

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MADEN MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

AMALGAMLAMA ATIKLARINDA BULUNAN ALTIN VE CİVANIN
MİNERALojİK KARAKTERİZASYONU

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Muouhamed Vadel ETHMANE

AĞUSTOS 2025

TRABZON



KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MADEN MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

AMALGAMLAMA ATIKLARINDA BULUNAN ALTIN VE CİVANIN
MİNERALOGİK KARAKTERİZASYONU

Mouhamed Vadel ETHMANE

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünce
"YÜKSEK LİSANS (MADEN MÜHENDİSLİĞİ)"
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 28 / 07 / 2025

Tezin Savunma Tarihi : 15 / 08 / 2025

Tez Danışmanı : Prof. Dr. İbrahim ALP

Trabzon 2025

ÖNSÖZ

“Amalgamlama Atıklarında Bulunan Altın ve Cıvanın Mineralojik Karakterizasyonu” isimli bu tez Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Maden Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Programı’nda hazırlanmıştır.

Tez çalışmam boyunca hiçbir desteğini esirgemeyen ve bilim insanı olma yolundaki ilk adımlarımı atarken kıymetli bilgileriyle ve tecrübesiyle yolumu aydınlatan danışman hocam Sayın Prof. Dr. İbrahim ALP’e teşekkürü bir borç bilirim. Ayrıca, yapıcı eleştirileri ve önerileri ile tezime büyük katkıları bulunan saygıdeğer hocalarım Sayın Dr. Öğr. Üyesi Taha BOYRAZ’a ve Sayın Dr. Öğr. Üyesi Elif YILMAZ’a, eğitim öğretim hayatımda katkısı olan tüm hocalarıma ve ortak olarak çalışmalar yürüttüğümüz ve tez çalışması süresinde de hiçbir yardımdan kaçınmayan arkadaşlarım Ahmed SINON’a, Dr. Abdou Azizi YOUPOUNGAM’a, Abdulbagi Hassan Abdallah MOHAMED’e ve Majed AHMED’e teşekkür ederim. Mineralojik incelemelerde yaptıkları katkılar için Dr. Mithat VICIL ve Jeoloji Yüksek Mühendisi Bahrican AR’a teşekkür ederim. Tez çalışması sürecinde bana desteklerini esirgemeyen Maden Mühendisliği Bölümü’ndeki tüm değerli hocalarıma ve asistan arkadaşlarıma teşekkürlerimi sunarım.

Bu çalışmayı 122M489 nolu proje kapsamında destekleyen Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu Araştırma Destek Programları (TÜBİTAK- ARDEB) kurumuna teşekkür ederim.

Son olarak, doğduğum günden beri elimi hiç bırakmayan, hayatım boyunca aldığım tüm kararlarda bilgi ve tecrübelerinden faydalandığım ve her kararımda arkamda olan, maddi ve manevi desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen ve bugünlere gelmemde en büyük paya sahip olan annem Eslemhoum SİD’LMOKHTAR ve babam Maleck ETHMANE’na, kardeşlerim Cheikh Ahmed ETHMANE ve Mouhamed AHMEDBABOU’a teşekkür eder, minnettarlığımı sunarım. Çalışmalarım sırasında her zaman desteğini gördüğüm bir sabır abidesi sevgili eşim Marieme BAYE’ye de şükranlarımı belirtirim.

Bu tez çalışmasının bundan sonraki çalışmalara katkı sağlamasını temenni ederim.

Mouhamed Vadel ETHMANE

Trabzon 2025

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Amalgamlama Atıklarında Bulunan Altın ve Cıvanın Mineralojik Karakterizasyonu” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Prof. Dr. İbrahim ALP’in sorumluluğunda bilgileri metin içinde ve kaynakçada eksiksiz olarak tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri kendim gerçekleştirdiğimi, başka kaynaklardan aldığım gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim.

