürlerinde *At. thiooxidans* ve *At. caldus*' un demiri sınırlı indirgeme gösterdiği bulunmuştur. "gizli demir indirgemesi" fenomeninin havalandırılmış kültürlerde ve biyoreaktörlerde gözleendiği ve kullanılan elektron donöründen (elementer kükürt veya hidrojen) bağımsız olduğu raporlanmıştır (Johnson ve ark., 2021).

Bir başka çalışmada, nikel lateritinin atmosferik basınçta asitle yıkama uygulamasının, yüksek asit tüketimi ve liç solüsyonunda yüksek nihai demir konsantrasyonu gibi iki önemli sorununun çözümü için pirometalurjik ve biyo-hidrometalurjik olmak üzere iki yeni yöntem tasarlanmıştır. Deney düzeneği, bir nikel limonitik cevherin hidrojen gazı ile döner bir fırında 900°C'de götütün tamamı metalik demire dönüştürülene kadar indirgenmesini içermektedir. Sonrasında indirgenmiş numuneye Fe²⁺ üzerinde büyüyen mezofilik mikroorganizmalar (*At. ferrooxidans*) kullanılarak (35 Kg H₂SO₄/ton) indirgenmiş cevher ile biyoliç yapılmıştır. Sonuçta, nikelin %92'sinin ve kobaltın %35'inin çözündüğü gözlenmiştir. Bununla birlikte, düşük asit tüketimi ve liç çözeltisinde nihai toplam demir konsantrasyonunun (< 200 mg/L) düştüğü raporlanmıştır (Oliveira ve ark., 2021).

Chen ve ark (2011) biyoliç üzerine yaptığı bir çalışmada, termofilik bir bakteri olan *Sulfolobus metallicus* türü kullanılmıştır. Deney aşamasında membranlı ve membransız biyoreaktör olarak iki şekilde biyoliç yapılmıştır. Nikel-molibden sülfür cevherinden Ni ve Mo metallerinin kazanımını amaçlamışlardır. Her iki yöntemde %10 katı oranı, 65°C sıcaklık ve 1 L/dk hava olacak şekilde ayarlanmıştır. 20 gün süren deneyin sonuçları membransız biyoreaktörde; Ni ve Mo metalleri için sırasıyla %79,57 ve %56,23 olarak bildirilirken membranlı biyoreaktör sonuçları %75,59 Ni ve %54,33 Mo olarak raporlanmıştır.

Biyoliçin araştırıldığı bir çalışmada *At. ferrooxidans* türü ile yüksek magnezyum ve nikel içeren piritin cevherini kullanarak biyoliç deneylerini gerçekleştirmişlerdir. Çeşitli parametrelerin optimizasyonu ile %5 katı oranı, 30 °C sıcaklık ve 180 dev/dk/ çalkalama hızının en iyi sonuç verdiğini göstermişlerdir. Ayrıca; kullandıkları cevherde kalkopirit ve piritin varlığının öneminden

bahsetmişlerdir. Deneyde kullanılan *At. ferrooxidans* türünün en iyi pH 2,0'de gelişim gösterdiği vurgulanmıştır. Deney sonuçları incelendiğinde; metal kazanımlarının nikel için %88, kobalt için %78, bakır ve magnezyum için de sırasıyla %45 ve %50 olduğu raporlanmıştır (Ke ve Hongmei, 2006).

Stanković ve ark (2022) yaptıkları çalışmada, Brezilya'daki Barro Alto madeninden çıkan 4 limonitik laterit numunesinin detaylı kantitatif mineralojik incelemeye almış ve ardından biyoliç ve kimyaslılı çalışmaları gerçekleştirmişlerdir.

Biyoliç deneyleri saf kültür *Acidithiobacillus* bakterileri kullanılarak 2L'lik reaktörlerde elementel kükürt ilavesi ile gerçekleştirilmiştir. Deneyleri kükürt oksitleyici asidofilik bakteri *At. thiooxidans* ve *At. caldus* ile aerobik koşullar altında ve *At. ferrooxidans* ile anaerobik koşullar altında gerçekleştirmişlerdir. Lateritlerin *At. thiooxidans* ve *At. caldus* ile aerobik biyolojik liçini, sırasıyla 1,0 ve 1,1'lik düşük pH'larda, *At. ferrooxidans* ile pH 1,5'te gerçekleştirmişlerdir. Deneyler sonucunda aerobik liçte anaerobik biyoliçten daha yüksek bir Ni ve Co ekstraksiyonu olduğunu bildirmişlerdir. Kobaltın biyoliç ile ekstraksiyonun %68-88 aralığında, nikel ekstraksiyonun ise %17-%56 aralığında olduğu bildirilmiştir. Mineralojik ve jeokimyasal analizlerle (XRD, SEM MLA, DSC, LA-ICP-TOFMS, XRF), kobaltın çoğunlukla, kükürdün oksidasyonu sırasında bakteriyel metabolizma tarafından üretilen ferrik demir ile indirgindikten sonra çözünen Mn açısından zengin mineral fazlardan salındığını, götütün tüm numunelerde neredeyse tamamen çözüldüğünü ve nikelin çoğunlukla Mn bakımından zengin mineral fazlardan ve magnezyum silikatlardan salındığını ortaya koymuşlardır.

Simate ve ark (2009) çalışmalarında nikel lateritlerinin bakteriyel liçinde, liç ortamına elementel kükürt veya pirit (FeS_2) ekleyerek etkinliği araştırmıştır. *At. ferrooxidans*, *At. caldus* ve *Leptospirillum ferrooxidans*'ın karışık kültürleri biyoliç deneylerinde kullanılmıştır. Bir aylık liç süresi sonunda çözünen nikel ve pH değişimleri ölçülmüştür. Kükürt kaynağı olarak Elementel kükürdün piritten önemli ölçüde daha iyi sonuçlar verdiği bildirilmiştir. Nikel kazanımı ilk başlarda pirit varlığında sülfür varlığına nazaran daha yüksektir. Ancak, bu yükseklik ilk liç aşamalarında çok aktif olmamasına atfedilir. Bu aşamaya, substratların abiyotik oksidasyonu baskın faktördür. Asidik pH seviyelerinde, elementel kükürt abiyotik oksidasyona karşı stabildir. Biyoliç sonunda elementel kükürt kullanıldığı zaman daha yüksek oranlarda Ni ve çözüldüğü (%60-65) ve daha düşük pH değerlerinin ölçüldüğünü bildirilmiştir.

Bir başka çalışmada lateritlerin yığın biyoliçi laboratuvar ölçekli kolon perkolatörlerinde simüle edilmiş, lateritik cevherden nikel ve kobaltın biyoliçi başarıyla gösterilmiştir (Stankovic ve ark.,2024). Deney kolon perkolatörlerinin içindeki bakteriyel olarak modifiye edilmiş "ıslak kükürtün" kükürt oksitleyen asidofilik bakteri *At. thiooxidans* tarafından biyooksidasyonuna dayanır. "Islak kükürt", bakteri kültürüyle bir biyoreaktörde üretilmiş, hasat edilmiş ve perkolatör kolonlarına doldurulacak aglomeralar oluşturulmadan önce lateritik cevherle karıştırılmıştır. Liç solüsyonu 8 ml/dakika akış hızıyla dolaştırılmıştır. Bir aylık biyoliçten sonra Piauí lateritik cevherinden

maksimum metal çıkarımı %66 nikel, %95 kobalt, %10 demir, %55 magnezyum ve %89 manganezd. Karşılaştırma yapmak gerekirse, indirgeyici olarak 10 g/L demir sülfat heptahidrat eklenerek veya eklenmeden 1 M sülfürik asitle yapılan kimyasal liç sonucunda yaklaşık %80 nikel, %86 kobalt, %33 demir, %50 magnezyum ve %81 manganez elde edilmiştir. Biyoliç ile daha yüksek kobalt çözünürken daha düşük nikel ve demir çözünmesi elde edildimiştir. Sonuç olarak lateritin biyoliçinde daha düşük CO₂ emisyonu ve demir atığı oluştuğu bildirilmiştir.

Meshkini ve Bayragh (2022) oksit tipteki yaptıkları araştırmada cevherletipindedir ve bu araştırmada nikel sülfür cevherleri için yaygın olarak kullanılan bakteriler (*Acidithiobacillus*) ile mikrobiyal liç deneyleri yapmışlardır. Numunenin karakterizasyonu, nikel derecesinin yaklaşık %1,14 olduğunu ve bunun demir matrisinde dağıldığını göstermiştir. Mikrobiyal liç prosesinde, birincil deneyler, olumlu sonuçlar vermeyen bir 9K medyumu ortamında gerçekleştirilmiştir. Kültür ortamına kükürt gibi gerekli malzemelerin eklenmesiyle yeni deneyler gerçekleştirmişlerdir. Bu kültür ortamıyla yapılan birincil deneyler, 20 gün sonra cevher örneğindeki nikelin %21'inin ekstrakte edildiğini gösterdi. Mikrobiyal liç üzerindeki etkili parametreler arasında mikrobiyal liç süresi, kültür ortamına eklenen kükürt miktarı ve cevher miktarı yer alır. Yukarıdaki parametreler için optimum değerler sırasıyla 10 gün, %10 ve 10 g olarak bildirilmiştir. Optimum koşullarda maksimum nikel ekstraksiyon miktarının %65'e ulaştığı bildirilmiştir. Ayrıca çalışmada bu adımdan sonra, çöktürme (sodyum hidroksit ile) ve çözücü ekstraksiyon yönteminin bir kombinasyonu kullanılarak mikrobiyal liç çözeltilisinden demir kalıntıları giderilmiş ve son olarak, seçici bir organik çözücü (Cyanex 301 nikel için oldukça seçici bir çözücüdür) ekstraksiyonuyla 112 ppm'lik saf bir nikel çözeltilisi elde edilmiştir.

Hernandez ve ark (2009) yaptıkları çalışmada *At. thiooxidans* kültürleri tarafından üretilen sülfürik asit kullanılarak, farklı koşullar altında Caron prosesinin laterit artıklarından nikel ve kobalt kazanımlarını araştırmışlardır. Çalışmalarda, düşük pulp yoğunluklu laterit atıklarının (%1 ve %2,5) kullanılması durumunda 13 günlük liç sonunda yüksek nikel ve kobalt geri kazanımlarına (%60 civarında kobalt ve %85-100 nikel) ulaşılmıştır. Bu yüksek geri kazanımlar, düşük pH değerleriyle uyusmaktadır. Ancak, daha yüksek pulp yoğunlukları çalışıldığında metal geri kazanımlarının ihmal edilebilir düzeyde olduğunu bildirmişlerdir. Bu sebepten, ön-kültür çalışmaları yapılmıştır. Bu amaçla kültürler 24 veya 48 saatlik bakteriyel büyümeden sonra laterit artıkları eklemiştir. Bu deneylerde yüksek pulp yoğunluğunda bile (örneğin %10) çok etkili sonuçlar alındığı bildirilmiştir. (kobalt için neredeyse %50 ve nikel için %80) ulaştı.

Petrus ve ark (2018) yaptıkları çalışmada deneyde Güney Sulawesi'deki Pomalaa'dan elde edilen nikel laterit cevheri ile yaptıkları çalışmada, liç ajanı olarak, optimum koşullar altında *Aspergillus niger* tarafından üretilen metabolik sitrik asit kullanmışlardır. Liç prosesi atmosferik sıcaklıkta ve 200 dev/dk sabit karıştırma hızında gerçekleştirilmiştir. Deneyde incelenen değişken, pulp yoğunluğu ve nikel laterit cevherinin tanecik boyutudur. Örnekler 3, 7, 10, 14 ve 17. dakikalarda alındı ve daha sonra filtrelendi ve ICP-OES kullanılarak analiz edilmek üzere seyreltildi.

Deneyin sonucu, metallerin maksimum geri kazanımının pülp yoğunluğunun azalmasıyla arttığını gösterdi. Değişen pulp yoğunluğu için maksimum geri kazanım %5 katı/sıvı oranında elde edilmiş olup geri kazanımlar Ni için %1,63, Al için %0,47, Fe için %0,23 ve Mg için %1,09 olmuştur. Tanecik boyutları kıyaslandığında(60 -75 mesh, 100-120 mesh ve 200 mesh)metallerin maksimum geri kazanımı, 100-120 mesh'te %1,37 Ni, %0,10 Fe, %0,72 Al ve %0,62 Mg olarak bildirilmiştir.

Çiftçi ve ark (2018) Çaldağ yatağından (Manisa, Türkiye) temin edilen düşük tenörlü nikel laterit cevherinden nikel ve kobalt kazanımı için biyoliç ve kimyasal liç proseslerini araştırmışlardır. Biyoliç deneyleri için *Aspergillus niger* mantarını kullanılmışlardır. Parametrelerin pülp yoğunluğu ve sakaroz konsantrasyonu parametrelerinin biyoliç üzerine etkisi ön denemelerle belirlenmiştir. Kimyasal liç deneyleri organik asitler (sitrik, oksalik, asetik ve glukonik asitler) ve bu asitlerin karışımları kullanılarak biyoliç ile karşılaştırma amacıyla uygulanmıştır. Bildirilen sonuçlara göre, %25 (w/v) sakkaroz ve %1 (w/v) katı içeren biyolojik proseste nikel, kobalt ve demirin maksimum çözünme verimi sırasıyla %95,3, %74,3 ve %50,0 olarak tespit edilmiştir. Katı oranındaki artış *A. niger'in* biyokatalitik aktivitesini olumsuz etkilemiştir. Son olarak, reaktörlerde daha fazla test, erlen testlerinden elde edilen optimum koşullar kullanılarak gerçekleştirilmiş, Biyokatalitik ve kimyasal liç arasındaki metal geri kazanımı arasında önemli bir fark olduğu tespit edilmiştir.

3. MATERYAL ve METOD

3.1. Materyal

Bu çalışmada kullanılan nikel cevheri örneği Manisa-Gördes'deki laterit nikel madeninden alınmıştır. Çalışmada kullanılan mikroorganizmalar doğal izolatlardır, aktif çamurdan ve kömür madeni drenaj suyundan izole edilen bakterilerden 3A kodlu *Acidithiobacillus ferrooxidans* ile biyoliç deneyleri gerçekleştirilmiştir.

Tezle ilgili deneysel çalışmalar Çukurova Üniversitesi Biyoloji Bölümünde gerçekleştirilmiştir. Yapılan deneylerde, otoklav, Atomik Absorpsiyon Spektrometresi (AAS), santrifüj, pastör fırını, etüv, çalkalamalı inkübatör pH metre gibi temel laboratuvar cihazları ve cam malzemeler kullanılmıştır.

Elementel kükürt (S), sülfürik asit (H₂SO₄), nitrik asit (HNO₃), sodyum hidroksit (NaOH) ve standart nikel (merck 119792) solüsyonu deneysel çalışmalarda kullanılan kimyasallardır.

3.1.1. Cevher Örneği

Deneysel çalışmalarda kullanılan lateritik nikel cevheri, Manisa il merkezine 115 km uzaklıkta Akhisar'ın 70 km kuzey doğusunda yer alan Gördes ilçesine 20 km uzaklıktaki Kabakoz Köyü mevkiinde konumlanan Meta Nikel Kobalt AŞ'nin işletmekte olduğu ruhsatlı maden işletmesinden temin edilmiştir.

Nontronit ve limonit olmak üzere 2 farklı zondan alınarak stok sahasında depolanan; kırılmış tüvenan cevher munelerinen temin edilmiş ve biyoliç çalışmalarında kullanılmıştır.

3.1.2. Mikroorganizmalar

Tez çalışmasında kullanılan mikroorganizmalar doğal izolatlardır. Çalışmanın ilk aşaması olarak bakteri izolasyonu gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla Adana Organize Sanayi Bölgesi (AOSB) atık su arıtma tesisinden alınan aktif çamur (biyolojik arıtma uygulayan tesislerin çökeltim havuzlarında oluşan mikroorganizma yüklü arıtım çamuru), EÜAŞ (Elektrik Üretim Anonim Şirketi.) Afşin-Elbistan (Kahramanmaraş) termik santrali kömür sahasından alınan toprak örnekleri ve kömür işleme sahasındaki drenaj kanallarının çıkışından alınan drenaj suyu (yer altı suyu) numunelerinden *Acidithiobacillus* cinsi bakteriler izole edilmiştir.

3.1.3. Besiyerleri

Bakterilerin izolasyonu, çoğaltılması ve biyoliç deneyleri için kullanılan besiyerleri aşağıda açıklanmıştır.

Çoğaltma Besiyeri

Bakterileri çoğaltma ortamı olarak 71 nolu DSMZ (Deutsche Sammlung Von Mikroorganismen und Zellkulturen) besiyeri modifiye edilerek kullanılmıştır. Demir oksidasyonu yapabilen türleri çoğaltmak için; demir (II) sülfat ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$), kükürt ve indirgenmiş sülfürlü birleşikleri okside edebilen türleri çoğaltmak için sodyum tiyosülfat ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) enerji kaynağı olarak besiyerine eklenmiştir.

Bileşim	g/L
K_2HPO_4	0,5
$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	0,2
$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$	0,5
$\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O} / \text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	25/5
$\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	0,25

Distile su ile son hacim 1 L'ye tamamlanmıştır. Demir sülfatlı besiyerinin pH'sı 1,9 sodyum tiyosülfatlı besiyerinin pH'sı 4,2'dir.

Çalışmada Kullanılan İzolasyon Besiyeri

Bakteri izolasyonu için %2 agaroz içeren DSMZ'nin modifiye edilmiş 71 nolu besiyeri kullanılmıştır. Demir sülfat içeren besiyerinin pH'sı 2,5- 3, sodyum tiyosülfat içeren besiyerinin pH'sı 4-4,5 arasındadır.

Bileşim	g/L
K_2HPO_4	0,5
$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	0,2
$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$	0,5
$\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O} / \text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	25/5
$\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	0,25
Agaroz	20

Distile su ile son hacim 1 L'ye tamamlanmıştır.

Biyoliç Deneylerinde Kullanılan Besiyeri Ortamı

Biyoliç deneyleri için DSMZ' nin 71 nolu besiyeri modifiye edilmiştir. Modifiye edilen besiyerinin pH' sını 1N sülfürik asit ile 2,0'ye ayarlanmıştır. Daha sonra %1 oranında elementel kükürt besiyerine eklenmiştir.

Bileşim	g/L
K ₂ HPO ₄	0,85
MgSO ₄ .7H ₂ O	0,5
(NH ₄) ₂ SO ₄	0,85
S	10
CaCl ₂ .2H ₂ O	0,25

Distile su ile son hacim 1 L'ye tamamlanmıştır.

3.2. Metod

Bu çalışmada gerçekleştirilen deneylerin aşamaları sırasıyla aşağıda verilmiştir. Çizelge 3.1. biyoliç deneylerinde uygulanan sabit ve değişken parametreleri göstermektedir.

1. Toprak ve su numunelerinden bakteri izolasyonu
2. İzole edilen bakterilerin tanımlanması
3. *Acidithiobacillus sp.* olduğu belirlenen bakteriler arasından sülfürik asit üretme potansiyeli en yüksek olan suşun seçimi
4. Belirlenen parametrelerle biyoliç deneylerinin gerçekleştirilmesi.

Çizelge 3.1. Biyoliç deneylerinde uygulanan sabit ve değişken parametreler.

Mikroorganizma türü (sabit)	<i>At. ferrooxidans</i>
Pülp yoyunluğu (Değişken)	%1,5, %2,5, %5
Karıştırma hızı (Sabit)	150 dev/dk
Başlangıç pH'sı (Değişken)	2, 2,5
Sıcaklık (Değişken)	25°C, 30°C, 35°C
Tanecik Boyutu (Değişken)	-0,038 mm, -0,063 mm, -0,5 mm
Biyoliç Süresi (Sabit)	32 gün
Elementel kükürt oranı (Sabit)	%1
Cevher tipi (Değişken)	limonit, nontronit

3.2.1. Bakteri İzolasyonu

Bakterilerin doğal habitatlardan izolasyonu amacıyla 3 ayrı numuneden (aktif çamur, maden drenaj suyu ve kömür sahasından alınan toprak örneği) çoğaltma besiyerine ekim yapılarak ön zenginleştirme gerçekleştirilmiştir.

Ön zenginleştirme için, her bir numuneden, 500 mL çoğaltma besiyeri içeren 1L'lik erlenlere %10 oranında ekim yapılmıştır.

Ekim gerçekleştirilen erlenler, çalkalamalı inkübatörde 30°C' de, 150 devir/dk'da 15 gün inkübasyona bırakılmıştır. İnkübasyon sonunda üreme olduğu gözlemlenen her bir erlenden seri sulandırma yapılarak izolasyon besiyerlerine yayma yöntemiyle ekim yapılmıştır. Şekil 3.1.'de demir(II) sülfat ve sodyum tiyosülfat içeren izolasyon besiyerlerinde bakteri gelişimi gösterilmiştir.



Şekil 3.1. İzolasyon Besiyerinde Bakteri Gelişimi (a: tiyosülfatlı besiyerinde bakteri gelişimi, b: demirli besiyerinde bakteri gelişimi)



Şekil 3.2. Demir içeren besiyerinde mikroorganizmanın 10 günlük gelişimi (soldan sağa: 2.gün, 4.gün, 7.gün ve 10.gün)

Ekim yapılan petriler etüve alınmış, 30°C'de 10 gün inkübe edilmiştir. İnkübasyon sonunda tek düşen koloniler seçilerek tekrar çoğaltma besiyerine alınmıştır. 3-10 gün süreyle çoğaltılan saf kültürlerin gliserol stoğu yapılmış, sonraki çalışmalarda kullanılmak üzere -20°C'de saklanmıştır. Şekil 3.2. ve şekil 3.3.'te bakterilerin çoğaltma besiyerinde gelişimi gösterilmiştir.

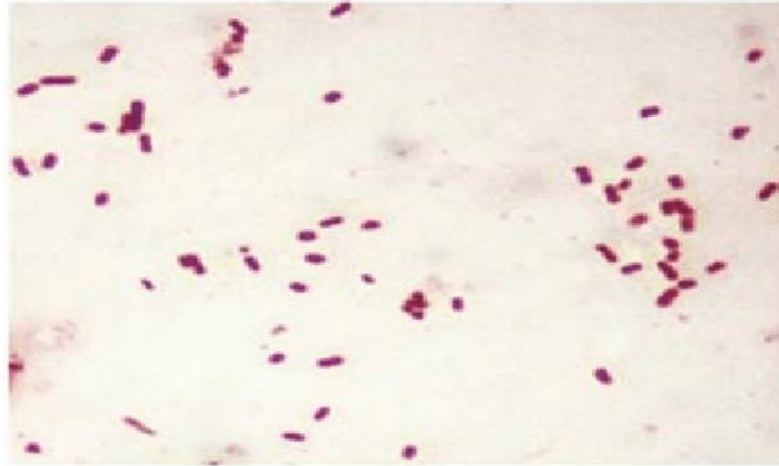


Şekil 3.3. Tiyosülfatlı Besiyerinde Bakteri Gelişimi

3.2.2. İzole Edilen Bakterilerin Tanımlanması

İzolasyonu gerçekleştirilen mikroorganizmaların gram boyaması yapılmış, mikroskopik incelemelerden sonra morfolojik olarak *Acidithiobacillus* sp. olabileceği düşünülen suşların tanımlanması moleküler tanı yöntemiyle gerçekleştirilmiştir. İzole edilen suşların tür düzeyinde tanımlanması için izlenen adımlar aşağıda sıralanmıştır:

1. Gram boyama yapılmış ve mikroskopla incelenmiştir (Şekil 3.4.).



Şekil 3.4. 3A Suşunun Gram Boyaması

2. Ticari DNA izolasyon kitiyle (Gene JET Genomic DNA Purification Kit – Thermo Fisher Scientific) genomik DNA izolasyonu gerçekleştirilmiştir.
3. 356F/1064R primerleri kullanılarak PCR (Polymerase Chain Reaction) ile 16S rRNA gen bölgesi çoğaltılmıştır. Daha sonra PCR ürünleri 1X TBE (Tris Borat EDTA) tamponu ile hazırlanan %1 agaroz jelde 100 V akımda 50 dakika yürütülmüştür.