15/08/2025

Mouhamed Vadel ETHMANE

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET	VII
SUMMARY	VIII
ŞEKİLLER DİZİNİ	IX
TABLolar DİZİNİ.....	XII
SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ	XIII
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Giriş.....	1
1.2. Moritanya Genel Jeolojisi ve Altın Oluşumları	2
1.2.1. Moritanya'daki Altın Yatakları ve Oluşumları	2
1.2.2. Rgueibat Kalkanı.....	6
1.2.3. Kuzey Mauritanidler (Inchiri Bölgesi)	11
1.2.4. Güney Mauritanidleri	12
1.2.5. Taoudeni Havzası	13
1.3. El Sanatları ve Küçük Ölçekli Alın Madenciliğinde (ASGM) Amalgamlama Uygulaması	15
1.3.1. Amalgamlama Atıklarının Ekonomik Önemi ve Çevresel Etkileri.....	15
1.4. Moritanya ASGM Sektörü ve Önemi.....	16
1.4.1. Zouerat-Bir Moughrein Bölgesi Jeolojik Özellikleri.....	18
1.5. Konu ile İlgili Yapılmış Çalışmaların Literatür Özeti	19
1.6. Çalışmanın Amacı ve Literatürde Dolduracağı Boşluk	20
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR	22
2.1. Malzeme	22
2.2. Yöntem	23
2.2.1. Örneklerin Hazırlanması ve Boyut Dağılımının Belirlenmesi	23
2.2.2. Örneklerin Kimyasal Analiz Yöntemleri	26
2.2.3. Katı Örneklerin Kral Suyu ile Çözündürme İşlemleri.....	26
2.2.4. AAS ile Çözültiden Metal Analiz Sistemi.....	27
2.3. Karakterizasyon Testleri.....	29

2.3.1. XRD Karakterizasyon Testleri	29
2.3.2. Yüzdürme Batırma Testleri	30
2.3.3. Stereo Mikroskop İncelemeleri	31
2.3.4. Örnek İnceleme Kesitlerinin Hazırlama Süreci	31
2.3.5. Polarizan Mikroskop İncelemeleri	33
2.3.6. SEM-EDS Analizi ile Mikroskobik ve Elementel İncelemeler	33
2.3.7. MLA Karakterizasyon Testleri	35
2.4. Çözündürme Deneyleri	37
3. BULGULAR VE TARTIŞMA	39
3.1. Kimyasal Bileşimi	39
3.2. Tane Boyut ve Elek-Metal Dağılımı	40
3.2.1. Yüzdürme –Batırma ile Serbestleşme Analiz Sonuçları	45
3.3. Mineralojik Bileşim ve XRD Analiz Bulguları	47
3.4. Mikroskobik Mineralojik İncelemeler	51
3.4.1. Stereo Mikroskop İncelemesi	51
3.4.2. Polarizan Mikroskop İncelemesi	53
3.4.3. SEM Gözlemleri ve EDS Bulguları	55
3.4.4. MLA Analizleri	60
3.5. Çözündürme Karakterizasyon Çalışmaları	66
3.5.1. Tüvenan Atıklarının Siyanür Liçi Test Sonuçları	66
3.5.2. Glisin Liç ve Çözündürme Testleri	71
3.5.3. Liç Atıklarının Karakterizasyonu	73
4. SONUÇLAR	75
5. ÖNERİLER	77
6. KAYNAKLAR	78
ÖZGEÇMİŞ	

ÖZET

AMALGAMLAMA ATIKLARINDA BULUNAN ALTIN VE CIVANIN MİNERALojİK KARAKTERİZASYONU

Mouhamed Vadel ETHMANE

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İstatistik ve Bilgisayar Bilimleri Anabilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. İbrahim ALP
2025, 80 Sayfa