SafeView- RED boyası içeren jel UV ışığı altında görüntülenerek bant oluşumu kontrol edilmiştir. Çizelge 3.2.'de PCR reaksiyonu karışımı, Çizelge 3.3.'de PCR koşulları verilmiştir.

Çizelge 3.2. PCR reaksiyonu karışımı

Bileşen	Stok Konsantrasyonu	Reaksiyon Konsantrasyonu
PCR Buffer	10X	1X
MgCl ₂	25mM	2,5 mM
dNTP mix	20 mM	0,2 mM
F Primer	10 µM	0,25 µM
R Primer	10 µM	0,25µM
Taq DNA Polymerase	5U/ µl	2U
Template DNA (hacim)	2µl	
Reaksiyon Hacmi	40µl	

Çizelge 3.3. PCR koşulları

Döngü	Döngü Süresi	Sıcaklık
1	4 dk.	95°C
35	50 sn.	95°C
	45 sn.	57°C
	50 sn.	72°C
1	4 dk.	72°C

- 16S rRNA geninin dizi analizi hizmeti alımıyla BM LABOSİS firmasına yaptırılmıştır. Firma dizi analizinde ABI 3730 XL sanger dizileme cihazı ve Big Dye Terminator v3.1 Cycle dizileme kiti kullanmıştır.
- Dizi analizinden elde edilen okumalar, bir konsensus dizisi oluşturmak amacıyla kontig haline getirilmiştir. Bu işlemin gerçekleştirilmesinde BioEdit Sequence Alignment Editor programı kullanılmıştır.
- BioEdit programıyla oluşturulan dizilerin NCBI web sitesi üzerinden BLAST analizi gerçekleştirilerek izolatların en yakın benzerlik gösterdiği türler tespit edilmiştir.

3.2.3. Cevher Numuneleri

Meta Nikel Kobalt A.Ş. firmasının Manisa-Gördes ilçesinde bulunan lateritik nikel cevher yatağından üretilerek birincil kırma işlemine tabi tutulduktan sonra stok sahasında ayrı ayrı depolanan iki farklı zondan (limonit ve nontronit) temsili olarak yaklaşık 30'ar kg numune ($d_{100} = 25$ mm) alınmıştır.

Cevher Numunelerinin Hazırlanması

Öncelikli olarak stok sahasından bölüm laboratuvarlarına getirilen numune konileme-dörtleme yöntemleri ile numune azaltma işlemlerine tabi tutularak öğütme işlemlerine hazır hale getirilmiştir. Bilyalı değirmen ile iki farklı zondan alınan numuneler ayrı ayrı öğütme işlemine tabi tutulmuştur. Öğütme işlemi kuru ortamda gerçekleştirilmiştir. Öğütme işlemi sırasında sabit tutulan diğer parametreler: numune miktarı 1 kg, öğütme süresi 30 dk, değirmen dönüş hızı 60 dev/dk, bilya miktarı: 15 kg'dır. Biyoliç deneylerinde kullanılmak üzere öğütülen numune kuru eleme işlemi ile d_{100} değerleri 0,5 mm, 0,063 mm ve 0,038 mm olacak şekilde üç farklı tane boyut dağılımında hazırlanmıştır (Şekil 3.5.).



a



b



c

Şekil 3.5. Farklı Tanecik Boyutundaki Limonit ve Nontronit tipi Cevherler (a: Nontronit tipi cevher, b ve c: Limonit tipi cevher)

Cevher Numunelerinin Kimyasal Analizi

Temsili olarak hazırlanan numunelerin kimyasal içeriği Çukurova Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümünde bulunan Panalytical MiniPal marka XRF (X-ışınları Floresans Spektrometresi) ile belirlenmiştir.

Cevher numunelerinin minerolojik bileşimini belirlemek için Çukurova Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarından hizmet alımı yapılmıştır. Analizler Panalytical marka Empryan XRD cihazı ile gerçekleştirilmiştir.

3.3. Biyoliç Deneylerinde Kullanılacak Suşun Seçilmesi

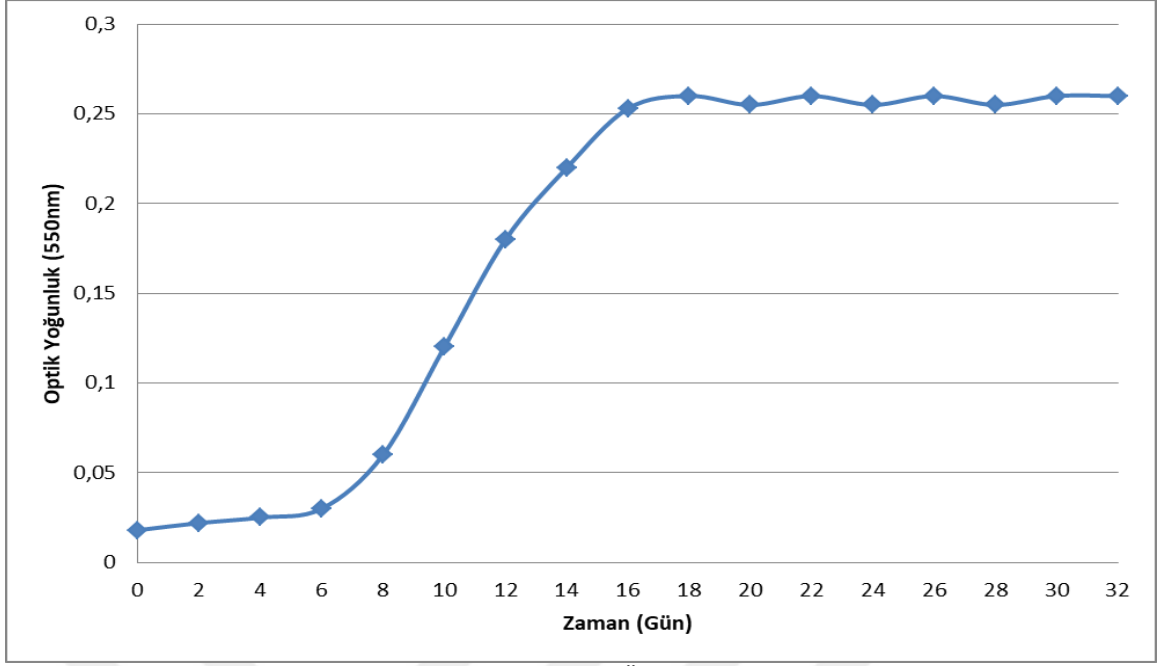
Biyoliç deneylerinde bakterinin sülfürik asit üretimine bağlı olan dolaylı biyoliç yönteminin gerçekleştirilmesi hedeflenmiştir. Bu nedenle suş seçiminde mikroorganizmanın asit üretme kapasitesi dikkate alınmıştır. İzole edilen ve tanımlanan 8 adet *At. ferrooxidans* suşu 15 gün, başlangıç pH'sı 2,0 olan çoğaltma besiyerinde üretilmiş, 15 günün sonunda pH ölçümleri gerçekleştirilmiştir.

3.4. Bakteri Kültürünün Hazırlanması

Bu çalışma boyunca kullanılan mikroorganizma doğal izolat *At. ferrooxidans*'dır. Bakteri biyoliç çalışmalarından önce 1L'lik erlende 250 mL hacimde, cevher içermeyen biyoliç besiyerinde (Bölüm 3.1.3.3.) üretilmiştir.

Kükürt içermeyen besiyerinin pH'sı sülfürik asitle pH 2,0'ye ayarlanmış 121°C'de 15 dakika otoklavda sterilize edilmiştir. Gliserol stoktan %20 oranında bakteri inokülasyonu yapılmıştır. İnokülasyondan sonra daha önce ayrı olarak steril edilen kükürt, besiyeri yüzeyine ilave edilmiştir. Elementel kükürt 3 gün üst üste 95°C'lik pastör fırınında 60 dk muamele edilerek steril edilmiştir.

Bakteri kültür yoğunluğu Thermo Scientific Multiskan Go UV-Görünür spektrofotometre kullanılarak süspansiyon bulanıklığının 550 nm'de ölçülmesiyle 32 gün takip edilmiştir (Şekil 3.6.).



Şekil 3.6. Bakteri Üreme Eğrisi

3.5. Biyoliç Deneyleri

Biyoliç deneyinin gerçekleştirilmesi için izlenen adımlar aşağıda sıralanmıştır. Bunlar;

1. Biyoliç deneyleri için ilk olarak, 250 mL'lik erlenler içerisinde 90 mL hacimde S içermeyen biyoliç besiyerleri otoklavda 121°C'de 15 dakika steril edilmiştir.
2. Besiyerlerinin pH'sı yapılacak deneye göre 2 veya 2,5 olacak şekilde sülfürik sit ile ayarlanmıştır.
3. Cevher numuneleri 3 gün üst üste 95°C'de pastör fırınında 60 dakika bekletilerek steril edilmiştir. Steril edilen cevher numuneleri çalışılacak pülp yoğunluğuna uygun miktarlarda erlenlere eklenmiştir.
4. Cevher eklenmesinden sonra erlenler 2 dakika karıştırılmış, pH kontrolleri yapılarak tekrar başlangıç pH'sı ayarlanmıştır (pH:2,0/2,5).
5. Bakteri inokülasyonu için biyoliç besiyerinde üretilen taze bakteri kültürü kullanılmıştır. Kültür yoğunluğu 0,1 absorbans değerine, yani ortalama $1-2 \times 10^8$ kob/mL'ye ulaştığında (8-11.gün) çalkalamalı inkübatörden alınmış, sülfürün tabana çökmesi için bekletilmiştir.
6. Çökme işleminden sonra kültürün üst kısmından 100 mL alınmış 50 mL'lik falkon tüplerinde 8000 dev/dk'da 10 dk santrifüj edilmiştir. Süpernatant kısım atılmış, pelletler başlagıç pH' sı ayarlanmış 100 mL biyoliç besiyerinde çözülmüştür. Çözünen pelletlerden inokülasyon %10 olacak şekilde (10 mL) yukarda anlatıldığı şekilde pH'sı ayarlanan her bir erlene ekim yapılmıştır.
7. Bakteri inokülasyonu yapılmayan erlenler kontrol grubu olarak kullanılmıştır.

8. Bakteri inokülasyonu yapıldıktan sonra ayrıca steril edilmiş S besiyerlerine eklmiştir.
9. Biyoliç işlemleri 150 dev/dk çalkalama hızında 30°C sıcaklıkta, çalkalamalı inkübatörde 32 gün gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.6).
10. Biyoliç süresi boyunca her 4 günde bir hem örnek hem kontrol gruplarından 3mL numune alınmış 8000 devir/dk.'da 10 dk santrifüj edilmiştir. Bakteri kaybını önlemek için pellet biyoliç ortamına geri dökülmüş, süpernatant kısım alınarak pH ve nikel ölçümleri gerçekleştirilmiştir.
11. Bakterinin logaritmik fazın sonuna yaklaştığı dönemde (16.gün) biyoliç ortamına pH değeri 2 olan 12 mL konsantre besiyeri eklenmiş böylelikle sıvı kaybı engellenirken bakteri kültürü de canlı tutulmuştur.



Şekil 3.7. Biyoliç Deneylerinin Gerçekleştirilmesi

3.6. Biyoliç Deneylerinde Çalışılan Parametreler

Nikel kazanımında optimum verimi sağlayacak şartların belirlenmesi için, başlangıç pH'sı, pülp yoğunluğu, tanecik boyutu ve sıcaklık parametreleri çalışılmıştır.

3.6.1. Pülp Yoğunluğunun Biyoliç Verimine Etkisinin Belirlenmesi

Pülp yoğunluğunun biyoliç verimine etkisini belirlemek için %1,5, %2,5 ve %5 oranlarda cevher içeren ortamlarda biyoliç çalışması gerçekleştirilmiştir. Her bir örnek için aynı oranda cevher içeren ve bakteri inokülasyonu yapılmamış kontrol grubu oluşturulmuştur.

Biyoliç deneyleri için örneklerin hazırlanması Bölüm 3.5.'te açıklandığı şekilde yapılmıştır. Biyoliç deneyleri eş zamanlı olarak 30°C sıcaklıkta 150 devir/dk çalkalama hızında gerçekleştirilmiştir.

3.6.2. Tanecik Boyutunun Biyoliç Verimine Etkisinin Belirlenmesi

Tanecik boyutunun biyoliç verimine etkisini belirlemek için incelenen literatür baz alınarak -0,038 mm, -0,063 mm ve -0,5 mm tanecik boyutlarına elenen cevherler kullanılmıştır. Farklı tanecik boyutundaki her bir örnek için kontrol grubu oluşturulmuştur. Pülp yoğunluğu her bir örnek ve kontrol grubu için %1,5'tir. Biyoliç deneyleri 30°C'de 150 devir/dk çalkalama hızında gerçekleştirilmiştir.

3.6.3. Başlangıç pH' sının Biyoliç Verimine Etkisinin Belirlenmesi

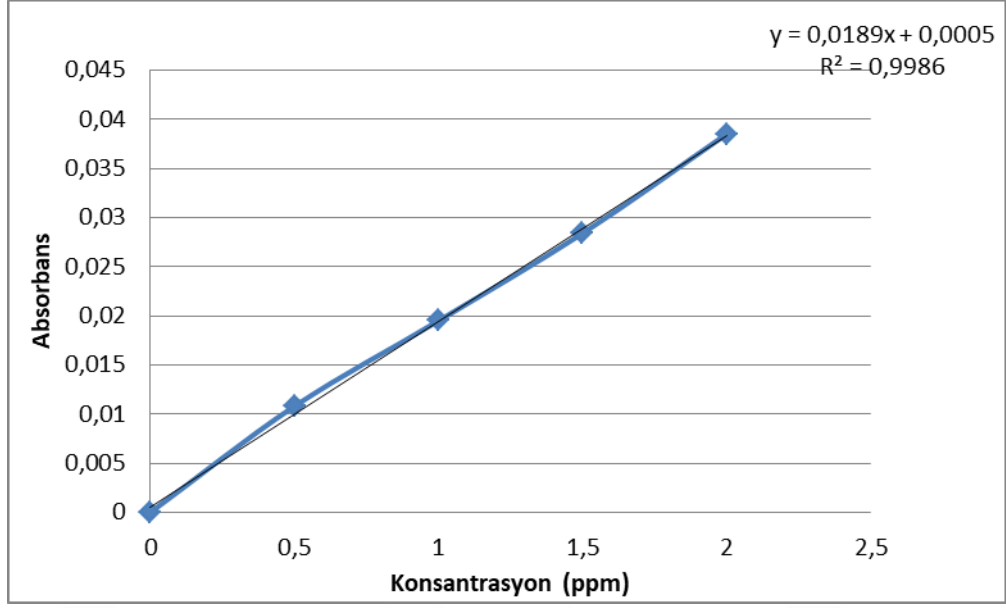
Başlangıç pH'sının biyoliç verimine etkisini belirlemek için başlangıç pH' ları 2,0 ve 2,5 olan biyoliç ortamları hazırlanmıştır. Her ortama %1,5 oranında cevher eklenmiştir. Cevherler eklendikten sonra pH değişimleri kontrol edilerek sülfürik asitle başlangıç pH' sına ayarlanmıştır.

3.6.4. Sıcaklığın Biyoliç Verimine Etkisinin Belirlenmesi

Sıcaklığın biyoliç verimine etkisini belirlemek için bakterinin gelişebileceği sıcaklıklar olan 25°C, 30°C ve 35°C sıcaklıklarda biyoliç verimi kıyaslanmıştır. Deneyler %1,5 pülp yoğunluğunda -0,063 mm tanecik boyutunda, 150 dev/dk çalkalama hızında başlangıç pH'sı 2,0 olan biyoliç ortamlarında gerçekleştirilmiştir. Biyoliç süresinin sonunda çözünen nikel miktarları belirlenmiştir.

3.7. Çözünen Nikel Miktarının Belirlenmesi

Biyoliç deneyleri boyunca 4 günde bir 3 mL örnekleme yapılmış, alınan örnekler 8000 dev/dk' da 10 dk santrifüj edilmiştir. Daha sonra numuneler %10' luk nitrik asitle 100 - 1000 kat arasında seyreltilmiştir. Her bir örneğin seyreltilme oranı farklıdır. Numunelerdeki nikel konsantrasyonu Çukurova Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümünde bulunan Atomik Absorpsiyon Spektrometresi (AAS, Perkin Elmer 900H) cihazı ile belirlenmiştir.



Şekil 3.8. Nikelin AAS ölçümlerinde kullanılan standart eğri grafiği

Çözeltideki Ni miktarı ppm olarak belirlendikten sonra liç verimi aşağıda verilen formülle yüzdesel olarak (%) olarak hesaplanmıştır:

$$\text{Çözünme Verimi (\%)} = \frac{a \times A}{b \times B} \times 100$$

a: Çözeltideki nikel konsantrasyonu (mg/L)

A: Çözelti hacmi (L)

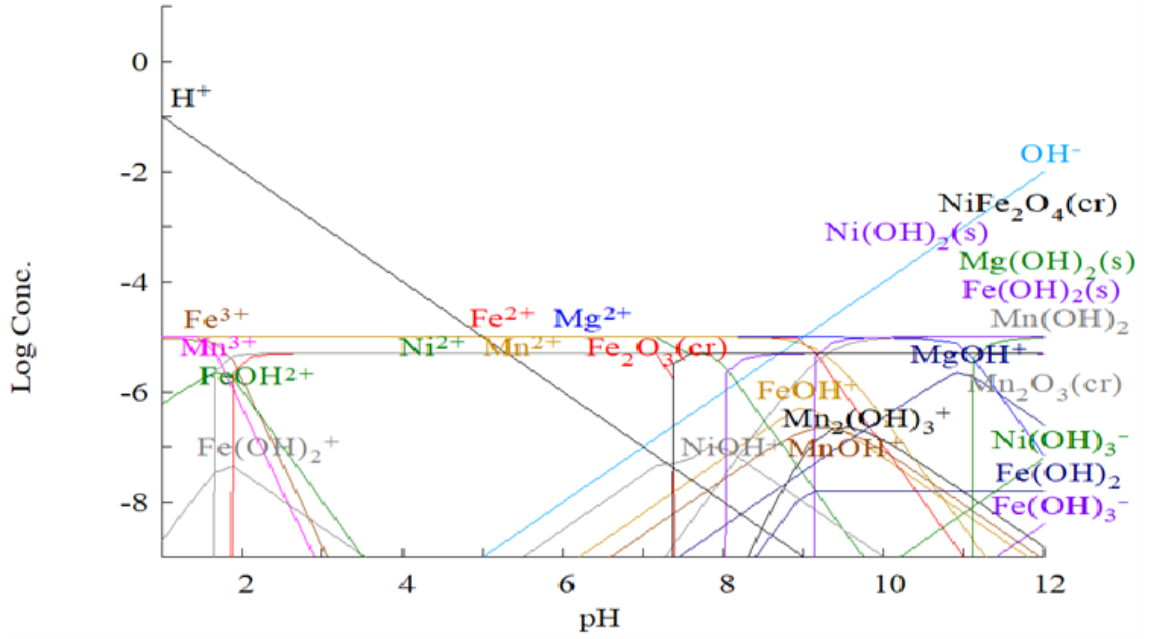
b: Cevherdeki nikel konsantrasyonu (mg/kg)

B: Ağırlık (kg)

3.8. Biyoliç Çözeltisinden Nikel Eldesi

Laterit cevherlerin biyoliçi ile elde edilen metal yüklü biyoliç çözeltilerinden Ni kazanımı için hidroksit çöktürme yöntemi kullanılmıştır. Hidroksit çöktürmede, çözünür metal iyonları ortama alkali çökeltme ajanı (örneğin; CaCO₃, NaOH, Ca(OH)₂, (NH₄)₂CO₃) eklenerek nispeten çözünmeyen metal-hidroksit çökeltilerine dönüştürülür. Metal çöktürme uygulamasından önce cevherlere ait XRF sonuçları göz önüne alınarak nikel ile birlikte çözülmüş olabileceği düşünülen Mg, Mn, Fe metallerinin biyoliç çözeltisindeki konsantrasyonu AAS ile belirlenmiştir. 1L hacminde biyoliç çözeltisinde 1M NaOH ile kademeli olarak çöktürme işlemi gerçekleştirilmiştir.

Çöktürme deneylerinde, metal hidroksitlerin pH'ya bağlı çökeltme grafiği (Şekil 3.9.) dikkate alınarak demir ve nikelin çöktürüleceği pH değerleri belirlenmiştir.



Şekil 3.9. Metal Hidroksitlerin pH'ya Bağlı Çökme Grafiği (Medusa programı ile çizilmiştir).

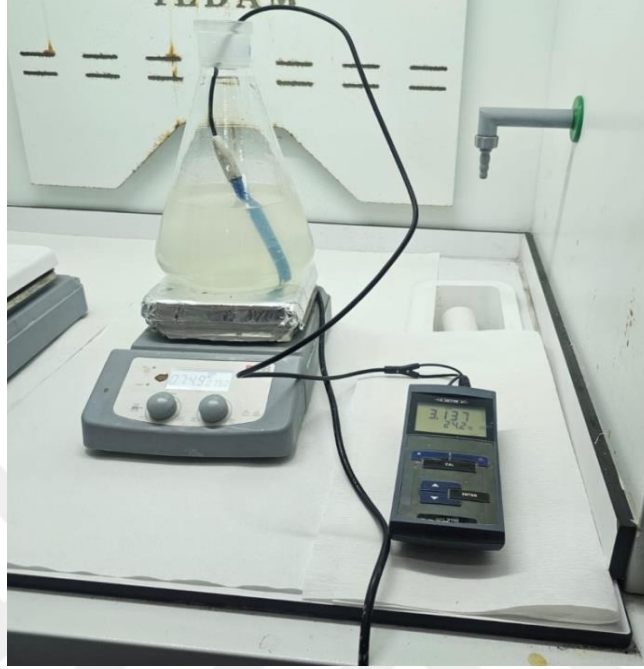
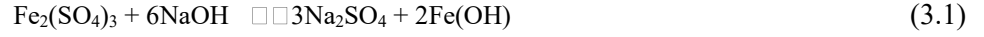
Çöktürme işlemleri sonrasında, çözeltilerde kalan metal konsantrasyonları AAS cihaz ile ölçülmüş, bu miktarlar baz alınarak çökelen metal miktarları belirlenmiştir.

3.8.1. Biyoliç Çözeltisinden Demirin Uzaklaştırılması

İlk olarak çeker ocak içerisinde manyetik karıştırıcı kullanılarak gerçekleştirilen çöktürme uygulamasıyla, demir biyoliç çözeltilerinden uzaklaştırılmıştır (Şekil 3.10.). Çöktürme uygulaması için aşağıda sıralanan işlemler gerçekleştirilmiştir. Bunlar;

1. 1,5 L haciminde biyoliç çözeltisi santrifüj edilerek (5000 dev/dk' da 10 dk) cevher kalıntısı çöktürülmüştür.
2. 1L haciminde süpernatant (biyoliç çözeltisi) manyetik karıştırıcıya alınarak alınarak 25°C sıcaklığa ısıtılmıştır.
3. Biyoliç çözeltisinin pH'sı, 1M konsantrasyondaki NaOH çözeltisinden kontrollü olarak eklenerek (44 mL) 3,75'e kadar yükseltilmiştir. Bu işlem 230 dev/dk karıştırma hızında gerçekleştirilmiştir.
4. pH 3,75'e yükseldikten sonra 35 dk karıştırma işlemine devam edilmiştir.
5. Çöktürme işleminin sonunda demir hidroksit çökeleğini uzaklaştırmak için çözelti 9000dev/dk'da 10 dakika boyunca santrifüj edilmiş, süpernatant daha sonraki çöktürme işlemi için ayrılmıştır.

Demirin baz ile çökeldiği eşitlik (3.1) aşağıda verilmiştir:



Şekil 3.10. Hidroksit Çöktürme Yöntemiyle Demirin Çöktürülmesi

3.8.2. Biyoliç Çözeltisindeki Nikelin Çöktürülmesi

Yüklü biyoliç çözeltisinden demirin uzaklaştırılmasından sonra nikelin çöktürülmesi planlanmıştır. Bu amaçla, pH'sı 3,75 olan biyoliç çözeltisinin pH'sı 1M NaOH (15 mL) kullanılarak kontrollü olarak pH 7,5'e kadar yükseltilmiştir. Çöktürme işlemi 230 dev/dk karıştırma hızında 25°C sıcaklıkta 35 dk'da gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.11.).