Çalışmada, Moritanya’da yürütülen küçük ölçekli altın madenciliği (ASGM) faaliyetlerinden çıkan amalgam atıklarındaki altın (Au) ve cıva (Hg)’nın karakterizasyonu amaçlanmıştır. Numunelere yoğunluk ve boyut dağılım analizi, kimyasal analiz yöntemleri uygulanarak metal içerikleri belirlenmiş; karakterizasyon testleri uygulanarak mineralojik fazlar incelenmiştir. Ayrıca altının kazanılması ve cıvanın uzaklaştırılmasına yönelik çözündürme testleri gerçekleştirilmiştir. Sahadan alınan örneklerin 14.41 g/t altın ve 179.4 g/t cıva tenörüne sahip oldukları, bunun yanında 1 g/t gümüş ve 364.8 g/t bakır içerdiği belirlenmiştir. Atığın boyut dağılımının 150 ile 74 mikron arasında yığılma gösterdiği ancak altın ve cıvanın tenörlerinin ince boyutlarda daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Örnekte SiO₂ içeriği %89.57 seviyesinde olup çok düşük oranlarda %2.6 Al₂O₃ ve %2.46 Fe₂O₃ bulunmaktadır. Ağır ortam ayırmasında altın kazanım oranları boyut inceldikçe artmasına rağmen %23.49 ile %70.67 arasında değişmiştir. %0.34-1.90 oranında alınan ağır ürün içinde altın tenörü 300 - 2543.8 g/t arasında cıva tenörü ise 2082-8700 g/t olarak alınmıştır. Atıkların temel olarak Kuvars’tan mineralinden oluştuğu ve altının büyük oranda serbest olarak bulunduğu gözlemlenmektedir. 24 saatlik siyanür liçi ile altın %90, gümüş %22 ve cıva %71 çözünmüştür. Öğütme ile daha ince tane boyutlarına indirilen örneğin kazanım verimlerinde artışlar gözlemlenmiştir. Glisin liçi ile ise 12 saatlik süre sonunda %94.8 altın, %92.9 gümüş, %49.2 cıva ve %6.1 bakır çözünürlüğü elde edilmiştir. Cıvadaki düşük çözünme veriminin zinober mineralinin varlığından kaynaklandığı belirlenmiştir. Bulgular, çevre dostu bir alternatif olan glisin ile yüksek altın ve gümüş kazanımının yanında cıvanın da yüksek oranlarda çözeltiye alınabildiğini göstermektedir. Bu durum toksik bir reaktif olan siyanür liçine göre önemli bir avantajdır.

Anahtar Kelimeler: Zouérat, Amalgamlama atıkları, Karakterizasyon, Au, Hg, Kazanım

Master Thesis

SUMMARY

MINERALOGICAL CHARACTERIZATION OF GOLD AND MERCURY FOUND IN AMALGAMATION WASTE

Özge TEZEL

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Mining Engineering Graduate Program
Supervisor: Prof. Dr. İbrahim ALP
2025, 80 Pages

The aim of this study was to characterize gold (Au) and mercury (Hg) in amalgam tailings generated from small-scale gold mining (ASGM) activities in Mauritania. Metal contents were determined by applying density and size distribution analysis and chemical analysis methods to the samples; and mineralogical phases were examined by characterization tests. Dissolution tests were also conducted for gold recovery and mercury removal. Samples taken from the field were determined to have a grade of 14.41 g/t gold and 179.4 g/t mercury, while they also contained 1 g/t silver and 364.8 g/t copper. The size distribution of the tailings was determined to be between 150 and 74 microns, but the grades of gold and mercury were higher in the finer sizes. The SiO₂ content in the sample was 89.57%, with very low percentages of 2.6% Al₂O₃ and 2.46% Fe₂O₃. In heavy media separation, gold recovery rates increased with increasing size, but varied between 23.49% and 70.67%. The heavy product, which was recovered at 0.34-1.90%, contained gold grades ranging from 300 to 2543.8 g/t, and mercury grades ranging from 2082 to 8700 g/t. It was observed that the tailings were primarily composed of quartz mineral, with the gold largely present in free form. With 24-hour cyanide leaching, 90% of the gold, 22% of the silver, and 71% of the mercury were dissolved. Increases in recovery yield were observed in samples reduced to finer particle sizes by grinding. With glycine leaching, 94.8% gold, 92.9% silver, 49.2% mercury, and 6.1% copper solubilities were obtained after 12 hours. It was determined that the low dissolution efficiency of mercury was due to the presence of cinnabar. The findings indicate that glycine, an friendly alternative, not only provides high gold and silver recovery but also allows for high levels of mercury removal. This is a significant advantage over cyanide leaching, a toxic reagent.