Nikelin ve nikkelle birlikte çökelen magnezyum ve mangan metalllerinin sodyum hidroksitle çökmesine ait eşitlikler:





Şekil 3.11.Hidroksit Çöktürme Yöntemiyle Nikelin Çöktürülmesi

Karışık metal hidroksit çökeltisinde nikelin % kaç saflıkta olduğu, çökeltideki nikelin ağırlıkça yüzdesi hesaplanarak bulunmuştur. Kullanılan formül aşağıda verilmiştir;

Nb-Ns

$$\text{Nikel Saflığı (\%)} = \frac{\text{Nb-Ns}}{(\text{Nb-Ns})+\text{Ds}} \times 100$$

Nb: Metal yüklü biyoliç çözeltilisinde ölçülen Ni konsantrasyonu (ppm)

Ns: Nikel çöktürme işleminden sonra biyoliç çözeltilisinde ölçülen nikel konsantrasyonu (ppm)

Ds: Nikel çöktürme işlemlerinden sonra nikel ile birlikte çöken diğer metallerin toplam konsantrasyonu (ppm)



4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Biyoliç denemeleri ile elde edilen nikelin çözünme sonuçları ppm ve yüzde (%) çözünme verimi olarak verilmiştir. Ayrıca biyoliç sürecinde takip edilen pH ölçümleri sunulmuştur. Tüm biyoliç denemeleri iki tekrarlı gerçekleştirilmiştir. Verilen sonuçlar iki deneyin ortalamasıdır.

4.1. Bakteri Suşlarının Tanımlanması

Aktif çamur ve maden sahası drenaj suyundan izole edilen 25 suş gram boyama yapılarak mikroskopta incelendikten sonra *Acidithiobacillus* cinsi olduğu düşünülen suşlar moleküler karakterizasyonla; 16 S'lik rDNA dizi analizi ile tanımlanmıştır. Blast sonuçlarına göre 12 izolatin *Acidithiobacillus* cinsi olduğu belirlenmiştir. Bu izolatlardan 4 tanesi *Acidithiobacillus thiooxidans* suşları ile %99 oranında benzerlik göstermiş, 8 tanesi ise *Acidithiobacillus ferrooxidans* suşları ile %99 oranında benzerlik göstermiştir.

Çizelge 4.1. İzolatlara ait 16 S'likr DNADizilerinin Blast Sonuçları

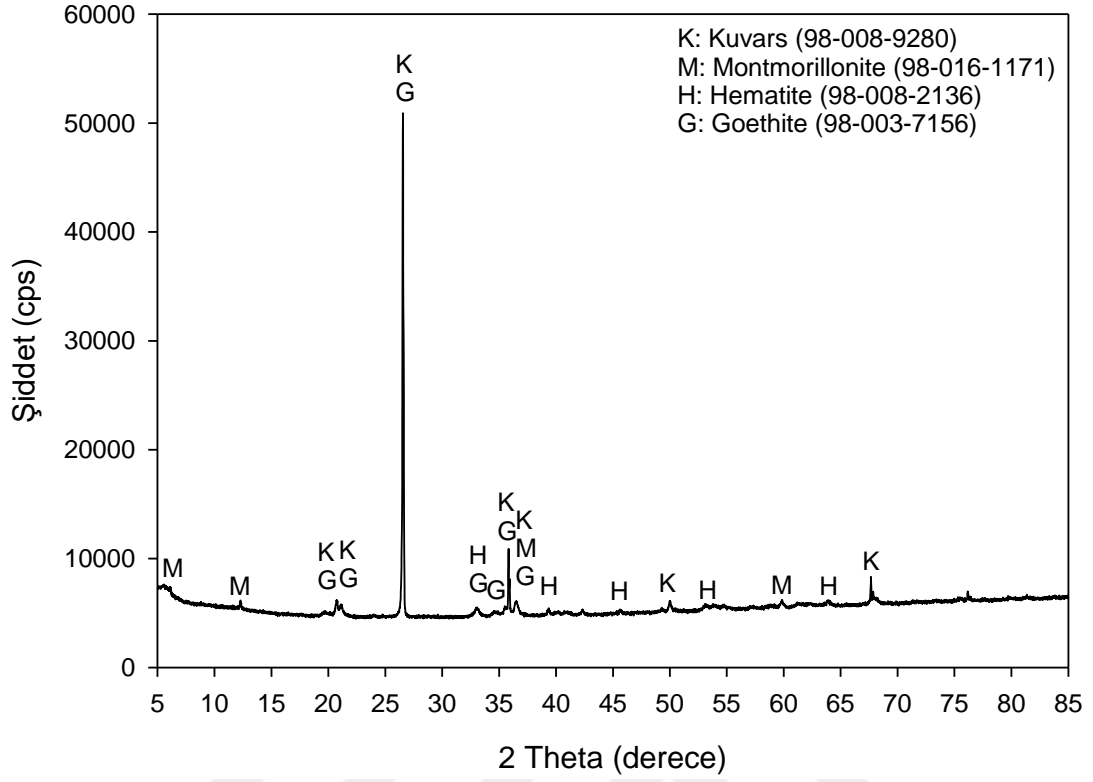
İzolatların Benzerlik Gösterdiği Suşlar	Benzerlik Oranı	Referans	Suş Kodu
<i>Acidithiobacillus ferrooxidans</i> strain BYQ-6 16S ribosomal RNA gene, partial sequence	99%	KY680338.1	4.1A
<i>Acidithiobacillus ferrooxidans</i> strain BYQ-4 16S ribosomal RNA gene, partial sequence	99%	KY680339.1	2A
<i>Acidithiobacillus thiooxidans</i> strain ATCC 14493 16S ribosomal RNA gene, partial sequence	99%	KX894822.1	1B
<i>Acidithiobacillus thiooxidans</i> strain ATCC 19703 16S ribosomal RNA gene, partial sequence	99%	KX894722.1	3B
<i>Acidithiobacillus thiooxidans</i> strain ATCC 15494 16S ribosomal RNA gene, partial sequence	97%	KX89552.1	M1
<i>Acidithiobacillus ferrooxidans</i> strain BYQ-4 16S ribosomal RNA gene, partial sequence	99%	KY680339.1	M3
<i>Acidithiobacillus ferrooxidans</i> strain BYQ 16S ribosomal RNA gene, partial sequence	99%	KY680339.1	3A
<i>Acidithiobacillus thiooxidans</i> strain ATCC 16703 16S ribosomal RNA gene, partial sequence	98%	KX894722.1	6B
<i>Acidithiobacillus ferrooxidans</i> strain BYQ-4 16S ribosomal RNA gene, partial sequence	99%	KY580434.1	1A
<i>Acidithiobacillus ferrooxidans</i> strain FY-3 16S ribosomal RNA gene, partial sequence	99%	KY680339.1	M8
<i>Acidithiobacillus ferrooxidans</i> strain 15 16S ribosomal RNA gene, partial sequence	98%	KY680339.1	8A
<i>At. ferrooxidans</i> strain NYQ-3 16S ribosomal RNA gene, partial sequence	%99	KP972121.1	6A

4.2. Cevher Örneklerinin Kimyasal Analizi

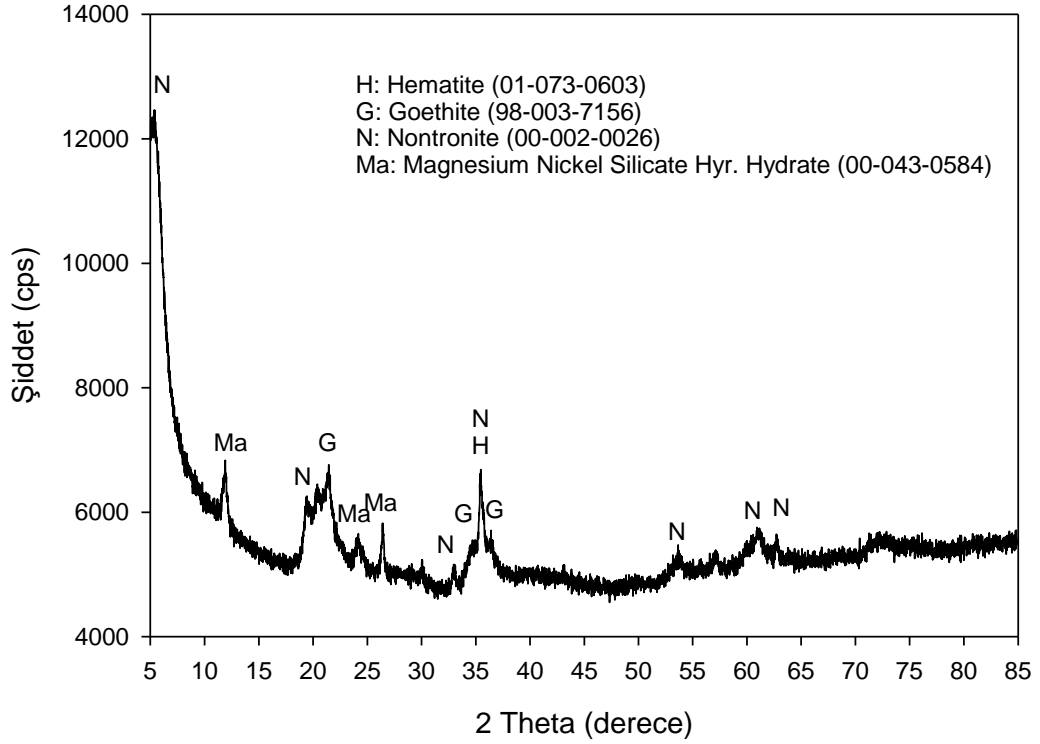
Limonit ve nontronit zonlardan alınan cevher numunelerinin element kompozisyonunu gösteren XRF analiz sonuçları Çizelge 4.2.'de verilmiştir. Bu sonuçlara göre limonit zon %1,29, nontronit zon %1,73 oranında nikel içermektedir. Cevher örneklerinin mineralojik bileşimini gösteren XRD grafik sonuçları Şekil 4.1. ve Şekil 4.2.'de verilmiştir.

Çizelge 4.2. Cevher numunelerinin XRF analiz sonucu

Bileşen Miktar (%) (Limonit zon)		Bileşen Miktar (%) (Nontronit zon)	
MgO	5,5	MgO	8,2
Al ₂ O ₃	7,67	Al ₂ O ₃	3
SiO ₂	31,8	SiO ₂	49,3
SO ₃	0,67	SO ₃	0,02
K ₂ O	0,28	K ₂ O	0,098
CaO	1,52	CaO	1,44
V ₂ O ₅	0,060	TiO ₂	0,112
Cr ₂ O ₃	1,86	Cr ₂ O ₃	1,005
MnO	0,55	MnO	0,37
Fe ₂ O ₃	45,91	Fe ₂ O ₃	30,69
NiO	1,65	NiO	2,21
ZnO	0,029	ZnO	0,02



Şekil 4.1. Limonit zondan alınan cevher numunesine ait XRD Grafiği



Şekil 4.2. Nontronit zondan alınan cevher numunesine ait XRD Grafiği

XRD sonuçlarına göre limonit cevherde başlıca götit ve hematit olmak üzere, montmorillonit ve kuvars mineralleri bulunmaktadır (Şekil 4.1.). Nontronit cevher de ise başta nontronit olmak üzere hematit, götit ve magnezyum-nikel silikat bulunmuştur (Şekil 4.2).

4.3. Biyoliç Deneylerinde Kullanılan Suşun Seçilmesi

Biyoliç deneylerinde kullanılmak üzere izolasyonu ve tanımlanması gerçekleştirilen 8 adet doğal izolat *Acidithiobacillus ferrooxidans* suşlarından cevher içermeyen besiyerinde üretilen bakterilerin 15 günlük kültürü sonucunda kükürt oksitleme açısından en aktif olduğu düşünülen suş seçilmiştir. Ortam pH'sını en çok düşüren bakteri en aktif suş olarak kabul edilmiştir. Çizelge 4.3'te verilen sonuçlara göre 3A kodlu bakteri suşu biyoliç deneylerinde kullanılmak üzere seçilmiştir.

Çizelge 4.3. *At.ferrooxidans* kültürlerinin başlangıç ve Son pH değerleri

İzole Edilen Suş Kodu	Başlangıç pH'sı	Son pH
4.1A	2	1,20
2A	2	1,25
M3	2	1,13
3A	2	0,92
1A	2	1,00
M8	2	1,08
8A	2	1,07
6A	2	1,05

4.4. Biyoliç Süresine Bağlı pH Değişimi

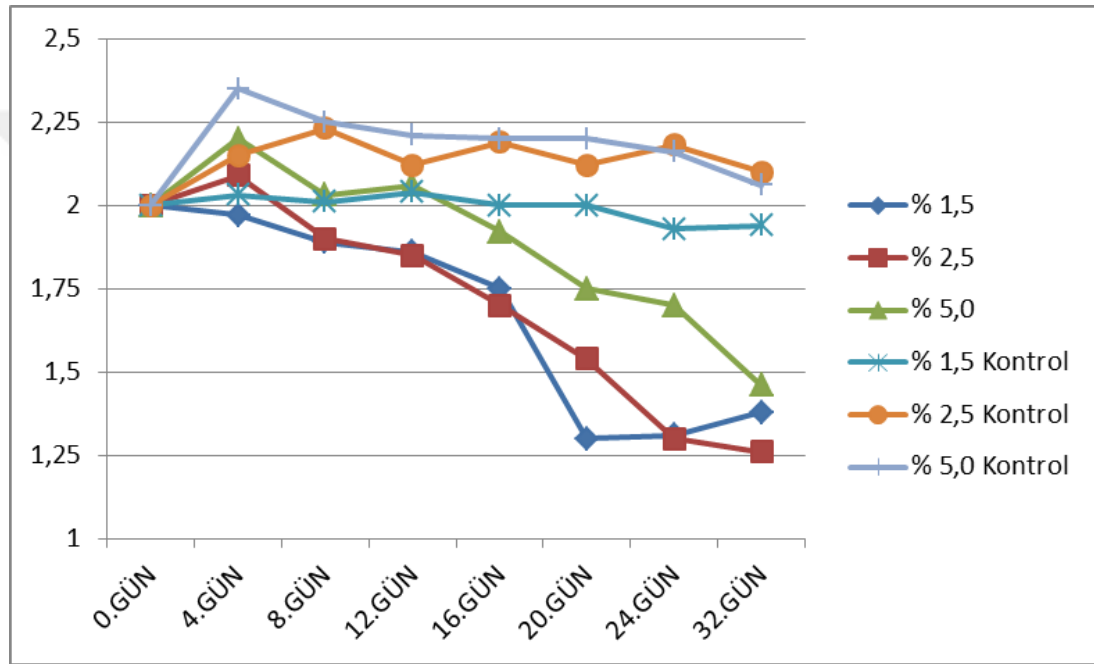
Acidithiobacillus cinsi mikroorganizmalarla yapılan biyoliç çalışmaları çoğunlukla mikroorganizmanın sülfürik asit üretmesiyle gerçekleştirilen dolaylı biyoliç yöntemidir (Kremser ve ark., 2022). Bu bölümde biyoliç deneylerinde çalışılan değişken parametrelere bağlı olarak biyoliç ortamındaki pH değişiminin zamana bağlı sonuçları grafiklerle verilmiştir. Grafiklere ek olarak bölüm sonunda tüm pH verileri çizelge olarak verilmiştir (Çizelge 4.4. ve Çizelge 4.5.). Tüm sonuçlar kontrol grubuyla birlikte verilmiştir. Kontrol grupları cevher ilave edilmiş ancak bakteri inokülasyonu yapılmayan besiyeri ortamıdır.

4.4.1. Pülp Yoğunluğuna Bağlı pH Değişimi

Yapılan biyoliç deneylerinde her iki cevher örneğinde de %1,5 %2,5 ve %5 pülp yoğunluğu kıyaslanmıştır. Çalışmada hem limonit hem de nontronit zonlardan alınan cevher örneklerinde pülp yoğunluğu arttıkça pH'da yükselmiştir. Başlangıç pH'sı 2,00 olan biyoliç deneylerinde liç süresinin sonunda limonit cevher örneğinde; %1,5, %2,5 ve %5 pülp yoğunluğunda sırasıyla 1,38, 1,26 ve 1,46 pH değerleri ölçülmüştür. Üç pülp yoğunluğunda da başlangıç pH'sına kıyasla net bir düşüş gözlemlenmiştir.

Zamana bağılı pH profili incelendiğinde, ilk 4 gün bakteri latent dönemde olduğu için %1,5 pülp yoğunluğunda pH sabit kalırken, %2,5 ve %5 pülp yoğunluğunda yükselmiştir. 4. günden itibaren üç pülp yoğunluğunda da pH düşmeye başlamıştır, %5 pülp yoğunluğunda ancak 16.günden itibaren başlangıç pH'sının altına düşmüştür. Bu farkın biyoliç verimini etkileyecek ölçüde olduğu düşünülmektedir.

Kontrol gruplarında %1,5 pülp yoğunluğunda pH sabit kalmış, %2,5 ve %5 pülp yoğunluklarında ilk 4 gün pH yükselmiş, biyoliç sonuna kadar başlangıç pH'sının üzerinde değerler ölçülmüştür. Sonuçlar kontrol grubuyla birlikte değerlendirildiğinde 3 pülp yoğunluğunda da bakterinin aktif olarak asit ürettiği anlaşılmaktadır.

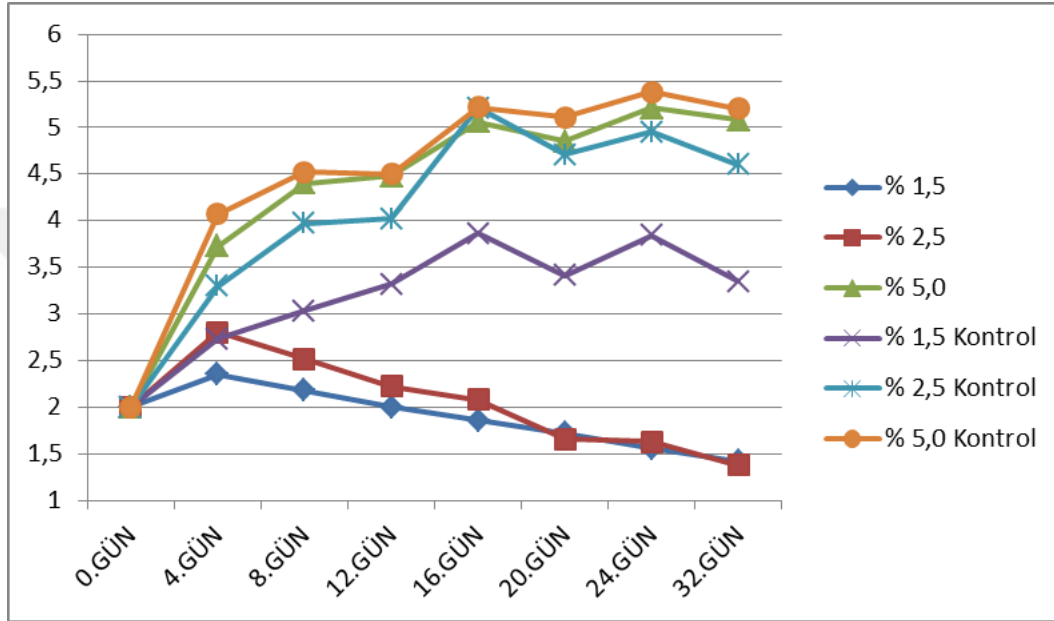


Şekil 4.3. Limonit Zondan Alınan Cevher Örneğinde Pülp Yoğunluğa Bağlı pH Değişimi (Deney koşulları: başlangıç pH:2,00, 150 dev/dk, 30°C, -0,063 mm tanecik boyutu)

Nontronit cevher örneğinde biyoliç süresinin sonunda %1,5, %2,5 ve %5 pülp yoğunluğunda sırasıyla 1,42, 1,38 ve 5,08 pH değerleri belirlenmiştir. Her üç pülp yoğunluğunda da pH değişim profili önemli farklılıklar göstermektedir (Şekil 4.4). %1,5 ve %2,5 pülp yoğunluğunda pH önce yükselmiş, %1,5 pülp yoğunluğunda 12. günden sonra, %2,5 pülp yoğunluğunda ise 16. günden sonra başlangıç pH'sının altına düşmüştür. %5 pülp yoğunluğunda ise ilk günden itibaren pH artmaya başlamış 16-20. günler arasında biyoliç ortamına besleme yapılmasına bağlı olarak pH azalsada, tekrar artış göstermiş ve 24. günden sonra dengeye gelmiştir.

Kontrol gruplarında her üç pülp yoğunluğunda da ilk günden itibaren pH yükselmiş ve 20.güne kadar yükselmeye devam etmiştir. 16. günden itibaren dengeye ulaşmıştır. %1,5 pülp yoğunluğunda 8. günden itibaren pH 3'ün üzerine % 2,5 pülp yoğunluğunda 4. günden itibaren 3,3'ün üzerine ve % 5 pülp yoğunluğunda 4. günden itibaren 4'ün üzerinde pH gözlenmiştir.

Her iki cevher örneğinde de pülp yoğunluğu arttıkça pH düşüşünde azalma gözlenmektedir. Bu sonuç mikrobiyal aktivitenin yavaşlamasıyla açıklanabilir. Literatürde pülp yoğunlunun artmasıyla ortamın viskozitesinin artışına bağlı olarak O₂ ve CO₂ gazlarının besiyeri ortamına diffüze olmasının azaldığı bu sebeple mikrobiyal aktivitenin yavaşlayabileceği bildirilmiştir (Sadeghieh ve ark, 2020). Ayrıca pülp artışıyla, cevherin hızlıca asit tüketmesi ani pH yükselmesine sebep olmuştur. Buna bağlı olarak mikroorganizma gelişimi inhibe olabilmektedir. Nontronit cevherde % 5 pülp yoğunluğundaki pH'nın kontrol grubuyla çok yakın sonuçlar vermesiyle bu sonuca varılmıştır.



Şekil 4.4. Nontronit Zondan Alınan Cevher Örneğinde Pülp Yoğunluğa Bağlı pH Değişimi (Deney koşulları: başlangıç pH:2,00, 150 dev/dk, 30°C, -0,038 mm tanecik boyutu)

Çiftçi ve Atik (2017), Laterit nikel cevherinden nikel (Ni) ve Kobalt (Co) eldesi için yaptıkları çalışmada saf ve karışık asidofil bakteri kültürleri kullanmışlardır (*At. ferrooxidans*, *Leptospirillum ferrooxidans* ve *At. thiooxidans*). Cevherin biyoliçinde; liç ortamına elementel kükürt ve ferröz demir eklenmiştir. Yapılan çalışmada %7 S içeren ortamda, %1, %5, %7 ve %10 pülp yoğunluğunda pH değişimi incelenmiştir. Biyoliç deneylerine pH 2,0 ile başlanmıştır. Liç süresinin sonunda ulaşılan en düşük pH değeri %1 pülp yoğunluğunda ve 0,21' dir. Pülp yoğunluğu arttıkça, pH değerinin de arttığını bildirmişlerdir.

Hernandez ve ark (2009) laterit nikel cevherinin Caron prosesi atıklarından nikel ve kobalt kazanımı için *At. thiooxidans* ile yaptığı biyoliç çalışmasında %1 kükürt içeren ortamda %1, %2,5, %5 ve %10 pülp yoğunluğunu kıyaslamış, %1 ve %2 yoğunlukta pH'nın düştüğünü %5 ve %10 yoğunlukta pH'nın yükseldiğini bildirmişlerdir.

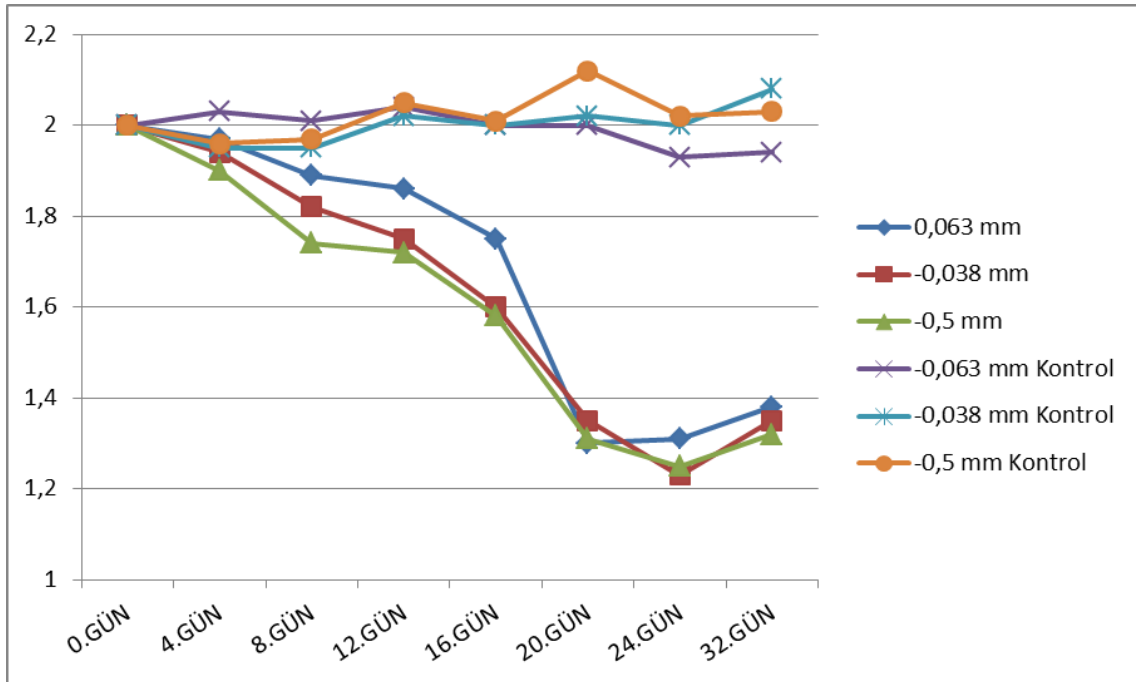
4.4.2. Tanecik Boyutuna Bağlı pH Değişimi

Tanecik boyutunun pH değişimine etkisini belirlemek için hem limonit hem nontronit cevher örneğinde -0,038 mm, -0,063 mm ve -0,5 mm tanecik boyutları çalışılmıştır. Deneyler, incelenen litertür baz alınarak daha yüksek çözünme verimi elde edileceği düşünülen %1,5 pülp yoğunluğunda gerçekleştirilmiştir. Limonit cevherde biyoliç süresinin sonunda -0,038 mm tanecik boyutuyla yapılan deneyde pH değeri 1,35, -0,063 mm boyutunda 1,38 ve -0,5 mm boyutunda yapılan deneyde pH değeri 1,32'dir. Biyoliç sonundaki pH değerleri arasında önemli bir fark gözlenmemiştir.

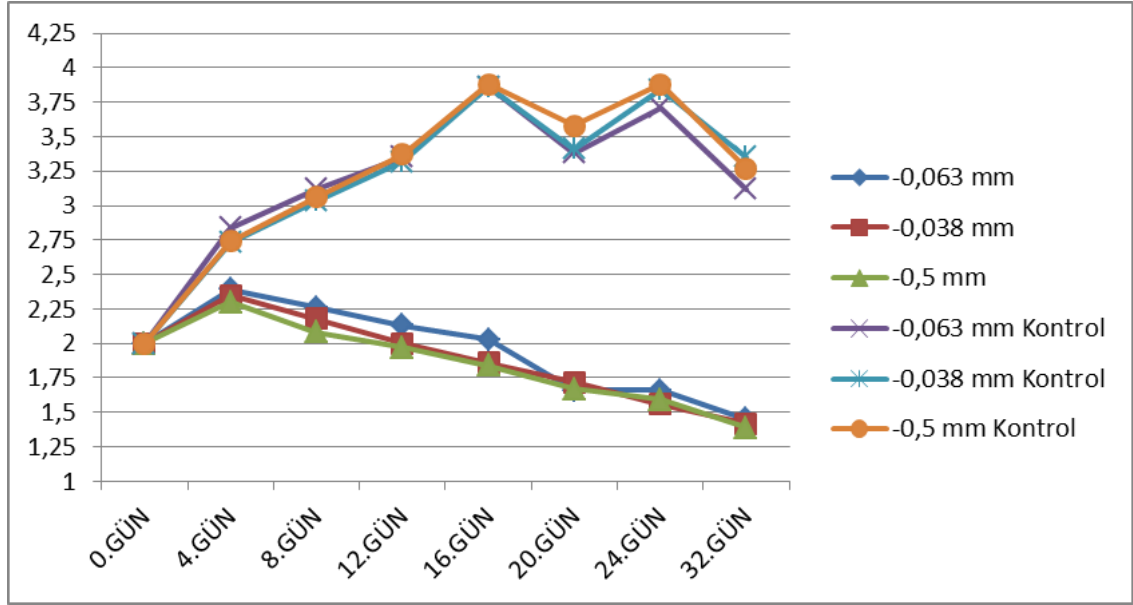
Zamana bağlı pH değişimi incelendiğinde ilk 16 gün -0,063 mm tanecik boyutundaki pH düşüşünün -0,5 mm ve -0,038 mm tanecik boyutuna kıyasla daha yavaş olduğu gözlenmiştir. 16. günden sonraki değerler birbirine yakınlık gösterebilir, ilk 16 gün -0,063 mm boyutta gözlenen pH değerleri daha yüksektir.

Kontrol gruplarını incelendiğinde zamana bağlı pH değişiminde kayda değer bir fark gözlenmemiştir.

Nontronit cevher örneği incelendiğinde de benzer sonuçlar gözükmemektedir. Ulaşılan son pH değeri açısından tanecik boyutları arasında ciddi bir fark gözlenmezken, ilk 16 gün içerisinde -0,063 mm tanecik boyutundaki pH azalmasının daha yavaş olduğu gözlenmiştir. Nontronit cevherde biyoliç süresinin sonunda -0,038 mm boyutuyla yapılan deneyde pH değeri 1,42, -0,063 mm boyutunda 1,45 ve -0,5 milimetre boyutunda yapılan deneyde pH değeri 1,39'dur. Şekil 4.5.'te limonit cevhere, Şekil 4.6.'da nontronit cevhere ait tanecik boyutuna bağlı pH değişim grafikleri verilmiştir.



Şekil 4.5. Limonit Zondan Alınan Cevher Örneğinde Tanecik Boyutuna Bağlı pH Değişimi (Deney koşulları: başlangıç pH: 2,0 150 dev/dk, 30°C)



Şekil 4.6. Nontronit Zondan Alınan Cevher Örneğinde Tanecik Boyutuna Bağlı pH Değişimi (Deney koşulları: başlangıç pH: 2,0 150 dev/dk, 30°C,)

Wang ve ark (2019) Yaptıkları çalışmada, yerel uranyum cevherinden izole edilen *At. ferrooxidans* kullanılarak düşük tenörlü (%0,033) uranyum cevherinden kolon biyoliçinde cevher tanecik boyutunun etkinliği değerlendirilmiştir. Çalışılan cevher tanecik boyutları <50 mm, <30 mm ve <15 mm'dir. 5 g/L sülfürik asit ve 5 g/L Fe³⁺ liç solüsyonuna eklenmiştir. Deneyler 2,57 L/(h·m²) püskürtme mukavemeti ve 25 °C sıcaklıkta devam ettirilmiştir. 150 günlük liçten sonra, asit tüketimi kg cevher başına 2,73 g H₂SO₄'e ulaşmış, elde edilen maksimum uranyum ekstraksiyonu <15 mm cevher tanecik boyutu ile %64,85 olmuştur. Sonuçta daha küçük parçacık boyutlu cevherden daha yüksek uranyum kazanımı olduğunu bildirmişlerdir. Tanecik boyutuna bağlı pH takibi yapılan çalışmada, tanecik boyutu küçüldükçe asit değerinin yükseldiğini bildirmişlerdir. En yüksek asit tüketimi ve en yüksek pH değeri en küçük (<15 mm) tanecik boyutunda tespit edilmiştir.

4.4.3. Başlangıç pH'ına Bağlı pH Değişimi

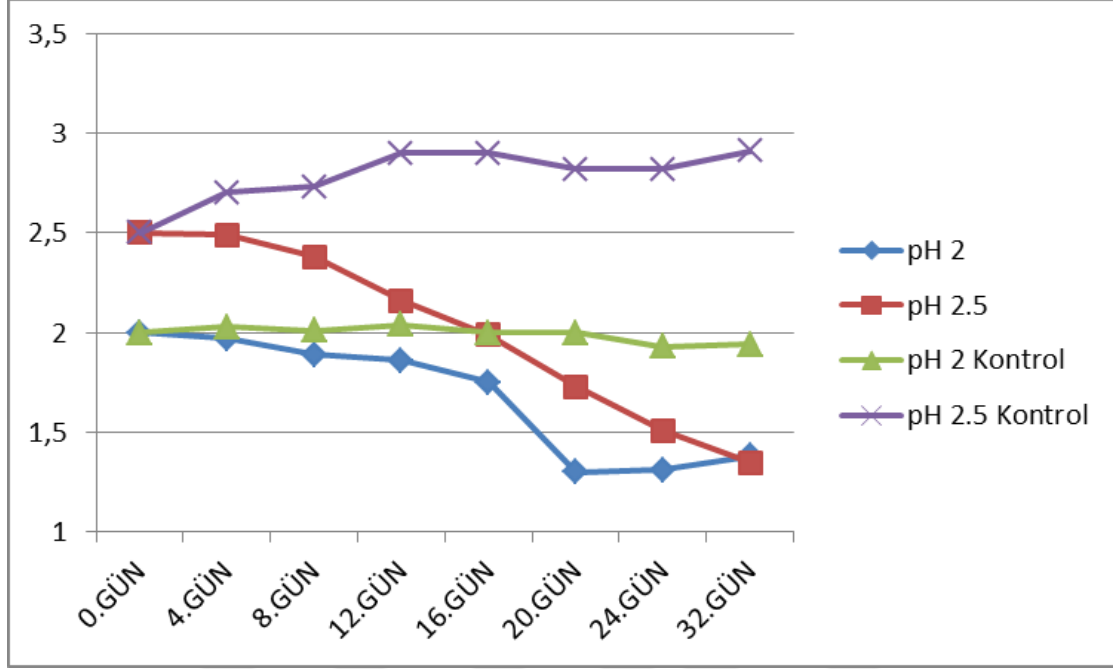
Başlangıç pH'larının pH değişim profilini nasıl etkilediğini belirlemek için 2,0 ve 2,5 başlangıç pH'ları kıyaslanmıştır.

Limonit cevherde pH 2,0 ve pH 2,5 ile başlanan deneylerde 32 günlük liç süresi sonucunda her iki deneydeki son pH değeri birbirine yakındır. Başlangıç pH'sı 2,0 olan deneyde son pH değeri 1,38, başlangıç pH'sı 2,5 olan deneyde son pH değeri 1,35'tir. Her iki başlangıç pH'ında yapılan deneyde de 4. günden itibaren pH düşmeye başlamıştır. Ancak, pH 2,5 ile başlanan deneyde çok daha hızlı bir düşüş gözlenmiştir (Şekil 4.8).

Başlangıç pH'sı 2,0 olan kontrol grubunda 24. güne kadar pH başlangıç değerine yakın değerlerde devam etmiş, ancak son bir haftada 16. günde yapılan beslemeye bağlı olarak az da olsa

düşüş gözlenmiştir. Başlangıç pH'sı 2,5 olan kontrol grubunda 4. günden itibaren pH yükselmeye başlamış,12.günden itibaren dengeye ulaşmıştır.

Bu sonuçlara göre 2,5 başlangıç pH'sında bakteriyal aktivite çok daha yüksektir.



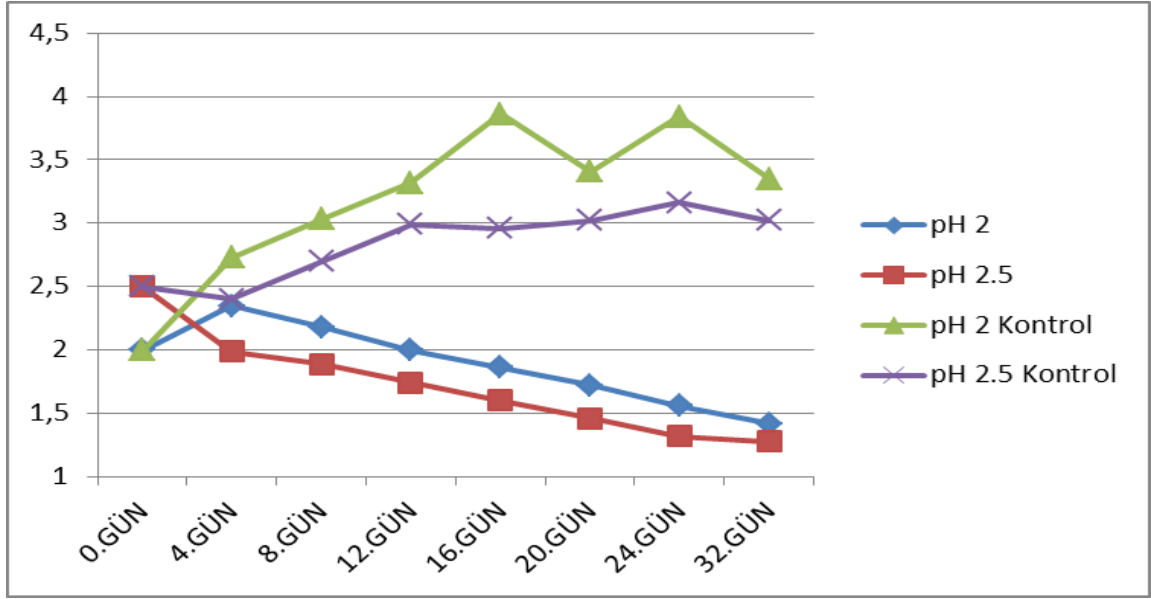
Şekil 4.7. Limonit Cevherde Başlangıç pH'sına Bağlı pH değişimi (Deney koşulları: 150 dev/dk, 30°C, %1,5 pülp yoğunluğu, tanecik boyutu -0,063 mm)

Nontronit cevher örneğinde başlangıç pH'sı 2,0 olan deneyde ilk 4 gün pH yükselmiş, 4.günden sonra pH düşmeye başlamıştır. Biyoliç süresinin sonunda ölçülen pH değeri 1,42'dir. Başlangıç pH'sı 2,5 olan deneye bakıldığında pH ilk 4 gün içerisinde çok hızlı bir şekilde düşmüştür. 4. günde ölçülen pH değeri 2,0'dir, biyoliç süresi sonuna kadar düşmeye devam etmiştir. Biyoliç süresinin sonundaki pH değeri 1,28 ölçülmüştür.

Kontrol gruplarında başlangıç pH'sı 2,0 olan deneyde pH 4. günden itibaren yükselmeye başlamıştır. 4. gün pH değeri 2,73'tür. ilk 16 gün pH yükselmiş, 16. günden sonra dengeye ulaşmıştır. Biyoliç sonunda ölçülen pH değeri 3,35'tir.

Başlangıç pH'sı 2,5 olan kontrol grubunda 4. güne kadar pH'da düşüşü gözlenmiştir, 4. gün ölçülen pH 2,4'tür. 4. günden sonra pH yükselmeye başlamış, 16. günden sonra dengeye gelmiştir. Biyoliç süresinin sonunda 3,02 pH değeri ölçülmüştür.

DeneySEL veriler incelendiğinde başlangıç pH'sı 2,5 olan deneylerde bakteri aktivitesinin daha yüksek olduğu sonucuna varılmıştır. Ayrıca nontronit tipi cevherin kontrol gruplarında alınan sonuçlara göre, başlangıç pH'sı 2,5 olduğunda kimyasal kükürt oksidasyonunun arttığı sonucuna varılmıştır. Elementel kükürtün asidik ortamda kimyasal olarak sülfata kadar okside olabildiği literatürde bildirilmiştir (Wu ve ark., 2013).



Şekil 4.8. Nontronit Cevherde Başlangıç pH'sına Bağlı pH Değişimi (Deney koşulları: 150 dev/dk, 30°C, %1,5 pülp yoğunluğu, tanecik boyutu -0,063 mm)

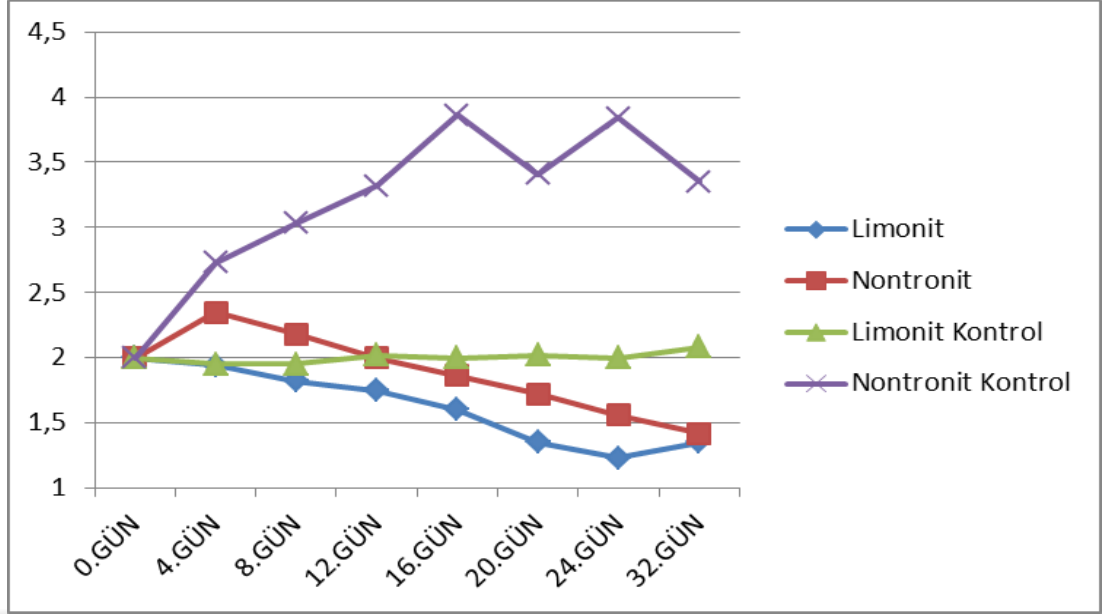
Simate ve ark (2009) Laterit nikel cevheri ile yaptığı biyoliç çalışmasında standart 9K besiyerini liç ortamı olarak kullanmış, kükürt ve pirit olmak üzere iki farklı substratın biyoliç verimine etkisini araştırmıştır. *At. ferrooxidans*, *Leptospirillum ferrooxidans* ve *At. caldus* bakterilerini kullanarak yaptığı çalışmada her iki substrat tipi içinde farklı başlangıç pH'larını çalışmış 1, 1,5, 2 ve 2,5 başlangıç pH'larında zamana bağlı pH değişimini biyoliç süresi boyunca incelemiştir.

Simate'in verilerine göre hem kükürt hem pirit kullandığı biyoliç çalışmalarında 3 - 10. günler arasında; pH 1, 1,5 ve 2 başlangıç pH'larında artış gözlenirken, 9. günden sonra pH düşmeye başlamıştır. Başlangıç pH'sı 2,5 olduğunda 3. günden itibaren pH düşmeye başlamıştır. Benzer şekilde pirit kullandığı çalışmada da başlangıç pH'sı 1'de ilk 18 gün, 1,5'te ilk 9 gün ve pH 2,0'de ilk 3 gün pH yükselmesi gözlenmiş ancak pH 2,5'te ilk günden itibaren hızlı bir şekilde düşmeye başlamıştır ve liç süresinin sonuna kadar pH düşmesi devam etmiştir. Simate bu durumu başlangıç pH' sını 2,5 olduğunda bakteriyel aktivitenin çok daha yüksek olmasına bağlamıştır.

Limonit cevherle yapılan biyoliç deneylerine ait tüm pH sonuçları çizelge 4.5.'te, nontronit cevhere ait tüm pH sonuçları çizelge 4.6.' da verilmiştir.

4.4.4. Cevher Türüne Bağlı pH Değişimi

Cevher türünün pH değişimine olan etkisini belirlemek için başlangıç pH'sı 2,0 olan besiyeri ortamında %1,5 pülp yoğunluğunda, -0,038 mm tanecik boyutunda biyoliç deneyleri gerçekleştirilmiştir. Limonit cevherde, pH 4. günden itibaren düşmeye başlamış ilk 20 gün hızlı bir düşüş gözlenirken, biyoliç sonunda dengeye ulaşmıştır. 32. gün pH değeri 1,35'tir.



Şekil 4.9. Cevher Türüne Bağlı pH Değişimi (Deney koşulları: başlangıç pH: 2,0 150 dev/dk, 30°C, %1,5 pülp yoğunluğu)

Kontrol grubunun ilk 4 gününde kimyasal kükürt oksidasyonuna bağlı olarak çok az bir pH düşüşü olsada, 8. günden sonra tekrar başlangıç pH'sına yükselmiş ve dengeye gelmiştir. Biyoliç süresinin sonunda ölçülen pH değeri 2,08'dir.

Nontronit cevhere bakıldığında ilk 4 gün içerisinde pH 2,35'e kadar yükselmiş 4. günden sonra pH düşmeye başlamış ve 12. günden sonra başlangıç pH'sının altına düşmüştür. Biyoliç süresinin sonundaki pH değeri 1,42'dir.

Nontronit cevherde kontrol grubuna bakıldığı zaman pH ilk 4 gün içerisinde 2,73'e kadar yükselmiş ve liç süresinin sonuna kadar yükselmeye devam etmiştir. 8.günden sonra ölçülen pH değeri 3'ün üzerindedir. pH biyoliç süresinin sonuna kadar dalgalanma gösterse de, ölçülen pH' lar başlangıç pH'sının üzerindedir. Biyoliç sonundaki pH değeri 3,35'tir.

İki cevher kıyaslandığında, pH değeri limonit tipi cevherde 4. Günden, nontronit tipi cevherde 12. günden itibaren başlangıç pH'sının altına düşmüştür. Ulaşılan son pH değeri birbirine çok yakın olmasına rağmen ilk 16 Gün içerisindeki pH değişim profili önemli bir farklılık göstermektedir. Bu sonuçlar literatürle kıyasladığında beklenen bir sonuçtur. Cevherler sahip olduğu minerolojik yapıya göre farklı sürelerde ve farklı miktarlarda asit tüketerek çözünürler (Valix ve ark., 2001). Limonit zonda bulunan götit ve hematit mineralleri, nontronit zonda bulunan nontronit ve Mg-Ni silikat minerallerine kıyasla daha yavaş bir çözünme göstermektedir.

Girgin ve ark (2010) Eskişehir Adatepe'den temin ettikleri laterit nikel cevherinin atmoferik basınçta sülfürik asit ile liçini çalışmışlardır. Asit konsantrasyonu (%5-%95) , sıcaklık (20-95°C) ve liç süresi (30-240 dk) gibi parametreleri çalıştıkları liç deneyleri sonucunda elde ettikleri maksimum nikel çözünmesi %99,2' dir. Liç öncesinde ve sonra yaptıkları XRD analizlerini ve

nikelle eş zamanlı çözünen diğer metallerin sonuçlarını analiz ederek, kil fazındaki nikelin götit fazdaki nikelden çok daha hızlı çözüldüğünü bildirmişlerdir.