Key Words: Zouérat, Amalgamation tailings, Characterization, Au, Hg, Recovery.

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 1. Moritanya'daki başlıca altın madenciliği sahaları (Heidi, 2022).....	3
Şekil 2. Güney Tasiast-Tijirit aeromanyetik görüntüsü, Mesoarchean yeşil kaya.....	5
Şekil 3. Rgueibat Kalkanı'nı Tasiast-Tijirit bölgesindeki ana litotektonik birimleri (Davis, 2011).	10
Şekil 4. Akjoujt bölgesinin genel jeolojisi (Davis, 2011).	11
Şekil 5. Güney Mauritanides'teki Cu-Au oluşumlarının genel jeolojisi ve konumu (Davis, 2011).	13
Şekil 6. Taoudeni Havzası'nı jeolojik bölgeleri ile önemli jeolojik birimleri gösteren harita	14
Şekil 7. Moritanya'nın altın madenciliği işleme yerleri ve izin verilen altın koridorları.....	16
Şekil 8. ASGM Üretim yeri.....	17
Şekil 9. Chami'deki valsli değirmenlerle cevherin yaş öğütülmesi ve işleme uygulamaları.....	17
Şekil 10. Moritanya Zouérate-Bir Mogrein bölgesi jeoloji haritası.....	18
Şekil 11. Örneklerin alındığı Moritanya Zouérate-Bir Mogrein bölgesi yer bulduru haritası	22
Şekil 12. Sahadan alınan örnekler.....	23
Şekil 13. Döner örnek bölücü ve riffle sistemi	23
Şekil 14. Örnek bölme işleminden sonra paketlenen atık numuneleri.....	24
Şekil 15. Laboratuvar ortamında gerçekleştirilen yaş elek analizi süreci ve farklı boyut fraksiyonlarına ait numune görselleri	24
Şekil 16. kuru seramik bilyalı değirmen Öğürme değirmeni	25
Şekil 17. Lazerli Tane boyut analiz cihazı (Malvern Mater Sizer)	25
Şekil 18. Halkalı öğütücü sistemi	26
Şekil 19. Kral suyu ile çözündürülmüş katı numunelerin analiz öncesi çözelti hâli.....	27
Şekil 20. AAS Analiz sistemi	28
Şekil 21. FIAS sistemi	29
Şekil 22. XRD analiz cihazı.....	30
Şekil 23. Yüzdürme –Batırma test ünitesi	30
Şekil 24. Stereo Mikroskop inceleme sistemi.....	31
Şekil 25. Epoksi reçine (Metkon Epocold-R) ile kalıplanmış numunenin hazırlanması ..	32