Çizelge 4.4. Limonit cevhere ait deneylerin pH verileri

			pH SONUÇLARI								
			PARTİKÜL BOYUTU	BAŞLANGIÇ	4. GÜN	8. GÜN	12. GÜN	16.GÜN	20.GÜN	24.GÜN	32.GÜN
LİMONİT	PÜLP YOĞUNLUĞU	%1,5	-0,063 mm	2	1,97	1,89	1,86	1,75	1,3	1,31	1,29
			- 0,038 mm	2	1,94	1,82	1,75	1,6	1,35	1,23	1,35
			-0,5 mm	2	1,9	1,74	1,72	1,58	1,31	1,25	1,32
			-0,063 mm	2,5	2,49	2,38	2,16	1,99	1,73	1,51	1,35
		%2,5	-0,063 mm	2	2,09	1,9	1,85	1,7	1,54	1,3	1,26
		%5	-0,063 mm	2	2,2	2,03	2,06	1,92	1,75	1,7	1,46
LİMONİT KONTROL	PÜLP YOĞUNLUĞU	%1,5	-0,063 mm	2	2,03	2,01	2,04	2	2	1,93	1,94
			- 0,038 mm	2	1,95	1,95	2,02	2	2,02	2	2,08
			-0,5 mm	2	1,96	1,97	2,05	2,01	2,12	2,02	2,03
			-0,063 mm	2,5	2,7	2,73	2,9	2,9	2,82	2,82	2,91
		%2,5	-0,063 mm	2	2,15	2,23	2,12	2,19	2,12	2,18	2,1
		%5	-0,063 mm	2	2,35	2,25	2,21	2,2	2,2	2,16	2,06

Çizelge 4.5. Nontronit cevhere ait deneylerin pH verileri

		pH SONUÇLARI									
		TANECİK BOYUTU	BAŞLANGIÇ	4. GÜN	8. GÜN	12. GÜN	16.GÜN	20.GÜN	24.GÜN	32.GÜN	
NONTRONİT	PÜLP YOĞUNLUĞU	%1,5	- 0,038 mm	2	2,35	2,18	2	1,86	1,72	1,56	1,42
			-0,063 mm	2	2,39	2,26	2,13	2,03	1,66	1,66	1,45
			-0,5 mm	2	2,3	2,08	1,97	1,84	1,67	1,59	1,39
			- 0,038 mm	2,5	1,99	1,89	1,74	1,6	1,46	1,32	1,28
		%2,5	- 0,038 mm	2	2,8	2,52	2,22	2,08	1,66	1,63	1,38
		%5	- 0,038 mm	2	3,73	4,4	4,48	5,06	4,85	5,21	5,08
NONTRONİT KONTROL	PÜLP YOĞUNLUĞU	%1,5	- 0,038 mm	2	2,73	3,03	3,32	3,86	3,41	3,84	3,35
			-0,063 mm	2	2,84	3,12	3,35	3,86	3,38	3,71	3,12
			-0,5 mm	2	2,74	3,06	3,37	3,88	3,58	3,88	3,27
			- 0,038 mm	2,5	2,4	2,7	2,99	2,96	3,02	3,16	3,02
		%2,5	- 0,038 mm	2	3,3	3,97	4,02	5,21	4,71	4,95	4,6
		%5	- 0,038 mm	2	4,07	4,52	4,5	5,22	5,11	5,38	5,2

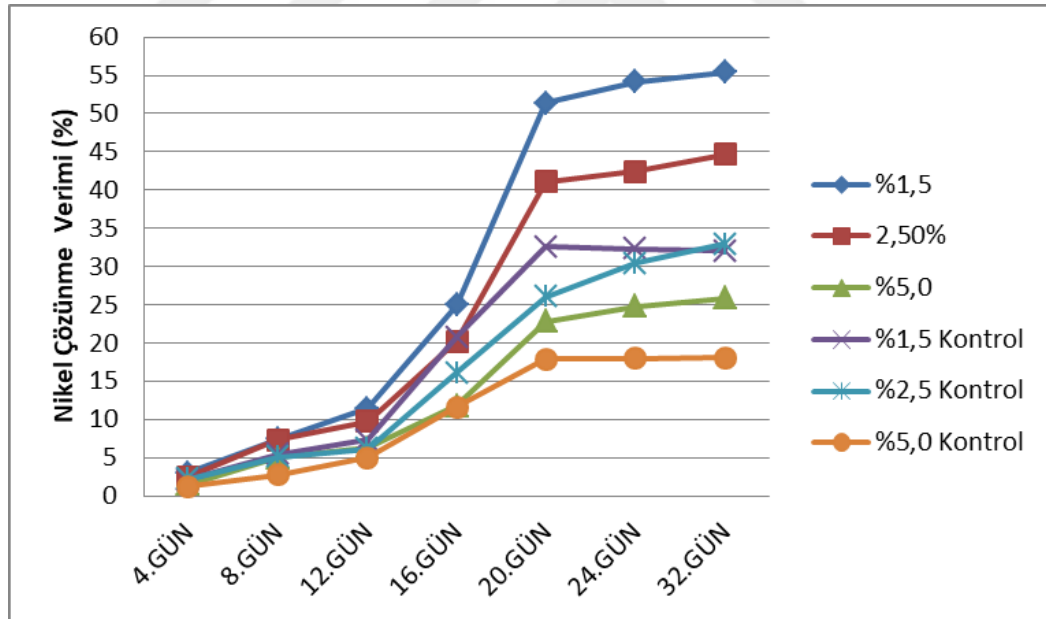
4.5. Cevherlerden Nikel Çözünmesi

Gördes laterit nikel cevherlerinden *At.ferrooxidans* ile yapılan dolaylı biyoliç yöntemiyle nikel çözünmesine ilişkin optimum şartları belirlemek için; pülp yoğunluğu, tanecik boyutu ve başlangıç pH'sı ve sıcaklık parametreleri araştırılmıştır. Biyoliç deneyleri sonucunda elde edilen nikel çözünme oranları deneysel parametrelere bağılı olarak % üzerinden grafiklerle verilmiştir. Ayrıca grafiklere ek olarak bölüm sonunda tüm deneylere ait veriler ppm ve yüzde (%) olarak çizelge şeklinde verilmiştir.

Tüm sonuçlar kontrol grubuyla birlikte verilmiştir. Kontrol grupları cevher ilave edildikten sonra bakteri inokülasyonu yapılmamış biyoliç ortamıdır.

4.5.1. Pülp Yoğunluğunun Nikel Çözünme Verimine Etkisi

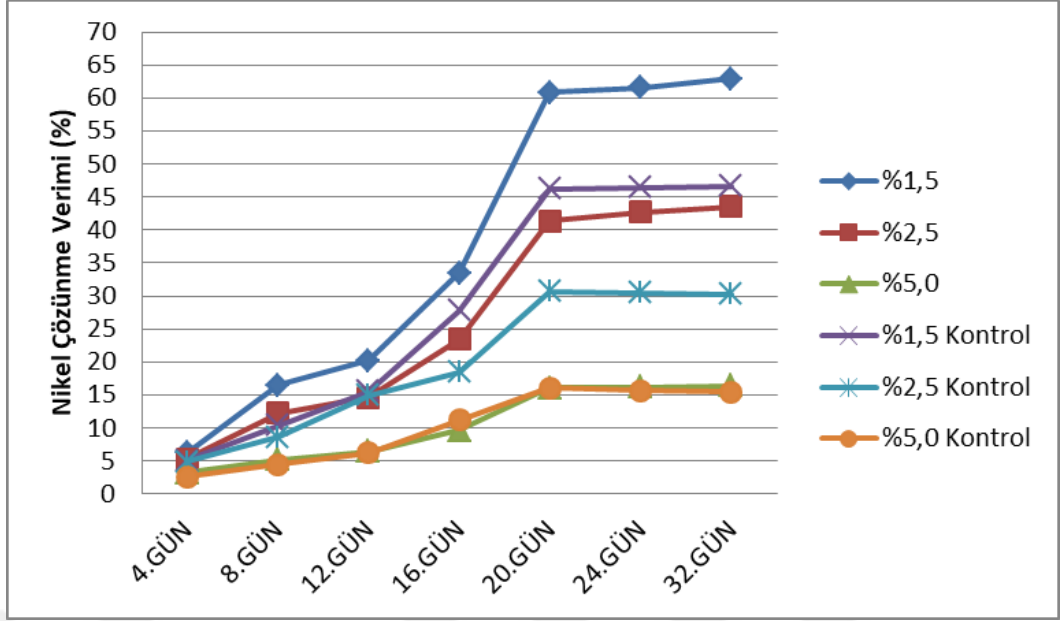
Yapılan biyoliç deneylerinde her iki cevher örneğinde de %1,5 %2,5 ve %5 pülp yoğunluğunun biyoliç verimine etkisi kıyaslanmıştır. Çalışmada hem limonit hem de nontronit cevher örneklerinde en yüksek nikel çözünmesi %1,5 yoğunlukta gerçekleşmiştir. Limonit cevherde %1,5 pülp yoğunluğunda %55, %2,5 pülp yoğunluğunda %45, %5 pülp yoğunluğunda %26 nikel çözünmesi gerçekleşmiştir (şekil 4.10.).



Şekil 4.10. Limonit Zondan Alınan Cevher Örneğinde Pülp Yoğunluğunun Nikel Çözünme Verimine Etkisi (Deney koşulları: başlangıç pH: 2,0 150 dev/dk, 30°C, -0,063 mm)

Kontrol gruplarında ise 32 günlük liç süresi sonunda %1,5 pülp yoğunluğundaki nikel çözünmesi %32, %2,5 yoğunlukta %33, %5 yoğunlukta %18'dir. Nontronit cevherde %1,5 pülp yoğunluğunda %63, %2,5 pülp yoğunluğunda %44, %5 yoğunlukta ise %16 nikel çözünmesi gerçekleşmiştir (şekil 4.11).

Nontronit cevherin kontrol gruplarında ise %1,5, %2,5 ve %5 pülp yoğunluklarında sırasıyla, %47, %30 ve %15 nikel çözünmesi gerçekleşmiştir.



Şekil 4.11. Nontronit Zondan Alınan Cevher Örneğinde Pülp Yoğunluğunun Nikel Çözünme Verimine Etkisi (Deney koşulları: başlangıç pH: 2, 150 dev/dk, 30°C, -0,038 mm)

Sonuçlar incelendiğinde iki cevher numunesinde de pülp yoğunluğu arttıkça biyoliç veriminin azaldığı gözlenmiştir. Bulduğumuz sonuçlar incelenen literatür ile paralellik göstermektedir.

Pülp yoğunluğundaki artışla çözünme veriminin azalması, bakteri aktivitesinin yavaşlamasıyla açıklanabilir. Pülp yoğunluğuna artıka ortam viskozitesinin artmasına bağılı olarak O₂ ve CO₂ gibi gazların transferinin sınırlandığı ve bu durumun mikroorganizma gelişimini yavaşlattığı bildirilmiştir. (Gericke ve ark., 2001).

Ayrıca artan viskoziteye bağılı olarak katı süspansiyonun homojen karışmaması metal çözünmesini olumsuz etkilemektedir (Coto ve ark., 2008). Limonit cevherle yapılan çalışmayı incelediğimizde %1,5 ve %2,5 pülp yoğunluğunda kontrol grubundaki çözünme verimi, %5 pülp yoğunluğundaki verimden daha yüksektir ve bu üç grup arasındaki pH kıyaslandığında (bölüm 4.4.1) %5 pülp yoğunluğunda daha düşüktür. Bu nedenle bu sonuçların bakteri üremesinin yavaşlamasından yanısıra, homojen ve yeterli karışım olmadığından kaynaklandığı sonucuna varılmıştır.

Behera ve ark (2018) nikel cevheriyle yaptıkları biyoliç deneylerinde doğal izolat *At. ferrooxidans* ile yaptıkları yığın liçi deneylerinde, pülp yoğunluğu, tanecik boyutu, biyoliç süresi ve pH gibi parametrelerin biyoliç verimine etkisini araştırmışlardır. Çalışmada %2 ve %8 arasında değışen pülp yoğunlukları kıyaslanmış, en yüksek verimin (%82 nikel, %76 kobalt ve %25.6 bakır) %2 pülp yoğunluğunda elde edildiğı bildirmiştir.

Simate (2009) *At. ferrooxidans*, *Leptospirillum ferrooxidans* ve *At. caldus* bakterilerinin karışık kültürünü kullanarak yaptığı biyoliç çalışmasında süfür içeren besiyeri kullanmış, %5 ve %15

pülp yoğunluğunda nikel verimini kıyaslamıştır. Deney sonuçlarına göre %5 pülp yoğunluğundaki nikel çözünme verimi yaklaşık olarak %10 daha fazladır.

Sadeghieh ve ark (2020) Golgozar (Sirjan, İran) demir cevheri tesisinden elde ettikleri bakır-nikel-kobalt içeren sülfürlü atıkların biyoliçi üzerine tuzluluğun etkisini araştırdıkları biyoliç çalışmasında; süspansiyonun pH'sı, besiyeri ortamı, mikroorganizma türü ve pülp yoğunluğu dahil olmak üzere çeşitli parametrelerin sülfürlü atıklardan bakır, kobalt ve nikelin çıkarılması üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Pülp yoğunluğunun %5'ten %10'a çıkarılmasıyla, Ni ekstraksiyonu %62.8'den %36.3'ya, Co ekstraksiyonunu %74.8'den %53.7'ye düşürken, Cu ekstraksiyonu %5 artmıştır.

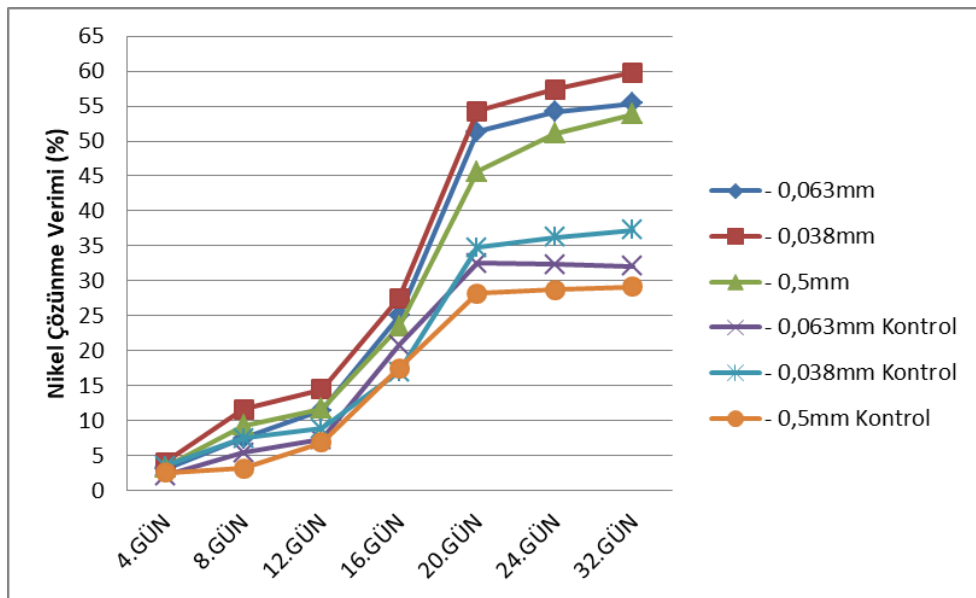
Araştırmacılar bu sonuçları pülp yoğunluğunun artırılmasının, (özellikle çalkalama şişelerinde) mekanik streslerin arttırmasına, bakteri-cevher temasını önlenmesine, oksijen ve karbondioksit iletiminin bozulmasına yol açarak hücre büyümesinin engellenmesiyle açıklamıştır.

Artan pülp yoğunluğuyla (%10) Cu ekstraksiyonunun artması ise çözelti ORP'sinin (yaklaşık 450 mV) daha düşük oluşuyla açıklamışlardır.

4.5.2. Tanecik Boyutunun Nikel Çözünme Verimine Etkisi

Tanecik boyutunun nikel çözünmesine etkisini belirlemek için iki cevher örneğinde de %1,5 pülp yoğunluğunda, -0,038 mm, -0,063 mm ve -0,5 mm tanecik boyutlarında biyoliç deneyleri gerçekleştirilmiştir.

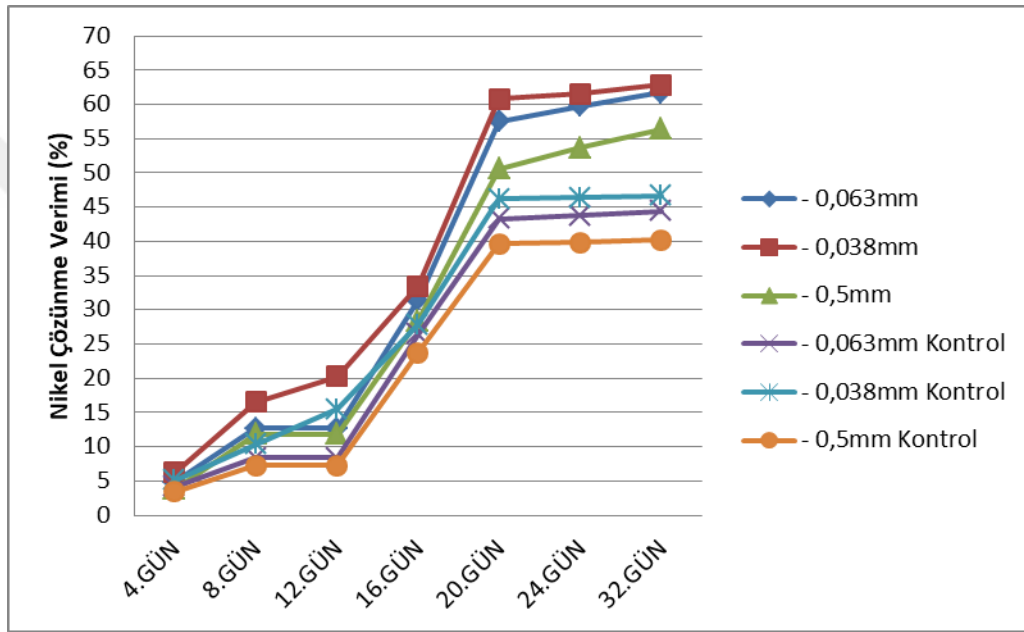
Limonit cevherde biyoliç süresinin sonunda yüksek nikel çözünmesi %60 verimle -0,038 mm tanecik boyutunda gerçekleşmiştir. -0,063 mm'de %55, -0,5 mm'de %54 nikel çözünmesi gerçekleşmiştir. Limonit cevherin kontrol gruplarında -0,038 mm tanecik boyutunda %37, -0,063 mm boyutunda %32 ve -0,5 mm boyutunda %29 verim elde edilmiştir (şekil 4.12).



Şekil 4.12. Limonit Zondan Alınan Cevher Örneğinde Tanecik Boyutunun Nikel Çözünme Verimine Etkisi (Deney koşulları: başlangıç pH: 2,0 150 dev/dk, 30°C)

Nontronit cevherle yapılan deneylerde -0,038 mm, - 0,063 mm ve -0,5 mm boyutunda yapılan deneylerde sırasıyla %63 %62 ve %56 çözünmesi, kontrol gruplarında ise sırasıyla %47, %44 ve %40 nikel çözünmesi elde edilmiştir (Şekil 4.13).

Deney sonuçları incelendiğinde her iki cevher örneğinde de tanecik boyutu küçüldükçe nikel çözünme yüzdesi artmıştır. Literatürde birçok araştırmacı tanecik boyutu azaldıkça çözünme yüzdesinin arttığını bildirmiştir. Bu artışı; tanecik boyutundaki azalma sonucu yüzey alanının artmasıyla açıklamışlardır. Bu sayede liç ajanıyla spesifik temas alanı artar ve metalin sıvı ortama desorpsiyonu daha kolay gerçekleşir (Meshkini ve Bayragh, 2022., Petrus ve ark., 2018).



Şekil 4.13. Nontronit Zondan Alınan Cevher Örneğinde Tanecik Boyutunun Nikel Çözünme Verimine Etkisi (Deney koşulları başlangıç pH:2,0 150 dev/dk, 30°C)

Sonuçlar zamana bağlı incelendiğinde - 0,038 mm ve -0,5 mm tanecik boyutları arasındaki çözünme farkı %5- 12 arasında değişmektedir. pH düşüşünün en hızlı, çözünmenin en yüksek olduğu 12-20. günler arasında bu fark en yüksek değere ulaşırken liç süresinin sonuna doğru azalmaya başlamıştır.

-0,038 mm ve -0,063 mm tanecik boyutundaki nikel çözünme verimi kıyaslandığında biyoliç süresi boyunca gözlenen fark %3-5 arasında değişmektedir.

Literatürdeki çalışmalarda genel olarak tanecik boyutunun küçülmesiyle liç veriminin arttığını bildirsede, bazı çalışmalar belirli bir boyutun altına inildiğinde liç veriminin negatif etkilendiğini, bu tanecik boyutunun kritik minimum tanecik boyutu olduğunu bildirmişlerdir.

Biyoliç reaksiyonlarında temas yüzeyi kütle transferini etkileyen faktörlerden biridir. Tanecik boyutu azaldığında temas yüzeyinin artması nedeniyle kütle transferi artar. Ancak, katı maddenin parçacık yüzeyi ve hücre arasındaki gerilim hücre duvarına zarar verebilir ve hücre

duvarını parçalayabilir. Bu iki parametre, doğru tanecik boyutunu seçerek dengelenmelidir (Bajestani ve ark., 2014).

Petrus ve ark (2018) Güney Endonezya Pomalaa'dan aldıkları laterit nikel cevheri ile yaptıkları çalışmada *Aspergillus niger* ile üretilen sitrik ile biyoliç deneylerini 200 dev/dk karıştırma hızında gerçekleştirmiş, tanecikboyutunun biyoliç verimine etkisini araştırmışlardır. 60 -75 mesh, 100-120 mesh ve 200 mesh tanecik boyutunda yaptıkları kıyaslamada optimum nikel kazanımını 100-120 mesh boyutunda elde ettiklerini bildirmişlerdir.

Bu sonuçlarla ilgili yaptıkları açıklamaya göre, 60-70 mesh tanecik boyutundan daha büyük boyutta olan katı madde, reaksiyon ajanının emilimini ve metalin reaksiyon bölgesinden sıvıya geçişini zorlaştırır, ayrıca daha küçük tanecik boyutunda daha hızlı reaksiyon meydana gelir ve çözünme artar. 200 mesh boyutuna inildiğinde fazlaca artan reaksiyon hızı ve reaksiyon bölgesi yüzeyinde oluşan karmaşık metal molekülleri, hedef metalin desorpsiyonuna engel olmuştur.

Ghosh ve Paul (2016) *Aspergillus humicola* mantarıyla yaptıkları biyoliç çalışmasında laterit nikel yataklarından nikel kazanımını araştırmışlardır. Çalışmada liç süresi, tanecik boyutu, pülp yoğunluğu, karbon kaynağı gibi parametreler kıyaslanmıştır. Çalışmada kullanılan cevherin tanecik boyutu 0,1 mm - 0,8 mm arasında değişmektedir. 10 gün 20 gün ve 30 gün sürelerle yaptıkları biyoliç deneylerinde en yüksek verimi 30 günde elde etmişlerdir. Biyoliç süresi sonunda maksimum nikel çözünmesi 60,4% ile 0,1 mm tanecik boyutunda gerçekleşmiş ve tanecik boyutu arttıkça kademeli olarak liç verimi azalmıştır. 0,2 mm'de 54,2% ,0,5 mm' de 50,1%) ve 0,8mm boyutunda 47,1 % Ni çözünmesi elde etmişlerdir.

Simate (2009) *At.* cinsi bakterilerin karışık kültürünü kullanarak yaptığı biyoliç çalışmasında kükürt veya pirit içeren liç ortamında, %5 pülp yoğunluğu 30°C ve 200 dev/dk deney koşullarında - 0,038 mm ve 0,1-0,150 mm tanecik boyutlarındaki nikel çözünme verimini kıyaslamıştır. - 0,038 mm boyuta inildiğinde çözünme veriminin düştüğünü bildirmiştir.

Simate'e göre, nikel parçacıkları arasındaki çarpışma oranının ve nikel parçacıkları ile bakteriler arasındaki çarpışma oranının, nikel parçacık boyutu azaldıkça artması muhtemeldir. Ayrıca, bakterilerin kükürt yada pirit yüzeyine bağlanmasında kısıtlanmış olabilir.

Chaerun ve ark (2017) *Aspergillus niger* tarafından üretilen fungal metabolik organik asitleri kullanarak limonit ve saprolit nikel cevherleriyle dolaylı biyolojik deneyleri gerçekleştirmişlerdir. Farklı sıcaklık, karıştırma hızı ve tanecik boyutu kıyasladıkları parametreler arasındadır.

Çalışmada -0,0250+0,177 mm, -0,177+0,149 mm ve -0,149+0,075 mm tanecik boyutlarında cevher kullanılmışlardır. Üç tanecik boyutu kıyaslandığında kayda değer bir farkın olmadığı bildirilmiştir. 24 saatlik liç süresinin sonunda, -0,177+0,149 mm boyutunda, 75%, -0,149+0,075 mm boyutunda 70% ve -0,250+0,177 µm boyutunda 65% kazanım olduğu bildirmişlerdir.

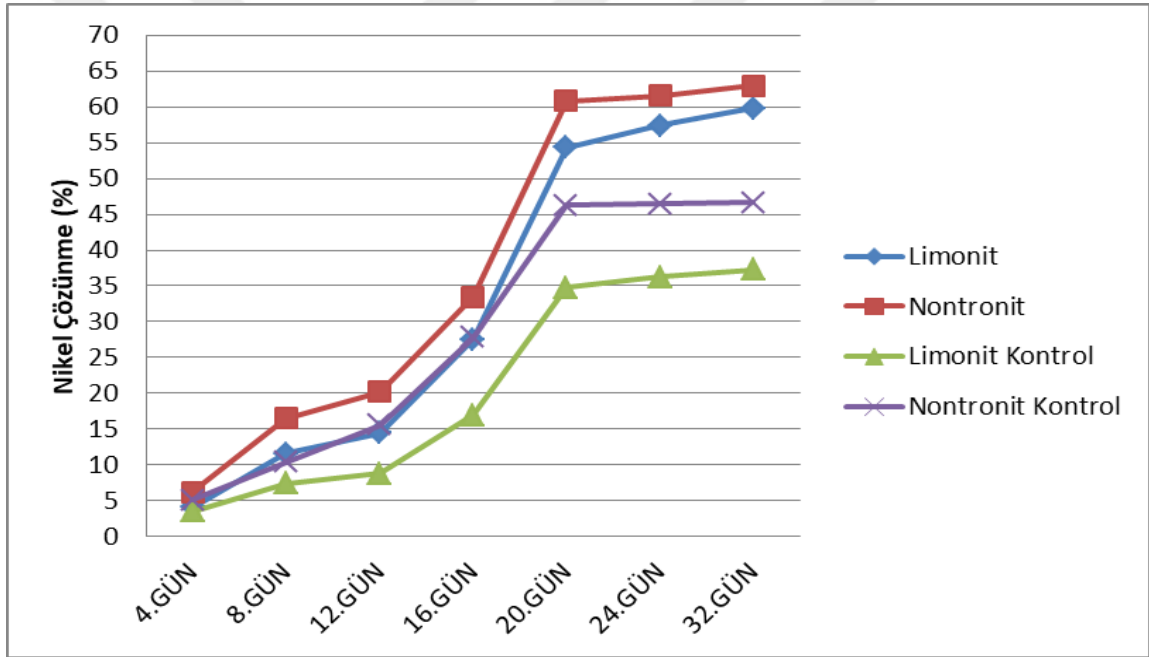
4.5.3. Cevher Türünün Nikel Çözünme Verimine Etkisi

Limonit ve nontronit zonlardan alınan cevherlerdeki nikel çözünme verimini kıyaslamak için biyoliç deneyleri %1,5 pülp yoğunluğunda ve başlangıç pH'sı 2,0'da gerçekleştirilmiştir.

32 günlük liç süresi sonunda limonit cevherde %60, nontronit cevherde %63 nikel çözünmesi gerçekleşmiştir. Bu fark önemli fark değildir, ancak zamana bağlı nikel verimine bakıldığında nontronit cevherde nikel çözünmesi çok daha hızlı gerçekleşmektedir. 12-20. günler arasında %6 olan çözünme farkı biyoliç sonunda %3'e düşmüştür.

Kontrol gruplarına bakıldığında liç süresinin sonunda limonit zonda %37 nontronit zonda %47 nikel çözünmesi gerçekleşmiştir. 12.-20. Günler arasında fark %11'e çıkmış liç sonuna kadar korunmuştur. (Şekil 4.14.).

Bu sonuçlar Bölüm 4.4.3'te verilen pH sonuçları göz önüne alınarak değerlendirildiğinde nontronit cevherde nikelin çoğunlukla hızla çözünen mineral fazında bulunduğunu düşünülmektedir.



Şekil 4.14. Cevher türüne bağlı nikel çözünmesi (Deney koşulları: başlangıç pH:2,0 150 dev/dk, 30°C, %1,5 pülp yoğunluğu)

İncelenen literatüre göre minerallerin birbirinden farklı çözünme katsayısına ve hızına bağlı olarak, cevherlerin minerolojik bileşimi liç verimini önemli derecede etkilemektedir.

Biyoliç üzerine araştırmalar yapılan bir çalışmada; organik asitler aracılığıyla mineral liçi yapabilen heterotrofik funguslar ile çeşitli laterit cevherleri çalışmışlardır. Bu çalışmada, liç prosesi uygulanacak cevherler arasında saprolit, limonit ve nontronit cevherler yer almıştır. Biyoasitlerin üretildiği aynı fazda metallerin doğrudan liç edildiği yöntemde ağırlıkça %36 nikel, %54 kobalt ve %76 demir çıkarımı elde edildiği gösterilmiştir. Bununla birlikte, cevher kazanımının, cevher mineralojisi ve cevherlerin elektro-sorpsiyon özelliği vasıtasıyla metal kaybından güçlü bir şekilde

etkilendiği tespit edilmiştir. Nikelin saprolit veya silikat bakımından zengin olan bölgede daha etkili bir şekilde liç edildiği ancak limonitte etkili bir liç yapılamadığı vurgulanmıştır. Bu duruma sebep olarak götit minerali bakımından zengin olan limonit cevherindeki nikelin götit ile olan ilişkisinin nikelin liçini engellediği savunulmuştur. Bu çalışmanı bir diğer sonucu olarak da *Aspergillus* ve *Penicillium* türlerinin liç prosesinde en etkili türler olduğu raporlanmıştır (Valix ve ark., 2001).

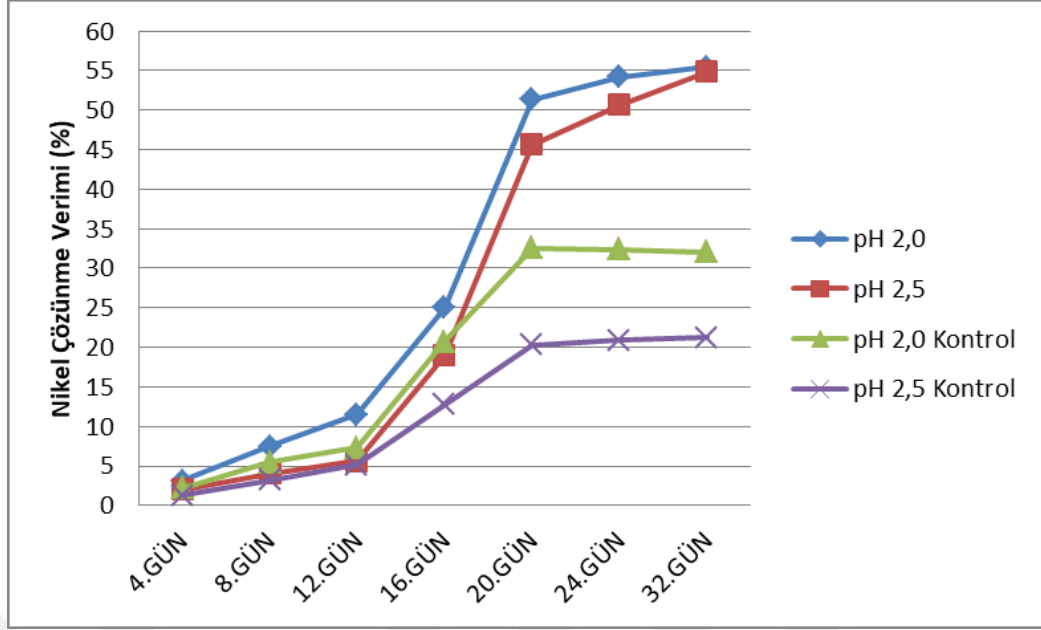
Liu ve ark (2010) Esas olarak maghemit, götit ve lizardit içeren Yuanjiang (Çin) nikel laterit cevheri ile atmosferik basınçta sülfürik asitle yaptıkları liç çalışmasında, deney sonunda kalıntıları XRD SEM ve XRF kullanılarak karakterize etmişlerdir. Nikel, kobalt, demir, magnezyum, alüminyumun ekstraksiyonu ile laterit minerallerinin çözünme davranışı arasındaki ilişkiyi analiz etmişlerdir. Deneyler sonucunda, laterit minerallerinin sülfürik asitteki çözünürlüğünün şu sırayla azaldığını bildirmişlerdir: lizardit > götit > maghemit > manyetit hematit > kromit > ringwoodit. Lizardit, 60 °C'de 0,6 mol/L sülfürik asitte hızla çözünürken, götit 80 °C'de 2,5 mol/L sülfürik asitte çözünür, Hematit ise sadece 105 °C'de 6,2 mol/L sülfürik asitte çözünür. Ayrıca nikel ve kobaltın maghemit ve götit yapılarında demirin yerini aldığını ve bu değerli metalleri çıkarmak için tam mineral çözünmesinin gerektiğini bildirmişlerdir.

Top ve ark (2020) Hidroklorik asit kullanılarak liç parametrelerinin metal çözümleri üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Asit konsantrasyonu, katı/sıvı oranı, parçacık boyutu, liç süresi ve liç sıcaklığı gibi parametrelerinin araştırıldığı çalışmada; Çaldağ laterit cevherinde, atmosferik basınçta hidroklorik asit kullanılarak liç prosesi gerçekleştirmişlerdir. Nikel, kobalt ve mangan gibi elementlerin liçinin gerçekleştirildiği çalışmada, nikelin çözünmesinin mangan çözünmesiyle doğrusal bir korelasyon göstermediği, bu durumun, önemli miktarda nikelin asbolan fazında değil de götit, hematit gibi diğer mineral fazlarında bulunmasından kaynaklandığı ileri sürülmüştür. Bu çalışmanın bir başka sonucu olarak da Yarı-kantitatif mineral analizler ile mineral çözünme sırasının kalsit > götit > hematit > lizardit ≥ klorit-serpantin > asbolan > albit > kaolinit şeklinde olduğunun ortaya konmasıdır.

4.5.4. Başlangıç pH'sının Nikel Çözünme Verimine Etkisi

Başlangıç pH'sının biyoliç verimine etkisini belirlemek için 2,0 ve 2,5 başlangıç pH'ları kıyaslanmıştır. Limonit cevherde liç süresinin sonundaki verim kıyaslandığında iki pH değeri arasında bir fark yoktur. Deneyler sonucunda % 55 verim elde edilmiştir ancak, liç süresinin ilk 16 gününde başlangıç pH'sı 2,5 olan deneyde çözünme verimi daha düşüktür. 16. günden sonra aradaki fark azalmaya başlamıştır.

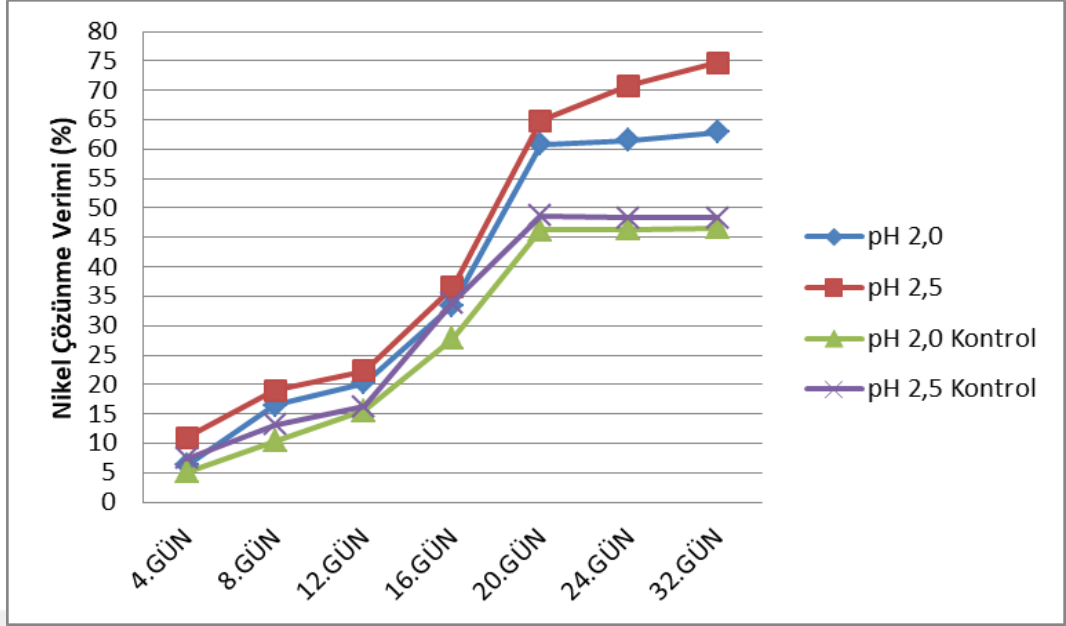
Kontrol gruplarında liç süresinin sonunda başlangıç pH'sı 2,0 ve olan deneylerde sırasıyla %32 ve %21'dir. Bu sonuçlara göre pH 2,5'da ki biyoliç veriminin kontrol grubuna kıyasla artışı, pH 2,0'ye göre %11 daha fazladır.



Şekil 4.15. Limonit Cevherde Başlangıç pH'sına Bağlı Nikel Çözünmesi (Deney koşulları: 150 dev/dk, 30°C, %1,5 pülp yoğunluğu, tanecik boyutu -0,063 mm)

Nontronit cevherde liç süresinin sonunda başlangıç pH'sı 2,0'de %63, başlangıç pH'ı 2,5'te %75 nikel çözünmesi elde edilmiştir. Kontrol gruplarında pH 2,0 ve 2,5 için sırasıyla %47 ve %48'dir. Liç süresinin sonunda bir fark gözlenmezken, zamana bağlı sonuçlar değerlendirildiğinde ilk 16 gün 2,5 pH' da daha yüksek verim gözlenmiş 16. günden sonra aradaki fark azalmaya başlamıştır.

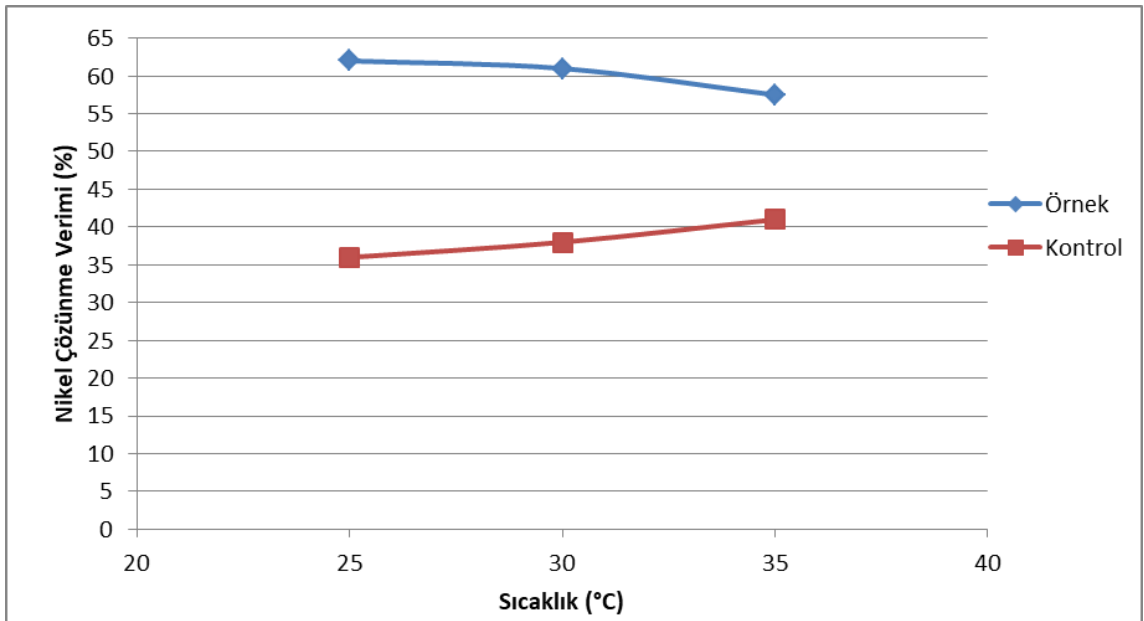
Bu sonuçlar pH değişimiyle birlikte değerlendirildiğinde, başlangıç pH'ı 2,5 olan ortamda her iki cevher örneğinde de nikel çözünme verimini, bakteriyel aktivitenin artışına bağlı olarak artmıştır.



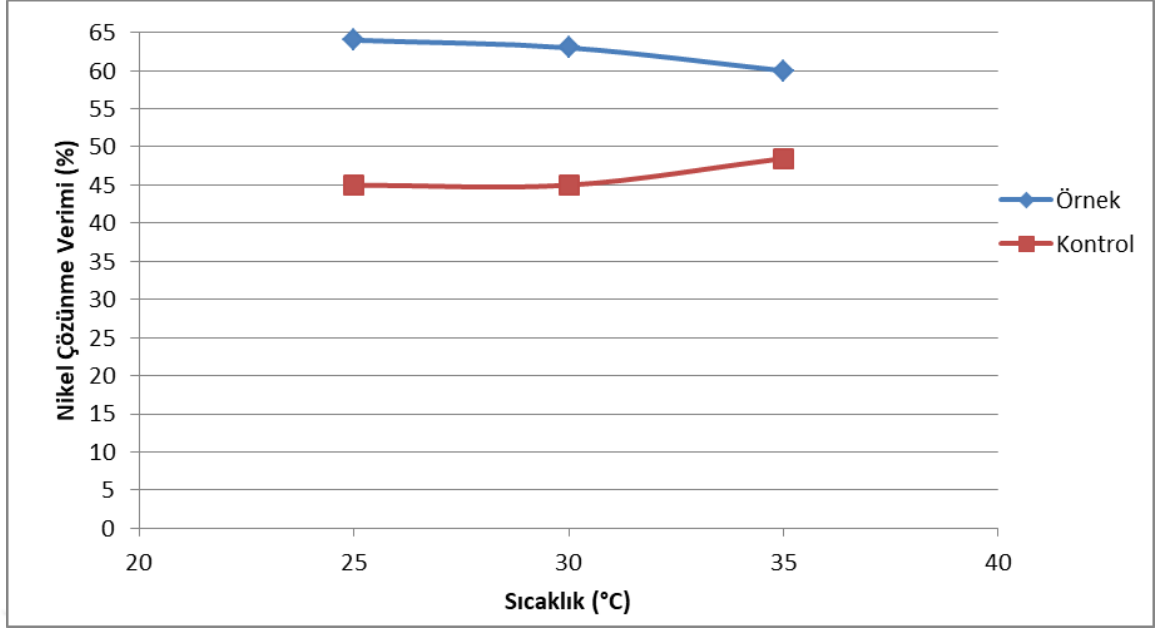
Şekil 4.16. Nontronit Cevherde Başlangıç pH'sına Bağlı Nikel Çözünmesi (Deney koşulları: 150 dev/dk, 30°C, %1,5 pülp yoğunluğu, tanecik boyutu -0,063 mm)

4.5.5. Sıcaklığın Nikel Çözünme Verimine Etkisi

Sıcaklığın biyoliç verimine etkisini belirlemek için 25°C, 30°C ve 35°C sıcaklıklardaki biyoliç verimi kıyaslanmıştır. Hem limonit hem nontronit cevherlerde en yüksek biyoliç verimi 25°C sıcaklıkta gözlenmiştir. Kontrol gruplarına bakıldığında sıcaklık artışıyla birlikte biyoliç verimininde de artış gözlenmiştir. Bu sonuçlara göre 3A süşunun optimum gelişme gösterdiği sıcaklık 25 °C'dir. Kontrol gruplarında çözünme veriminin artışı ise sıcaklık artışıyla kimyasal reaksiyonların hızlanmasıyla açıklanabilir.



Şekil 4.17. Limonit Cevherde Sıcaklığın Biyoliçe Etkisi (Deney koşulları: 150 dev/dk, 30°C, %1,5 pülp yoğunluğu, -0,063 mm tanecik boyutu)



Şekil 4.18. Nontronit Cevherde Sıcaklığın Biyoliçe Etkisi (Deney koşulları: 150 dev/dk, 30°C, %1,5 pülp yoğunluğu, -0,063 mm tanecik boyutu)

Nikel çözünmesiyle ilgili tüm veriler incelendiğinde nikel çözünmesi özellikle 8-20. günler arasında yüksek oranda gerçekleşmektedir. Bunu sebebi 8. -16. günler arasında bakteri logaritmik fazdadır ve asit üretimi yüksektir. 16. gün logaritmik fazın sonuna yaklaşıldığı için biyoliçe ortamına besleme yapılmış, buna bağlı olarak 16-20. günler arasında nikel çözünmesinde %100 artış olduğu gözlenmiştir. 20. günden sonra çözünme devam etse de nikel çözünme hızı ciddi oranda azalmıştır. 24. günden sonra bakteriyal aktivitenin azalmasına bağlı olarak çözünme hızının iyice yavaşladığı ve çözeltilinin dengeye ulaştığı gözlenmiştir. Bu sebeple biyoliçe deneyleri 32. gün sonlandırılmıştır.

Limonit cevhere ait tüm deneysel verilerin sonuçları Çizelge 4.7. ve Çizelge 4.9.'da, nontronit cevhere ait tüm deneysel verilere ait sonuçlar Çizelge 4.8. ve Çizelge 4.10.'da verilmiştir.

Çizelge 4.11.'de, her bir deney sonucunda elde edilen % çözünme veriminden kontrol grubuna ait % çözünme verimi çıkartılarak hesaplanan **net verim** verilmiştir.