Şekil 26. Metkon Forcipol 1V cihazında numunenin P300–P1200 arası zımparalanması	32
Şekil 27. Polarizan mikroskop inceleme ve görüntüleme sistemleri.....	33
Şekil 28. SEM-EDAX inceleme sitemi.....	34
Şekil 29. TS (Thermo Scientific) Apreo 2C FEG-SEM	35
Şekil 30. MLA Analiz cihazı	36
Şekil 31. Çözündürme test ünitesi	37
Şekil 32. Moritanya örneğinin öğütülebilirlik sonuçları	41
Şekil 33. Örneğinin orijinal ve farklı öğütme süreleri sonundaki tane boyut dağılımları.....	42
Şekil 34. Moritanya Örneğinin Boyut Dağılım Karakteristiği	43
Şekil 35. Örneğin Toplam Elek Altı ve Elek Üstü Dağılım Karakteristiği	43
Şekil 36. Moritanya cevheri XRD paterni ve mineral içeriklerinin Rietveld analiz sonucu (R expected: 1,696; R profile: 7,979; GoF: 6,595).....	48
Şekil 37. Moritanya cevheri ağır mineral konsantresinin XRD paterni ve mineral içeriklerinin Rietveld analiz sonucu (R expected: 1,258; R profile: 2,049; GoF: 2,089).....	49
Şekil 38. Moritanya cevheri hafif ürün XRD paterni ve mineral içeriklerinin Rietveld analiz sonucu (R expected: 1,821; R profile: 10,693; GoF: 7,781).....	50
Şekil 39 Farklı tane boyutlarına ait numunelerin çeşitli büyütmelemlerde alınmış görüntüleri	51
Şekil 40. Moritanya örneği ağır ortamda ayrılan ürünlerin görünümü (Hafif kuvars ve ağır piritler)	52
Şekil 41. Farklı tane boyutlarına ait numunelerin polarizan ışığı altındaki genel görünümü	53
Şekil 42. Farklı tane boyutlarına ait numunelerin polarizan ışığı altındaki genel görünümü	53
Şekil 43. Farklı tane boyutlarına ait numunelerin polarizan ışığı altındaki genel görünümü	54
Şekil 44. Farklı tane boyutlarına ait numunelerin polarizan ışığı altındaki genel görünümü	54
Şekil 45. Moritanya örneği ağır ürün konsantresinin SEM inceleme sonuçları.....	56
Şekil 46. Ağır ürün içerisindeki Au ve pirit tanesinin görünümü ve EDS analizi	57
Şekil 47. -75+38 µm ağır ürün içerisindeki Au ve pirit tanesinin görünümü ve EDS analizi.....	58
Şekil 48. -75+38 µm ağır ürün içerisindeki Au tanesinin EDS analizi	59
Şekil 49. Moritanya ağır mineral konsantresinin mineralojik kompozisyonu	60
Şekil 50. Moritanya ağır mineral konsantresinin mineralojik kompozisyonu.	61

Şekil 51. Pirit ile kenetli silvanit mineraline ait (A) SEM-BSE ve (B) MLA görüntüsü.	62
Şekil 52. Fe-oksit ile kenetli elektruma ait (A) SEM-BSE ve (B) MLA görüntüsü.	62
Şekil 53. Pirit ile kenetli elektrum mineraline ait (A) SEM-BSE ve (B) MLA görüntüsü.	62
Şekil 54. Pirit ile kenetli elektrum mineraline ait (A) SEM-BSE ve (B) MLA görüntüsü.	63
Şekil 55. Pirit ile kenetli elektrum mineraline ait (A) SEM-BSE ve (B) MLA görüntüsü.	63
Şekil 56. Pirit ile kenetli elektrum mineraline ait (A) SEM-BSE ve (B) MLA görüntüsü.	63
Şekil 57. Serbest elektrum tanesine ait (A) SEM-BSE ve (B) MLA görüntüsü.	64
Şekil 58. Amalgam içinde Elektrum tanesine ait (A) SEM-BSE ve (B) MLA görüntüsü.	64
Şekil 59. Au-Amalgam tanesine ait (A) SEM-BSE ve (B) MLA görüntüsü.	64
Şekil 60. Silvanit tanelerinden alınan EDS Spektrumları.	65
Şekil 61. Elektrum tanelerinden alınan EDS Spektrumları.	65
Şekil 62. Amalgam tanelerinden alınan EDS Spektrumları.	65
Şekil 63. Akantit tanelerinden alınan EDS Spektrumları.	66
Şekil 64 Farklı tane boyutlarında elde edilen altın (Au) verim değişimleri.	67
Şekil 65 Ag (Gümüş) elementine ait verim oranlarının fraksiyonlara göre dağılımı.	67
Şekil 66 Tane boyutuna göre Cu (Bakır) verim oranlarının değişimi.	68
Şekil 67 Tane boyutlarına göre Hg çözünme verimlerinin değişimi.	68
Şekil 68. Öğütülmüş örneğin (d80: 38 mikron) CN liçi Au çözünme kinetiği.	69
Şekil 69. Öğütülmüş örneğin (d80: 38 mikron) CN liçi Hg çözünme kinetiği.	70
Şekil 70. Öğütülmüş örneğin (d80: 38 mikron) CN liçi Cu çözünme kinetiği.	70
Şekil 71. Öğütülmüş örneğin (d80: 38 mikron) CN liçi Ag çözünme kinetiği.	71
Şekil 72. Glisin ortamında (Au, Ag, Cu ve Hg) liç veriminin zamana bağlı değişimi.	72
Şekil 73. Fe-Oksit (A) ve Pirit (B) ile kenetli elektrum mineraline ait SEM-BSE görüntüsü.	73
Şekil 74. Pirit içerisindeki 350 nm Au tanesinin görünümü EDS analiz.	74

TABLÖLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1. Moritanya'nın kuzeybatısındaki altın madenciliği sahaları (Heidi, 2022).....	3
Tablo 2. Moritanya'daki Altın (Au) Oluşumlarının Kimlik Numarası, Adı ve Konumu.....	8
Tablo 3. MLA analizi numune miktarları ve ölçümlerinin yapılan tane sayıları.....	35
Tablo 4. Tez çalışmalarında kullanılan Laboratuvar ekipmanları ve cihazlar	38
Tablo 5. Bir Mogrein bölgesinden alınan örneğin kimyasal analiz sonuçları.....	39
Tablo 6. Örnekte belirlenen değerli metal içerikleri (g/t)	40
Tablo 7. -74+38 mikron için Ağır ortam ayırma ürünlerinin analizleri ve oranları.....	40
Tablo 8. Örneğin boyut dağılımı sonrası elek-metal dağılım sonuçları	44
Tablo 9. Örneğin boyut dağılımı sonrası kümülatif elek-metal dağılım sonuçları.	44
Tablo 10. -324+150 mikron için Ağır ortam ayırma ürünlerinin analizleri ve Oranları	46
Tablo 11. -150+106 mikron için Ağır ortam ayırma ürünlerinin analizleri ve Oranları	46
Tablo 12. -106+74 mikron için Ağır ortam ayırma ürünlerinin analizleri ve Oranları	46
Tablo 13. -74+38 mikron için Ağır ortam ayırma ürünlerinin analizleri ve Oranları.....	47
Tablo 14. -38+25 mikron için Ağır ortam ayırma ürünlerinin analizleri ve Oranları.....	47

SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ

AAS	: Atomic Absorption Spectroscopy (Atomik Absorpsiyon Spektroskopisi)
ASGM	: Artisanal and Small-scale Gold Mining
ASTM	: Amerikan Test ve Malzeme Derneği (American Society for Testing and Materials)
BIF	: Bantlı Demir Formasyonu (Banded Iron Formation)
EDAX (EDS)	: Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (Enerji Dağılımlı X-Işını)
FIAS	: Flow Injection Analysis System with Cold Vapor AAS (Soğuk Buhar AAS ile Akış Enjeksiyon Sistemi)
GA	: Gigaannum (jeolojik zaman birimi, milyar yıl)
G/T	: Gram per ton (Ton başına gram)
ICP-AES	: Inductively Coupled Plasma – Atomic Emission Spectroscopy (Eşleşik Plazma – Atomik Emisyon Spektroskopisi)
IOCG	: Demir Oksit Bakır-Altın yatağı (Iron oxide copper-gold deposit)
Moz	: Million ounces
NNE	: North-NorthEast(Kuzey-Kuzeydoğu)
OMRG	: Moritanya Jeolojik Araştırmalar Ofisi (Office Mauritanien de Recherches Géologiques)
PPM	: Parts Per Million (Milyonda Bir Birim)
SEM	: Scanning Electron Microscope (Taramalı Elektron Mikroskobu Spektroskopisi)
TMM	: Toplam Metal Miktarı
XRF	: X-ray Fluorescence (X-Işını Floresans Spektrometrisi)
XRD	: X-ray Diffraction (X-Işını Kırınımı)
µm (mikron)	: Mikrometre (10^{-6} metre)