Çizelge 4.6. Limonit cevhere ait nikel çözünme sonuçları (kırmızı renkle verilen sonuçlar % cinsindedir)

		Nikel Çözünmesi (ppm) Yüzde(%)									
		TANECİK BOYUTU	BAŞLANGIÇ pH'sı	4. GÜN	8. GÜN	12. GÜN	16.GÜN	20.GÜN	24.GÜN	32.GÜN	
LİMONİT	PÜLP YOĞUNLUĞU	%1,5	-0,063 mm	2	6,03 3	14,5 7	22,3 11	48,7 25	100 51	105,5 54	107,9 55
			- 0,038 mm	2	7,9 4	22,6 12	28,3 15	53,6 28	105,7 54	111,8 57	116,4 60
			-0,5 mm	2	6,5 3	18,1 9	22,8 12	45,7 23	88,8 46	99,5 51	104,8 54
		%2,5	-0,063 mm	2,5	3,9 2	7,8 4	10,9 6	36,9 19	88,8 46	98,6 51	3,9 55
			-0,063 mm	2	8,3 3	24,0 7	31,6 10	65,6 20	133,2 41	137,6 42	145,0 45
			-0,063 mm	2	10,0 2	32,6 5	40,5 6	76,5 12	148,0 23	160,8 25	168,3 26
LİMONİT KONTROL	PÜLP YOĞUNLUĞU	%1,5	-0,063 mm	2	4,2 2	10,6 5	14,3 7	40,4 21	63,4 33	63,0 32	62,4 32
			- 0,038 mm	2	6,9 4	14,5 7	17,2 9	33,1 17	67,6 35	70,6 36	72,6 37
			-0,5 mm	2	5,0 3	6,2 3	13,4 7	34,1 18	54,9 28	56,0 29	56,7 29
			-0,063 mm	2,5	2,5 1	6,3 3	10,1 5	24,9 13	39,5 20	40,7 21	41,3 21
		%2,5	-0,063 mm	2	7,2 2	16,5 5	20,0 6	52,3 16	84,6 26	98,8 30	106,9 33
			-0,063 mm	2	5,0 1	6,2 3	13,4 5	34,1 12	54,9 18	56,0 18	56,7 18

Çizelge 4.7. Nontronit cevhere ait nikel çözünme sonuçları (kırmızı renkle verilen sonuçlar % cinsindedir)

		Nikel Çözünmesi (ppm) Yüzde(%)									
		PARTİKÜL BOYUTU	BAŞLANGIÇ pH	4. GÜN	8. GÜN	12. GÜN	16.GÜN	20.GÜN	24.GÜN	32.GÜN	
NONTRONİT	PÜLP YOĞUNLUĞU	%1,5	-0,063 mm	2	12,5 5	33 13	45 13	82 31	150 58	156 60	161 62
			- 0,038 mm	2	16,2 6	43,1 17	52,8 20	87,3 33	158,6 61	160,5 62	164,0 63
			-0,5 mm	2	10 4	31 12	40 12	74 28	132 51	140 54	147 56
			- 0,038 mm	2,5	28,6 11	49,6 19	58,1 22	95,3 37	169,2 65	184,7 71	194,7 75
		%2,5	- 0,038 mm	2	23,2 5	53,2 12	63,4 15	101,9 23	179,8 41	185,7 43	189,4 44
		%5	- 0,038 mm	2	28,3 3	45,2 5	56,0 6	83,7 10	139,6 16	141,0 16	142,9 16
NONTRONİT KONTROL	PÜLP YOĞUNLUĞU	%1,5	-0,063 mm	2	10,9 4	22,0 8	33,0 8	69,0 26	113,0 43	114,2 44	115,9 44
			- 0,038 mm	2	13,2 5	27,0 10	40,5 16	72,6 28	120,5 46	121,0 46	121,7 47
			-0,5 mm	2	9,0 3	19,0 7	30,0 7	62,0 24	103,5 40	104,0 40	104,8 40
			- 0,038 mm	2,5	19,3 7	34,3 13	42,2 16	88,3 34	126,9 49	126,1 48	125,9 48
		%2,5	- 0,038 mm	2	21,2 5	37,6 9	48,6 15	80,2 18	133,2 31	132,7 31	131,6 30
		%5	- 0,038 mm	2	23,0 3	39,0 4	53,9 6	97,6 11	139,6 16	136,3 16	134,4 15

Çizelge 4.8. Limonit cevherde sıcaklığın biyoliç verimine etkisi

Limonit	Nikel Çözünme Verimi (%)	
	Sıcaklık (°C)	Örnek
25	62	36
30	61	38
35	57,5	41

Çizelge 4.9. Nontronit cevherde sıcaklığın biyoliç verimine etkisi

Nontronit	Nikel Çözünme Verimi (%)	
	Sıcaklık (°C)	Örnek
25	64	45
30	62	46
35	60	48

Çizelge 4.10. Nikelin nontronit ve limonit tipi cevherlerde net çözünme verimleri

			Tanecik boyutu	pH (Başlangıç)	Örnek	Kontrol	Net Verim
NONTRONİT	PÜLP YOĞUNLUĞU	%1,5	-0,063 mm	2	62	44	18
			- 0,038 mm	2	63	47	16
			-0,5 mm	2	56	40	16
			- 0,038 mm	2,5	75	48	27
		%2,5	- 0,038 mm	2	44	30	14
		%5	- 0,038 mm	2	16	15	1
LİMONİT	PÜLP YOĞUNLUĞU	%1,5	-0,063 mm	2	55	32	23
			- 0,038 mm	2	60	37	23
			-0,5 mm	2	54	29	25
		%2,5	-0,063 mm	2,5	55	21	34
		%5	-0,063 mm	2	45	33	12
		%5	-0,063 mm	2	26	18	8

4.6. Biyoliç Çözeltilerindeki Metal Miktarlarının Belirlenmesi

%1,5 pülp yoğunluğu -0,038 mm tanecik boyutu, başlangıç pH'sı 2,0 ve 150 dev/dk karıştırma hızı koşullarında yürütülen biyoliç deneyleri sonunda, metal yüklü biyoliç çözeltilerindeki Mg, Mn, Fe ve Ni metallerin biyoliç çözeltisindeki konsatrasyonu uygun seyreltmeler yapıldıktan sonra AAS ile belirlenmiştir. Sonuçlar % çözünme olarak verilmiştir (Çizelge 4.12.).

Çizelge 4.11. Biyoliç çözeltisindeki çözünmüş metal konsatrasyonları

	Çözünme(%)			
	Ni	Fe	Mg	Mn
Limonit zon	60	6	55	80
Nontronit zon	63	13	51	78

4.6.1. Biyoliç Çözeltisinden Demirin Uzaklaştırılması

Metal yüklü biyoliç çözeltisinde pH 3,75'te demir çöktürme işlemi gerçekleştirildikten sonra çözeltide kalan metallerin konsatrasyonu AAS cihazı ile belirlenmiştir. Sonuçlar değerlendirildiğinde her iki cevherde de Fe'in etkili biçimde çöktüğü gözlenmiştir. Fe çökmesinin yanı sıra Mg ve Mn metallerinde de çökme meydana gelmiştir. Beklenildiği üzere bu pH'da Nikel çökmesi çok düşük yüzdelerde gerçekleşmiştir. Çizelge 4.13.'te Fe çökmesinden sonra, çözeltideki metallerin % kaç oranında çöktüğü verilmiştir.

Çizelge 4.12. Demir çöktürmesinden sonra çökelen metal miktarları(%)

	Çözünme (%)			
	Ni	Fe	Mg	Mn
Limonit zon	0,1	94,2	16	36
Nontronit zon	0,05	99,9	0,1	40

4.6.2. Biyoliç Çözeltisinden Nikelin Çöktürülmesi

Biyoliç çözeltisinde demir çöktürme işlemi gerçekleştirildikten sonra pH 7,5'e yükseltılarak nikel çöktürülmüştür. Çizelge 4.14.'de iki çöktürme işlemi sonucunda metallerin % kaç oranında çöktüğü verilmiştir.

Çizelge 4.13. Çöktürme işlemlerinden sonra çökelen metal miktarları (%)

	Çözünme (%)			
	Ni	Fe	Mg	Mn
Limonit zon	98,2	99,9	20	99,1
Nontronit zon	99	99,95	6	96

Limonit tipi cevherle yapılan çalışmanın sonucun da çözünen nikel **%98,2** oranda çöktürülmüş, nikle birlikte, çözünmüş demirin %5,7'si, magnezyumun %4'ü Manganın % 63,1'i nikle birlikte çökelmiştir. Çökelti %69 nikel içermektedir.

Nontronit tipi cevherle yapılan çalışmanın sonucunda çözünen nikel **%99** oranda çöktürülmüş, nikle birlikte çözünmüş demirin %0,05'i, magnezyumun %5,9'u, manganın %56'sı nikle birlikte çökmüştür. Çökelti %82 nikel içermektedir.





5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Laterit nikel cevherlerinden nikel eldesinde kullanılan pirometalurjik ve hidrometalurjik yöntemler (YPAL, HPAL, caron prosesi) yüksek maliyet ve işletme gideri, operasyonel zorluk ve cevherin kompozisyonuna göre düşük nikel eldesi ihtimali gibi problemler nedeniyle bilim insanları son 20 yılda alternatif yöntemlere yönelmişlerdir. Biyoliç, düşük maliyet ve kolay uygulanabilirliği nedeniyle diğer yöntemlere göre tercih edilen alternatif bir yöntemdir. . 1950'li yıllardan beri sülfürlü cevherlerde biyoliç yönteminin kullanılması yaygındır ancak, okside cevherlerle yapılan çalışmalar kısıtlıdır.

Mikroorganizmaların sülfürlü cevherlerden metalleri çözme ve harekete geçirme yeteneği aşağıdaki üç mekanizmaya dayanmaktadır: (1) redoks reaksiyonları, (2) inorganik asit oluşumu ve (3) kompleks oluşturan ajanların (örneğin, organik asitler) atılması.

Bu çalışmada, sülfürlü mineral içermeyen okside nikel lateritlerinin bakteriyel liçinde kemolitotrofik mikroorganizmaların kullanılabilirliği ve biyoliçi etkileyen bazı parametreler için optimum değerleri belirlemek amaçlanmıştır.

Biyoliç deneme sonuçlarına göre; limonit cevher için elde edilen maksimum verim %62'dir. Başlangıç pH'sı 2,0 olan biyoliç besiyerine %1,5 pülp eklenmiş ve 150 dev/dk çalkalama ile 25°C'de 32 gün nikelin biyoliçi gözlenmiştir. Nontronit cevherde maksimum verim (%75) başlangıç pH'sı 2,5 olan liç besiyerine %1,5 pülp eklenerek 150 dev/dk çalkalama ile 30°C'de 32 günde gerçekleşmiştir (kontroller 4 gün aralıklarla tekrarlanmıştır). Bu çalışmada elde edilen verim; Gördesteki laterit nikel cevherinin biyoliç ortamına kükürt eklendiğinde, sülfürik asit üretimiyle metal çözündürülmesinin mümkün olduğu gösterilmiştir. Çalışmada kullanılan doğal izolat *At. ferrooxidans* bakterisinin biyoliç uygulamalarında potansiyel bir suş olabileceği düşünülmektedir. Elde edilen veriler ışığında; optimum biyoliç verimi elde etmek için uygun koşullar ile ilgili çıkarımlar aşağıda sıralanmıştır.

1. Öncelikle biyoliç verimini etkileyen en önemli faktörün pülp yoğunluğu olduğu sonucuna varılmıştır. Artan pülp yoğunluğuyla hem hızlı asit tüketimi hem de homejen karıştırmanın zorlaşması biyoliç verimini önemli önemli ölçüde etkilemiştir. Bulunan deneysel verilere göre (Çizelge 4.7. ve 4.8.) -0,038 mm nontronit cevherde %1,5 ve %5 pülp yoğunlukları arasında ki verim farkı %47 limonit cevherde %29'dür. Bu çalışmada çalkalama hızı sabit tutulmuştur. Çalkalama hızını arttırarak bu farkın kısmen azaltılabileceği düşünülmektedir. Çünkü benzer pH değişimleri gözlenen deney gruplarında verim açısından ciddi farklar vardır. Çalkalamalı sistemde pülp yoğunluğu arttıkça, çöken katı madde artmakta ve homejen karıştırma zorlaşmaktadır. Hem karıştırma hızının hemde hava girişinin kontrol edilebileceği reaktör liçinde yada mikroorganizmanın ayrı cevherin ayrı tutulduğu kolon liçi gibi farklı sistemlerde

çalışılarak yüksek pülp yoğunluğunun negatif etkileri kısmen azaltılabilecek olabilir ancak yine de pülp yoğunluğu sınırlayıcı faktör olacaktır. Önceki bölümlerde sunulan literatürdeki birçok farklı çalışmada pülp yoğunluğu %15'in altında tutulmuştur.

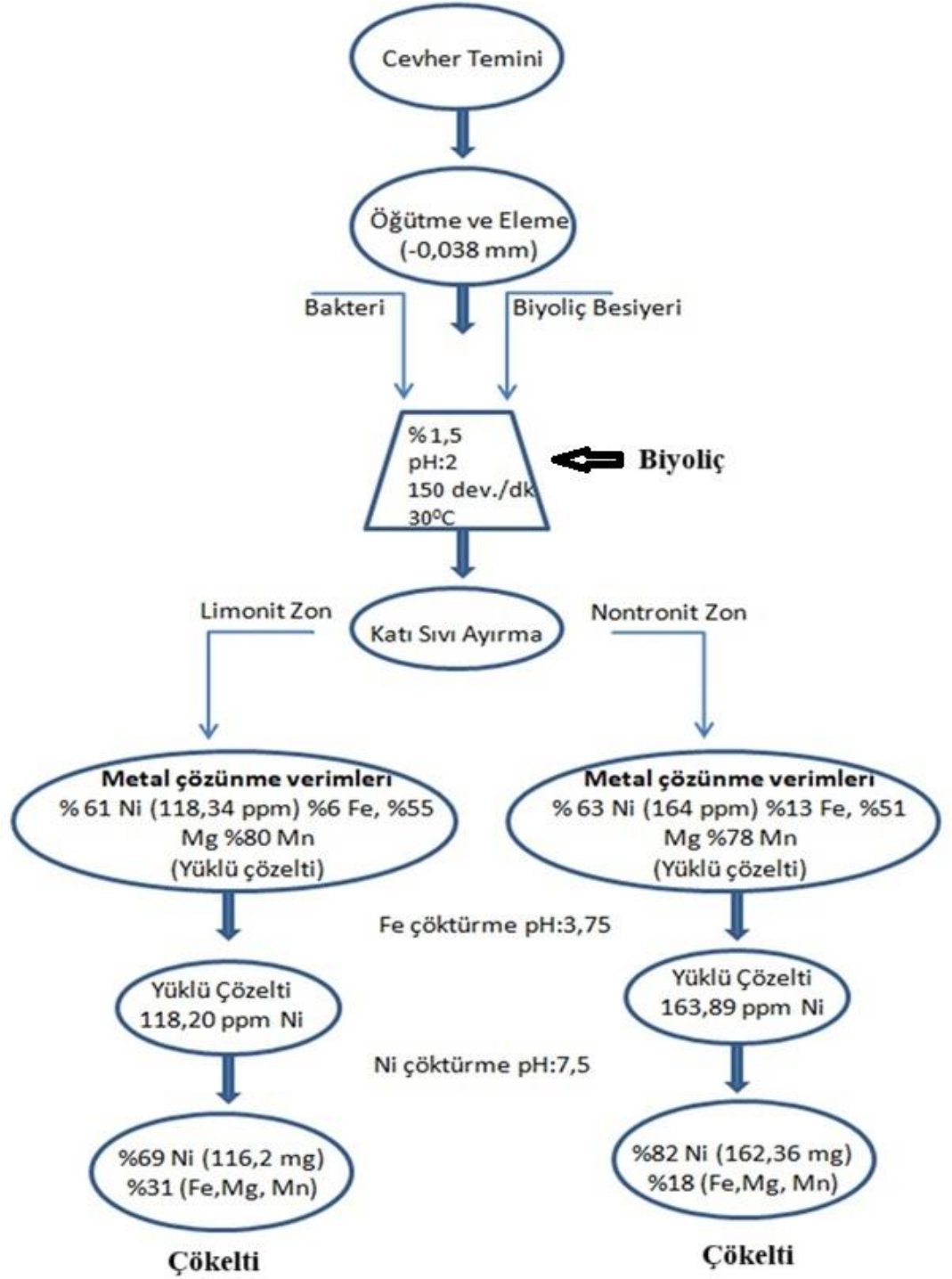
2. Biyoliç verimini etkileyen önemli faktörlerden biride cevherin minerolojik yapısıdır. Yaptığımız çalışmada limonit ve nontronit cevherlerden maksimum nikel çözünmesi arasındaki fark %15'dir. Nontronit cevherdeki nikel muhtemelen daha hızlı ve kolay bir şekilde çözünen kil fazındayken, limonit cevherdeki nikel hematit ve götit fazdadır. İncelenen literatüre bakıldığında da aynı koşullarda farklı minerolojik yapıya sahip cevherlerde %5-%30 arasında verim farkı oluşabilmektedir. Bu nedenle laterit nikel cevherlerinin biyoliç uygulamasında her cevherin minerolojik bileşimi dikkate alınarak büyük ölçekli uygulamalar için Ar-Ge çalışması yapılmalıdır.
3. Tanecik boyutunun etkisine bakıldığında hem limonit hem nontronit cevherde, -0,038 mm ve -0,5 mm tanecik boyutu arasındaki verim farkı %6'dır. Ancak literatürde tanecik boyutunun çok daha yüksek verim farkına yol açtığı çalışmalar mevcuttur. Ayrıca bölüm 4.5.2.'de açıklandığı üzere tanecik boyutundaki azalmayla, biyoliç verimi arasında her zaman doğru orantı gözlenmemektedir. Bu sebeple ideal tanecik boyutunu belirlemek her cevherin Ar-Ge çalışması yapılmalıdır.
4. Başlangıç pH'sının biyoliç verimi üzerine etkisine bakıldığında limonit cevherde pH 2,0'da %23 olan **net verim** farkı pH 2,5'te %34'e yükselmiştir. Nontronit cevherde başlangıç pH'sı 2,0 ve 2,5 arasında çözünme verim farkı %12'dir ve kontrol gruplarına bakıldığında kayda değer bir fark yoktur. Bu sonuçlara göre başlangıç pH'sı direk olarak bakterinin aktivitesini etkilemektedir. Başlangıç pH'ı 2,5 olduğunda bakteri aktivitesi daha yüksektir. İncelenen literatüre bakıldığında farklı başlangıç pH'sının biyoliç verimi üzerinde yarattığı verim farkı %20'ye kadar çıkmaktadır. Biyoliç çalışmasında kullanılan mikroorganizmanın optimum aktivite gösterdiği pH tespit edilmelidir. *Acidithiobacillus* cinsine ait mikroorganizmaların pH 3'ün altında optimum aktivite gösterdiği bilinsede türler ve suşlar arasında farklılık göstermektedir. Optimum pH'nın belirlenmesi başlangıç pH'sı ayarlanırken gereksiz miktarda sülfürik asit kullanımını engelleyecektir.
5. Çözünen nikelin hidrositle çöktürülmesinde hem limonit (%98,2) cevherde hemde nontronit cevherde (%99) neredeyse nikelin tamamı çökmüştür. Deney sonunda elde edilen metal-hidroksit çöktürmelerdeki nikel oranları limonit cevherde %69 nontronit cevherde %82'dir. Çözünen demirin çoğu çözüldükten rahatlıkla uzaklaştırılırken çöktürde magnezyum ve mangan safsızlık yaratmaktadır.
6. Tüm deneysel veriler incelendiğinde elde ettiğimiz nikel çözünme oranları incelenen literatürle paralellik göstermektedir. Literatüre baktığımızda biyoliç çalışmalarında nikel çözünme verimi %30-%98 arasında değişmektedir (Çizelge 4.14.).

Denemeler sonucunda bulunan çözünme verimi (%26-%75) literatürle paraleldir ve geliştirilmeye açıktır. Çizelge 4.14.'de başka araştırmacıların yaptığı biyoliç çalışmalarında elde ettikleri nikel çözünme oranları verilmiştir.

7. Sonuçlar incelendiğinde %1.5 pülp yoğunluğu -0,038 mm tanecik Başlangıç pH:'sı 2 ve 30°C sıcaklıkta 1L hacminde gerçekleştirilen biyoliç verimi göz ününe aldığıında (Şekil 5.1.), teorik olarak 1 kg limonit tipi cevherden 7,74 g Ni, 1 kg nontronit tipi cevherden 10,82 g Ni elde edilebilmektedir. 1 kg cevherin biyoliçi için 666 g S, Çöktürme deneyleri için 3,984 L 1M NaOH tüketilmektedir.

Çizelge 5.1. Farklı çalışmalarda elde edilen nikel çözünme verimleri

Kullanılan mikroorganizma	Nikel çözünmesi (%)	Kaynak	Cevher Temini
<i>Aspergillus niger</i>	31,34	Mohapatra ve ark (2009)	Orissa/Hindistan
<i>Pseudomonas putida</i>	90,6	Hosseini Nasab ve ark (2020)	Horasan/İran
<i>At.ferrooxidans</i>	82	Behera ve ark (2018)	Mpumalanga /Güney Africa
<i>At.ferrooxidans</i> , <i>At.thiooxidans</i> , <i>L.ferrooxidans</i> (karışık kültürü)	97	Çiftçi ve Atik (2017)	Çaldağ,Manisa
<i>Aspergillus niger</i> ve <i>Penicillium sp.</i>	34,6	Valix ve ark (2001)	_____
<i>At.ferrooxidans</i>	70	Hallberg ve ark (2011)	Batı Avustralya
<i>At.thiooxidans</i>	66	Stankovic ve ark (2024)	Piauı /Brezilya
<i>At.thiooxidans</i>	53-57	Marreo ve ark (2015)	Moa/Cuba.
<i>Acidithiobacillus sp.</i>	65	Meshkini ve Bayragh (2022)	Bavanat/İran
<i>At.ferrooxidans</i> , <i>At.thiooxidans</i> , <i>At. caldus</i> <i>L.ferrooxidans</i> (karışık kültürü)	60-65	Simate ve Ndlovu (2009)	_____



Şekil 5.1. Deneyleri Özetleyen Akım Şeması

Tüm sonuçlar değerlendirildiğinde Türkiye’deki nikel rezervinin yaklaşık %65’ini oluşturan (Abalı, 2020) Manisa-Gördeste’ki laterit nikel yatakları endüstriyel ölçekte biyoliç uygulanabilecek potansiyele sahiptir ancak büyük ölçeklerde biyoliç yönteminin uygulanabilirliğinin belirlenmesi için daha fazla çalışma yapılması gerekmektedir. Bu çalışmadan elde edilen veriler ve çalışma sürecindeki laboratuvar deneyimleri sonucunda aşağıdaki önermelerin uygun olabileceği düşünülmüştür.

1. Yapılan çalışmada saf kültür *At. ferroxidans* bakterisi kullanılmıştır. *At. ferroxidans* ve *At. thiooxidans* 'ın karışık kültürü kullanılarak biyoliç denemeleri uygulanabilir, çünkü bakteriler arasındaki rekabet ve söz konusu iki türün farklı optimum şartlarda gelişme yetenekleri biyoliç verimliliğini artırabilir. Bu kapsamda dünya literatürlerinde benzer bildirimler bulunmaktadır.
2. Bu çalışmada çalkalamalı koşullarda erlen ölçeği kullanılmıştır. Koşullar optimize edilerek, tank reaktörleri için veri oluşturulmuştur. Bir sonraki adım reaktör boyutunda deneme olabilir.
3. Yığın liçi İşlemleri tank reaktör işlemlerinden daha ucuz ve uygulanması daha kolaydır. Ayrıca; karıştırma, pülp yoğunluğu, sıcaklık kontrolü gibi parametrelere gereksinim duyulmadığı için yığın liçi özelinde laboratuvar ölçeğinde denemeler yapılabilir.
4. Deneyler sonucunda elde edilen yüklü biyoliç çözeltilesindeki çözünen demir oranı YBAL'ne kıyasla çok düşüktür. Ayrıca, demir çöktürme işleminden sonra büyük oranda (>%94) çöktürülmüştür. Bu sebeple biyoliç yöntemi demir ve nikeli ayırmak avantajlıdır.
5. Nikelin neredeyse tamamının çökmesiyle (>%98) 2 aşamalı çöktürme yönteminin nikel eldesi için uygun olduğu sonucuna varılmıştır. Ancak, biyoliç ile elde edilen karışık metal hidroksit çökeltilerindeki nikel oranı istenilen değerlerin altındadır. Fe, Mn ve Mg metallerinin uzaklaştırılması için, farklı çöktürme ajanları kullanılarak ve çöktürme parametreleri (örneğin pH, karıştırma hızı ve süresi) çalışılarak, hidroksit çöktürme yöntemi optimize edilmelidir.



KAYNAKLAR

- Abalı Y., Yemiş F., Demirel N., Arslan, O., Yılmaz O., 2020. Lateritik Cevherlerden Sülfürik Asitle Nikelin Atmosfer Liçi ile Çözündürülmesinin Optimizasyonu. Soma Meslek Yüksekokulu Teknik Bilimler Dergisi, 1(30): 1-14.
- Agatzini-Leonardou, S., Tsakiridis, P. E., Oustadakis, P., Karidakis, T., Katsiapi, A., 2009. Hydrometallurgical Process For The Separation And Recovery of Nickel From Sulphate Heap Leach Liquor of Nickeliferrous Laterite Ores. Minerals Engineering, 22(14): 1181-1192.
- Ahmadi, A., Khezri, M., Akbar Abdollahzadeh, A. A., Askari, M., 2015. Bioleaching of Copper, Nickel and Cobalt From The Low Grade Sulfidic Tailing Of Golgohar Iron Mine, Iran. Hydrometallurgy, 154: 1-8.
- Amils, R., Fernández-Remolar, D., Ipbsl Team., 2014. Río Tinto: A Geochemical and Mineralogical Terrestrial Analogue of Mars. Life, 4(3): 511-534.
- Asadrokt, M., ve Zakeri, A., 2022. Chemo-physical Concentration of a Low-grade Nickel Laterite Ore. Minerals Engineering, 178: 107398.
- Bajestani, M. I., Mousavi, S. M., Shojaosadati, S. A., 2014. Bioleaching of heavy metals from Spent Household Batteries Using *Acidithiobacillus ferrooxidans*: Statistical Evaluation And Optimization, Sep Purif Technol, 132: 309–316.
- Behera, S. K., ve Mulaba-Bafubiandi, A. F., 2015. Advances in Microbial Leaching Processes For Nickel Extraction From Lateritic Minerals-A Review. Korean Journal of Chemical Engineering, 32: 1447-1454.
- Behera, S. K., Manjiaiah, M., Sekar, S., Panda, S. K., Mavumengwana, V., Mulaba-Bafubiandi, A. F., 2018. Optimization Of Microbial Leaching of Base Metals From A South African Sulfidic Nickel Ore Concentrate by *Acidithiobacillus ferrooxidans*. Geomicrobiology Journal, 35(6): 447-459.
- Brierley, J. A., ve Brierley, C. L., 1999. Present and Future Commercial Applications of Biohydrometallurgy. In Process Metallurgy 9: 81-89.
- Butt, C. R., Cluzel, D., 2013. Nickel laterite ore deposits: Weathered serpentinites. Elements, 9(2): 123-128.
- Campodonico, M. A., Vaisman, D., Castro J. F., Razmilic, V., Mercado. F., Andrews, B. A, Feist, A. M., Asenjo, J. A., 2016. *Acidithiobacillus ferrooxidans*'s Comprehensive Model Driven Analysis of The Electron Transfer Metabolism and Synthetic Strain Design For Biomining Applications. Metab Eng Commun, 3: 84–96
- Chaerun, S. K., Sulisty, R. S., Minwal, W. P., Mubarak, M. Z., 2017. Indirect Bioleaching of Low-Grade Nickel Limonite and Saprolite Ores Using Fungal Metabolic Organic Acids Generated by *Aspergillus niger*. Hydrometallurgy, 174: 29-37.

- Chen, J. W., Gao, C. J., Zhang, Q. X., Xiao, L. S., Zhang, G. Q., 2011. Leaching of Nickel-Molybdenum Sulfide Ore in Membrane Biological Reactor. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 21(6): 1395-1401.
- Coto, O., Galizia, F., Hernandez, I., Marrero J., Donati, E., 2008. Cobalt and Nickel Recoveries From Laterite Tailings by Organic and Inorganic Bio-acids. Hydrometallurgy, 94(1-4): 18-22.
- Çetintaş, S., 2014. Lateritik Cevherden Sülfürik Asit ile Nikel Kazanımına Deneysel Tasarım Yaklaşımı ve Kinetik Modelleme, Yüksek Lisans, Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli, 85 s.
- Çelik, H., 2009. Yığın Biyooksidasyon Teknolojisinin Refrakter Altın Konsantrelerine Uygulanması. Journal of Science and Technology of Dumlupınar University, (19): 71-82.
- Çiftçi, H., Atik, S., 2014. Lateritik Cevherlerden Nikel Kazanımında Biyoliç Yöntemi. Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fen Bilimleri Dergisi, 30(4): 275-284.
- Çiftçi, H., Atik, S., Gürbüz, F., 2018. Biocatalytic And Chemical Leaching of A Low-Grade Nickel Laterite Ore. Metallurgical Research & Technology, 115(3): 305.
- Çiftçi, H., ve Atik, S., 2017. Microbial Leaching of Metals From A Lateritic Nickel Ore by Pure and Mixed Cultures of Mesophilic Acidophiles. Metallurgical Research & Technology, 114(5): 508.
- Çoban, O., 2014. Çaldağ Lateritik Nikel Cevherlerinden Hidrometalurjik Yöntemlerle Nikel ve Kobalt Eldesi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 89 s.
- Dalvi, A. D., Bacon, W. G., Osborne, R. C., 2004 The Past and the Future of Nickel Laterites. PDAC 2004 International Conference Trade Show and Investors Exchange, Toronto, U.S.A.
- Mishra, J. D. S. D., 2007. Bioleaching of Lateritic Nickel Ore Using Chemolithotrophic Microorganisms (*Acidithiobacillus ferrooxidans*). Yüksek Lisans Tezi National Institute of Technology, Rourkela 58 s.
- Ehrlich, H. L., 2004. Beginnings of Rational Bioleaching and Highlights in The Development of Biohydrometallurgy: A Brief History. Eur. J. Miner. Process. Environ. Prot,4: 102-112.
- Elias, M., 2002. Nickel laterite deposits - geological overview, resources and exploitation. In: Giant ore deposits: Characteristics, genesis and exploitation. CODES Special Publication, Centre for Ore Deposit Research, University of Tasmania, 205-220.
- Georgiou, D., Papangelakis, V. G., 1998. Sulphuric Acid Pressure Leaching of Limonitic Laterite: Chemistry and kinetics. Hydrometallurgy, 49: 23-46.
- Ghorbani, Y., Oliazadeh, M., Shahvedi, A., Roohi, R., Pirayehgar, A., 2007. Use of Some Isolated Fungi In Biological Leaching Of Aluminium From Low Grade Bauxite. African Journal of Biotechnology, 6(11): 1284-1288.
- Ghosh, S., ve Paul, A. K., 2016. Bioleaching of Nickel by *Aspergillus humicola* SKP102 Isolated From Indian Lateritic Overburden. Journal of Sustainable Mining, 15(3): 108-114.
- Giaveno, A., ve Donati, E., 2001. Bioleaching of Heazlewoodite by *Thiobacillus* spp. Process Biochemistry, 36: 955-962.

- Giese, E. C., Carpen, H. L., Bertolino, L. C., Schneider, C. L., 2019. Characterization and Bioleaching of Nickel Laterite Ore Using *Bacillus subtilis* Strain. *Biotechnology progress*, 35(6): e2860.
- Gleeson, S. A., Butt, C. R. M., Elias, M., 2003. Nickel Laterites: Review. *Society of Economic Geologists (SEG) Newsletter*, 54: 1-18
- Göktaş, M., 2007. Manisa- Turgutlu- Çaldağ nikel ham cevherinin yapısal özelliklerinin ve bunlara dayalı zenginleştirilebilirliğinin araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir, 106 s.
- Hallberg, K. B., Grail, B. M., Du Plessis, C. A., Johnson, D. B., 2011. Reductive Dissolution of Ferric Iron Minerals: A New Approach For Bio-Processing Nickel Laterites. *Minerals Engineering*, 24(7): 620-624.
- Hanford, G. S., ve Vargas, T., 2001 *Chemical and Electrochemical Basis of Bioleaching Processes. Hydrometallurgy*, 59: 135-145.
- Hetz, S. A., ve Schippers, A., 2024. Do Ferrous Iron-Oxidizing Acidophiles (*Leptospirillum* Spp.) Disturb Aerobic Bioleaching of Laterite Ores by Sulfur-Oxidizing Acidophiles (*Acidithiobacillus* spp.) *Frontiers in Microbiology*, 15: 1359019.
- Hosseini Nasab M., Noaparast, M., Abdollahi, H., 2021. Direct and Indirect Bio-Leaching of Co and Ni from an Iron-Rich Laterite Ore using *Delftia Acidovorans* and *Acidithiobacillus ferrooxidans*. *Journal of Mining and Environment*, 12(2): 471-489.
- Hosseini Nasab, M., Noaparast, M., Abdollahi, H., 2020. Dissolution Optimization and Kinetics of Nickel and Cobalt From Iron-Rich Laterite Ore Using Sulfuric Acid at Atmospheric Pressure. *International Journal of Chemical Kinetics*, 52: 283–298.
- Jang, H. C., ve Valix, M., 2017. Overcoming the Bacteriostatic Effects of Heavy Metals on *Acidithiobacillus thiooxidans* For Direct Bioleaching of Saprolitic Ni Laterite Ores. *Hydrometallurgy*, 168: 21-25.
- Johnson, D. B., 2003. Importance of microbial in the development of sustainable technologies for mineral processing and wastewater treatment.
<http://www.etpsmr.org/contents/pages/publicPages/nesmi/Conferences/2003-03Prague/Papers/Johnson.pdf>. [Son erişim tarihi: 01.07.2019].
- Johnson, D. B., ve du Plessis, C. A., 2015. Biomining in Reverse Gear: Using Bacteria to Extract Metals From Oxidised Ores. *Minerals Engineering*, 75: 2-5.
- Johnson, D. B., Smith, S. L., Santos, A. L., 2021. Bioleaching of Transition Metals From Limonitic Laterite Deposits and Reassessment of the Multiple Roles of Sulfur-Oxidizing Acidophiles in the Process. *Frontiers in Microbiology*, 12: 703177.
- Kaksonen, A. H., Deng, X., Bohu, T., Zea, L., Khaleque, H. N., Gumulya, Y., Boxall, N. J., Morris, C., Cheng, K. Y., 2020. Prospective directions for biohydrometallurgy. *Hydrometallurgy*, 195: 105376.

- Ke, J., Li, H., 2006. Bacterial Leaching of Nickel-Bearing Pyrrhotite. *Hydrometallurgy*, 82(3-4): 172-175.
- Keskin, Ö., 2019. Gördes Ve Karaçam Lateritik Nikel Cevherlerinin Ybal Sonrası Ccd Prosesinde Çökme Davranımının İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Ankara, 90 s.
- Klauber, C., 2008. A Critical Review Of The Surface Chemistry Of Acidic Ferric Sulphate Dissolution Of Chalcopyrite With Regards To Hindered Dissolution. *International Journal of Mineral Processing* 86: 1-17.
- Korkut, A. İ., 2022. Elektrolitik nikel kaplama atık çamurundan nikel geri kazanımına mekanik aktivasyonun etkisinin araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Bilecik, 78 s.
- König, U., 2021. Nickel Laterites—Mineralogical Monitoring for Grade Definition and Process Optimization. *Minerals*, 11(11): 1178.
- Krause, E., Blakey, B. C., Papangelakis, V. G., 1998. Pressure Acid Leaching of Nickeliferous Laterite Ores: Alta 1998 Nickel/Cobalt Pressure Leaching and Hydrometallurgy Forum. ALTA Metallurgical Services, Melbourne, Perth, Australia.
- Kremser, K., Maltschnig, M., Schön, H., Jandric, A., Gajdoski, M., Vaculovic, T., Kucera, J., Guebitz, G.M., 2022. Optimized Biogenic Sulfuric Acid Production and Application in The Treatment of Waste Incineration Residues. *Waste Manag.*, 144: 182–190.
- Liu, K., Chen, Q., Hu, H., Yin, Z., Wu, B., 2010. Pressure Acid Leaching of A Chinese Laterite Ore Containing Mainly Maghemite and Magnetite. *Hydrometallurgy*, 104(1): 32-38.
- Lorand, J., P., Luguët, A., 2016. Chalcophile and Siderophile Elements İn Mantle Rocks: Trace Elements Controlled by Trace Minerals. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 81(1): 441-488.
- MTA: (Eroğlu G., Akgök Y.Z.,) 2018. Dünyada ve Türkiye’de Nikel.
<https://www.mta.gov.tr/v3.0/sayfalar/bilgi-merkezi/maden-serisi/nikel.pdf>
- Marrero, J., Coto, O., Goldmann, S., Graupner, T., Schippers, A., 2015. Recovery of Nickel and Cobalt from Laterite Tailings by Reductive Dissolution under Aerobic Conditions Using *Acidithiobacillus* Species. *Environmental science & technology*, 49(11): 6674–6682.
- Marrero, J., Coto, O., Schippers, A., 2017. Anaerobic and Aerobic Reductive Dissolutions of Iron-Rich Nickel Laterite Overburden by *Acidithiobacillus*. *Hydrometallurgy*, 168: 49-55.
- Marrero, J., Coto, O., Schippers, A., 2020. Metal bioleaching: fundamentals and geotechnical application of aerobic and anaerobic acidophiles. In: *Biotechnological applications of extremophilic microorganisms*, CPI Books GmbH, Berlin, 391s
- McBride, M.B., 1989. Reactions Controlling Heavy Metal Solubility in Soils. *Advances in Soil Science*, 10: 1-56.
- McCready, R. G. L., ve Gould, W. D., 1990. Bioleaching of Uranium. In: *Microbial Mineral*

- Recovery. McGraw-Hill, New York, syf. 107-125.
- Meshkini, M., ve Samiee Bayragh, A., 2022. Bio-Hydrometallurgical Extraction of Nickel From Low-Grade Laterite Nickel Ore. *AUT Journal of Civil Engineering*, 6(1): 105-118.
- Mohapatra, S., Sengupta, C., Nayak, B. D., 2009. Biological Leaching of Nickel and Cobalt From Lateritic Nickel Ore of Sukinda Mines. *Korean Journal Chemical. Engineering.*, 26: 108–114.
- Moskalyk, R. R., ve Alfantazi, A. M., 2002. Nickel Laterite Processing and Electrowinning Practice. *Minerals Engineering* 15: 593-605.
- Nasuh A., 2014. Eskişehir-Karaçam Lateritik Cevherinden Basınçlı Sülfürik Asit Liçi ile Nikel Kazanımı. Doktora tezi, Hacettepe Üniversitesi, Ankara, 94 s.
- Oliveira, V. A., Rodrigues, M. L. M., Leão, V. A., 2021. Reduction Roasting and Bioleaching of a Limonite Ore. *Hydrometallurgy*, 200: 105554.
- Oxley, A., Smith, M. E., Caceres, O., 2016. Why heap leach nickel laterites? *Minerals Engineering*, 88: 53-60.
- Pawlowska, A., ve Sadowski, Z., 2017. Influence of Chemical And Biogenic Leaching On Surface Area And Particle Size of Laterite Ore. *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, 2(53): 869-877.
- Pechlivani, E. M., 2013. Development of composite materials and coatings by nitriding and carburizing methods on metal matrices: study of structural, mechanical and anti-corrosion behavior of the final products. Doktora Tezi, Thessaloniki Aristotle Üniversitesi, Thessaloniki, 152 s.
- Petrus, H. B. T. M., Wanta, K. C., Setiawan, H., Perdana, I., Astuti, W., 2018. Effect of pulp density and particle size on indirect bioleaching of Pomalaa nickel laterite using metabolic citric acid. *IOP Conference Series Materials Science and Engineerin*, 285(1): 012004
- Pillay, K., 2015. Mineralogical effects on the dense medium separation of low grade nickel sulfide ore. Yüksek Lisans Tezi, Cape Town Üniversitesi, Güney Africa, 200 s.
- Rawlings, D. E., 2005. Characteristics and Adaptability of Iron- and Sulphur-Oxidising Microorganisms Used For The Recovery of Metals From Minerals and Their Concentrates. *Microbial Cell Factories*, 4(1): 13.
- Roberto, F. F., ve Schippers, A., 2022. Progress In Bioleaching: Part B, Applications of Microbial Processes by The Minerals Industries. *Applied Microbiology And Biotechnology*, 106(18): 5913-5928.
- Sadeghieh, S.M., Ahmadi, A., Hosseini ,M. R., 2020. Effect of Water Salinity on The Bioleaching of Copper, Nickel and Cobalt From The Sulphidic Tailing of Golgohar Iron Mine, Iran. *Hydrometallurgy*, 198: 105503
- Sajjad, W., Zheng, G., Din, G., Ma, X., Rafiq, M., Xu, W., 2019. Metals Extraction From Sulfide Ores With Microorganisms: The Bioleaching Technology and Recent

- Developments. Transactions of The Indian Institute of Metals, 72: 559-579.
- Sand, W., Gehrke, T., Jozsa, P. G., Schippers, A., 2001. Biochemistry of Bacterial Leaching-Direct vs. Indirect Bioleaching. Hydrometallurgy, 59(2-3): 159-175.
- Santos, A. L., ve Schippers, A., 2022. Reductive Mineral Bioprocessing. In: Biomining technologies: Extracting and recovering metals from ores and wastes Cham: Springer International Publishing. syf 261-274.
- Schippers, A., Hedrich, S., Vasters, J., Drobe, M., Sand, W., Willscher, S., 2014. Biomining: Metal Recovery from Ores with Microorganisms. In: Geobiotechnology I. Metal-related Issue. Springer, Heidelberg 244s.
- Schippers, A., Jozsa, P. G., Sand, W., 1996. Sulfur chemistry in bacterial leaching of pyrite. Applied and Environmental Microbiology, 62(9): 3424-3431.
- Schippers, A., ve Sand, W., 1999. Bacterial Leaching of Metal Sulfides Proceeds by Two Indirect Mechanisms Via Thiosulfate or Via Polysulfides And Sulfur. Applied and Environmental Microbiology, 65(1): 319-321.
- Simate, G. S., 2009. Bacterial leaching of nickel laterites using chemolithotrophic microorganisms. Yüksek lisans tezi, Witwatersrand üniversitesi, Johannesburg, 240 s.
- Simate, G.S., Ndlovu, S., Gericke, M., 2009. The Effect of Elemental Sulphur and Pyrite on The Leaching of Nickel Laterites Using Chemolithotrophic Bacteria. Hydrometallurgy Conference, Randburg, South Africa
- Smith, S.L., Grail, B.M., Johnson, D.B., 2017. Reductive bioprocessing of cobalt bearing limonitic laterites. Mineral Engineering, 106: 86–90.
- Stanković, S., Goldmann, S., Kraemer, D., Ufer, K., Schippers, A., 2024. Bioleaching of A Lateritic Ore (Piauí, Brazil) in Percolators. Hydrometallurgy, 224: 106262.
- Stanković, S., Martin, M., Goldmann, S., Gäbler, H. E., Ufer, K., Haubrich, F., Moutinto, V. F., Giese, E. C., Neumann, R., Stropper, J. L., Stummeyer, J., Kaufhold, S., Dohrmann, R., Oxley, A., Marbler, H., Schippers, A., 2022. Effect of Mineralogy on Co and Ni Extraction From Brazilian Limonitic Laterites Via Bioleaching and Chemical Leaching. Minerals Engineering, 184: 107604.
- Stanković, S., ve Schippers, A., 2023. Bioleaching and Chemical Leaching of Lateritic Ore in Percolators. Association of Metallurgical Engineers of Serbia. 1(2): 45-49.
- Stanković, S., Srećko, S., Miroslav, S., Marković, B., Friedrich, B., 2020. Review of The Past, Present, and Future of The Hydrometallurgical Production Of Nickel and Cobalt From Lateritic Ores. Metallurgical & Materials Engineering, 26(2): 199-208.
- Sun, J. Z., Wen, J., Chen, B., 2019. Mechanism of Mg²⁺ Dissolution From Olivine and Serpentine: Implication For Bioleaching of High-Magnesium Nickel Sulfide Ore At Elevated pH. International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials, 26(9): 1069 – 1079.
- Sun, J. Z., Wu, B., Chen, B W., 2022. Application of Response Surface Methodology in Optimization

- of Bioleaching Parameters For High-Magnesium Nickel Sulfide Ore. *Journal of Central South University*, 29: 1488–1499.
- Tang, J.A., ve Valix, M., 2006. Leaching of Low Grade Limonite and Nontronite Ore By Fungi Metabolic Acids. *Minerals Engineering* 19: 1274–1279.
- Taylor, A., 1997. Process Selection, Nickel/Cobalt Pressure Acid Leaching and Hydrometallurgy Forum. ALTA Metallurgical Services, Melbourne, Perth, Australia.
- Thorne, R. L., Roberts, S., Herrington, R. 2012. Climate Change and The Formation of Nickel Laterite Deposits. *Geology*, 40(4). 331-334.
- Top, S., Kursunoglu, S., Ichlas, Z.T., 2020. Effects of leaching parameters on the dissolution of nickel, cobalt, manganese and iron from Caldag lateritic nickel ore in hydrochloric acid solution. *Canadian Metallurgical Quarterly*, 59(3): 368-376.
- Tunç Parlak, T., 2017. Lateritik Nikel Cevherinden Nikel Ve Kobalt Kazanım Koşullarının Geliştirilmesi. Doktora tezi, Sakarya Üniversitesi, Sakarya, 153 s.
- Tzeferis, P., 1992. Mechanisms Important For Bioleaching and Metal Accumulation by Microorganisms. *Metalleiologika Metallourgika Chronika*, 2(1): 85-107.
- USGS, Mineral Commodity Summaries, 2025.
<https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2025/mcs2025-nickel.pdf> [Son erişim tarihi: 27.03.2025].
- Valix, M., Tang J. Y., Cheung, W. H., 2001. The Effects of Mineralogy on The Biological Leaching of Nickel Laterite Ores. *Minerals Engineering*, 14(12): 1629-1635.
- Vardanyan, A., Stepanyan, S., Vardanyan, N., Markosyan, L., Sand, W., Vera, M., Zhang, R., 2015. Study and Assessment of Microbial Communities in Natural And Commercial Bioleaching Systems. *Minerals Engineering*, 81: 167-172.
- Vasan, S. S., Modak, J. M., Natarajan, K. A., 2001. Some Recent Advances in The Bioprocessing of Bauxite. *International Journal of Mineral Processing*, 62: 173-186.
- Wang, X., Sun, Z., Liu, Y., Min, X., Guo, Y., Li, P., Zheng, Z. 2019. Effect of Particle Size on Uranium Bioleaching in Column Reactors From A Low-Grade Uranium Ore. *Bioresource Technology*, 281: 66-71.
- Watling, H. R., 2007. The Bioleaching of Nickel-Copper Sulphides. *Hydrometallurgy*, 91: 70-80.
- Watling, H.R., Collinson, D. M., Fjastad, S., Kaksonen, A. H., Li, J., Morris, C., Perrot, F. A., Rea, S. M., Shiers, D. W. 2014. Column Bioleaching of A Polymetallic Ore: Effects of pH and Temperature on Metal Extraction and Microbial Community Structure. *Minerals Engineering*, 58: 90-99.
- Wu, S., Kuschik, P., Wiessner, A., Müller, J., Saad, R. A., Dong, R., 2013. Sulphur Transformations in Constructed Wetlands For Wastewater Treatment: A review. *Ecological Engineering*, 52: 278-289.
- Yang, Y., Ferrier, J., Csetenyi, L., Gadd, G. M., 2019. Direct and Indirect Bioleaching of Cobalt From Low Grade Laterite and Pyritic Ores by *Aspergillus niger*. *Geomicrobiology Journal*, 36(10):

940-949.

- Yin, S., Wang, L., Kabwe, E., Chen, X., Yan, R., An, K., Zhang, L., Wu, A., 2018. Copper bioleaching in China: Review and prospect. *Minerals*, 8(32): 1-26.
- Zhang, S., Yan, L., Xing, W., Chen, P., Zhang, Y., Wang, W., 2018. *Acidithiobacillus ferrooxidans* and its Potential Application. *Extremophiles: life under extreme conditions*, 22(4): 563–579.
- Zhou, W. B., Li, K., Wang, Y. G., Zhang, L. J., Cheng, H. N., Zhou, H. B., 2019. Influence of Particle Size on Copper Recovery From Sulfide Ore By The Moderately Thermophilic Microorganisms. *Metallurgical Research Technology*, 116(1): 119.



ÖZGEÇMİŞ

Fatıma Masume USLU. 2007 yılında Çukurova Üniversitesi Biyoloji Bölümünde Lisans eğitimine başlayıp 2011 yılında mezun oldu. 2012 -2014 yılları arasında Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Biyoteknoloji A.B.D'nda; “Akridin Oranj’ın *Ulva Lactuca* ve *Lemna Gibba* Kullanılarak Sıvı Çözeltilerden Adsorpsiyon İle Uzaklaştırılması ve Adsorpsiyon Kinetiğinin Belirlenmesi” başlıklı teziyle Yüksek Lisans eğitimini tamamladı. Mikrobiyal biyoteknoloji alanında; enzim üretimi ve saflaştırılması, antimikrobiyal ajanlar, biyosümfektan üretimi, ksantan gum üretimi üzerine çalışmalar yaptı. 2015-2024 yılları arasındanda Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Biyoteknoloji A.B.D’da; Doktora eğitimini tamamladı. Doktora tez projesiyle TÜBİTAK-BİDEB2211-C Yurtiçi Öncelikli Alanlar Doktora Burs Programı” kapsamında teşvik bursu aldı.