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Moritanya, zengin mineral kaynakları ve stratejik öneme sahip maden yataklarıyla Batı Afrika'da dikkat çeken bir ülkedir. Özellikle Rgueibat Kalkanı, altın ve diğer değerli metallerin potansiyel kaynaklarıyla jeologlar ve madencilik şirketlerinin ilgisini çekmektedir. Bununla birlikte, bu kaynakların çıkarılmasında kullanılan teknikler, çevresel ve ekonomik etkileriyle önemli bir değerlendirme gerektirmektedir.

Amalgamasyon, tarih boyunca altın çıkarımında yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Ancak bu yöntem, yüksek cıva kullanımı nedeniyle çevre ve insan sağlığı üzerinde ciddi tehditler oluşturabilmektedir. Özellikle, bu süreçten kaynaklanan atıkların mineralojik yapısı, içerdiği altın ve cıva konsantrasyonları açısından hem ekonomik hem de çevresel sürdürülebilirlik açısından kritik öneme sahiptir.

Moritanya'da altın kazanımında ASGM ve amalgamlama faaliyetleri 2016 yılından itibaren hızla yaygınlaşmıştır. 2020'de yapılan en son araştırma, bu alanda çalışan sayısının yirmi dokuz bin kişiye yaklaştığını tahmin etmektedir.

Bu çalışmanın temel amacı, Moritanya'dan alınan amalgamasyon atıklarının mineralojik karakterizasyonunu yaparak, atıklarda bulunan altın ve cıvanın dağılımını, mineral türlerini ve metalojenezi hakkında bilgi sağlamaktır. Ayrıca, bu veriler ışığında, çevreye etkilerini azaltacak ve atıklarda kalan değerli metallerin geri kazanımını artıracak yenilikçi yaklaşımların geliştirilmesi hedeflenmektedir.

Bu bağlamda, çalışma şu sorulara yanıt aramaktadır:

1. Amalgamasyon atıklarında bulunan altın ve cıva mineralleri hangi formda bulunmaktadır?
2. Atıkların mineralojik ve kimyasal özellikleri, bu metallerin çevresel risklerini nasıl etkiler?
3. Atıklardan değerli metallerin geri kazanımı için hangi yöntemler uygulanabilir?

Bu tez, Moritanya'nın maden kaynaklarının daha iyi anlaşılmasına katkı sağlamanın yanı sıra, madencilik faaliyetlerinin sürdürülebilirlik ilkelerine uygun olarak yürütülmesine yönelik bilimsel bir temel oluşturmayı amaçlamaktadır.

1.2. Moritanya Genel Jeolojisi ve Altın Oluşumları

Moritanya, 1.030.700 km² büyüklüğünde geniş bir bölgedir; 15° ve 27° Kuzey paralelleri ile 5° ve 17° Batı meridyenleri arasında yer alır. Kuzeyde Cezayir, güneyde Senegal ve Mali, doğuda Mali, batıda ise Batı Sahra ve Atlas Okyanusu ile sınırlıdır. Moritanya, Sahra Altı Afrika ile Avrupa'yı bağlayan bir kapı niteliğindedir.

Jeolojik olarak, beş ana jeolojik birime ayrılmıştır:

Regueibat Sırtı: Arkeen'den Alt Proterozoik'e kadar uzanan bir yaşa sahiptir. Büyük ölçüde metamorfik gnayslardan oluşur ve yerel olarak bazik damarlar ve granitik intrüzyonlarla kesilir. Bu jeolojik bölge, ülkenin kuzey merkez kısmını kaplar ve Batı Afrika Kratonu'nun kuzeybatı kenarını oluşturur.

Taoudéni Havzası: Üst Proterozoik ve Paleozoyik dönemlere ait tortul kayaçlardan oluşur. Başlıca kumtaşı, kireçtaşı ve dolomit içerir. Bu tortul kayaç oluşumları, Moritanya'nın orta ve doğu kısmını kaplar.

Moritanya Dağ Zinciri: Kuzeybatı-güneydoğu yönünde uzanır. Ülkenin güney merkez kısmında yer alır ve Üst Proterozoik ile Paleozoyik dönemlerdeki Pan-Afrikan orojenez süreçleri sırasında oluşmuştur.

Kıyı Havzası: Mezozoyik ve Senozoik dönemlere ait tortul kayaçlardan oluşur. Bu daha yeni tortul birikimler, ülkenin batı kısmını kaplar.

Tindouf Havzası: Ülkenin kuzey ve kuzeybatı uçlarında bulunan bir tortul havzadır.

1.2.1. Moritanya'daki Altın Yatakları ve Oluşumları

Moritanya'nın altın kaynakları, iki önemli cevher yatağı ile ayrıntılı çalışılmamış bazı potansiyel oluşumlardan oluşmaktadır (Şekil 1) (Tablo 1).

2007 yılında üretime başlayan Tasiast yatağı, Regueibat Kalkanı'nın güneybatı köşesinde yer almakta olup, dünya çapında bir Paleoproterozoyik orojenik altın yatağıdır. Üretim yapılan Guelb Moghrein yatağı, Orta Arkean kayaçlarının bir kayma bölgesinde yer alır ve çoğunlukla IOCG (Demir Oksit Bakır-Altın yatağı) tipi bir yatak olarak sınıflandırılmaktadır. Her iki ana yatak, benzer mineralizasyon tarzlarına sahip sayısız prospektifle çevrilidir. Regueibat Kalkanı'nın Mesoarchean ve Paleoproterozoyik kayaçlarının çoğu, altın kaynakları için uygun olmayan yüksek dereceli gnayslardır (Key vd., 2008; Schofield vd., 2012).



Şekil 1. Moritanya'daki başlıca altın madenciliği sahaları (Heidi, 2022).

Tablo 1. Moritanya'nın kuzeybatısındaki altın madenciliği sahaları (Heidi, 2022).

Bölge	Yerleşim	Nüfus	Saha Adı	Kuruluş Yılı	Madenci Sayısı
Nouadhibou	Benichab	4.500	Konteyner 1	2018	2.500
Inchiri	Taziazet	12.000	Konteyner 2	2019	1.000
Tiris Zemmour	Bir Moghreïn	1.599	Gleib N'Dour	2019	10.000
			Chegatt	2018	2.500
			M'kelbouha	2019	3.000
			Tenawmer	2019	2.000

Ancak, kalkandaki metamorfik derecenin doğuya doğru azaldığı ve Paleoproterozoyik kayaçlarda orojenik altın yatakları için potansiyel tanımlayan daha uygun yeşilist fasiyesi alanları oluşturduğu görülmektedir. Birkaç küçük altın prospektifi Drake Resources Limited tarafından araştırılmaktadır (Brown, 2013). 21°K enleminin kuzeyinde tanımlanmıştır, bu bölge kalkanın çoğu 2.1 Ga'lık Birimiyan kayaçlarının bulunduğu bir bölgedir. Drake Resources Limited, Hendrix kayma bölgesi olarak adlandırılan 140 km uzunluğundaki altın anomalisi kayma bölgesine bitişik olan Conchita-Florence'te yüksek dereceli altın örnekleri rapor etmektedir. Bu bölge, kalkanın doğusunda tanımlanan tek volkaniklastik kayaçlar kuşağını temsil etmektedir (Taylor vd., 2016). Yüksek altın örnekleri, Ag, Mo, Sb, Te ve W'nin anormal yoğunluklarıyla birlikte, yeşil

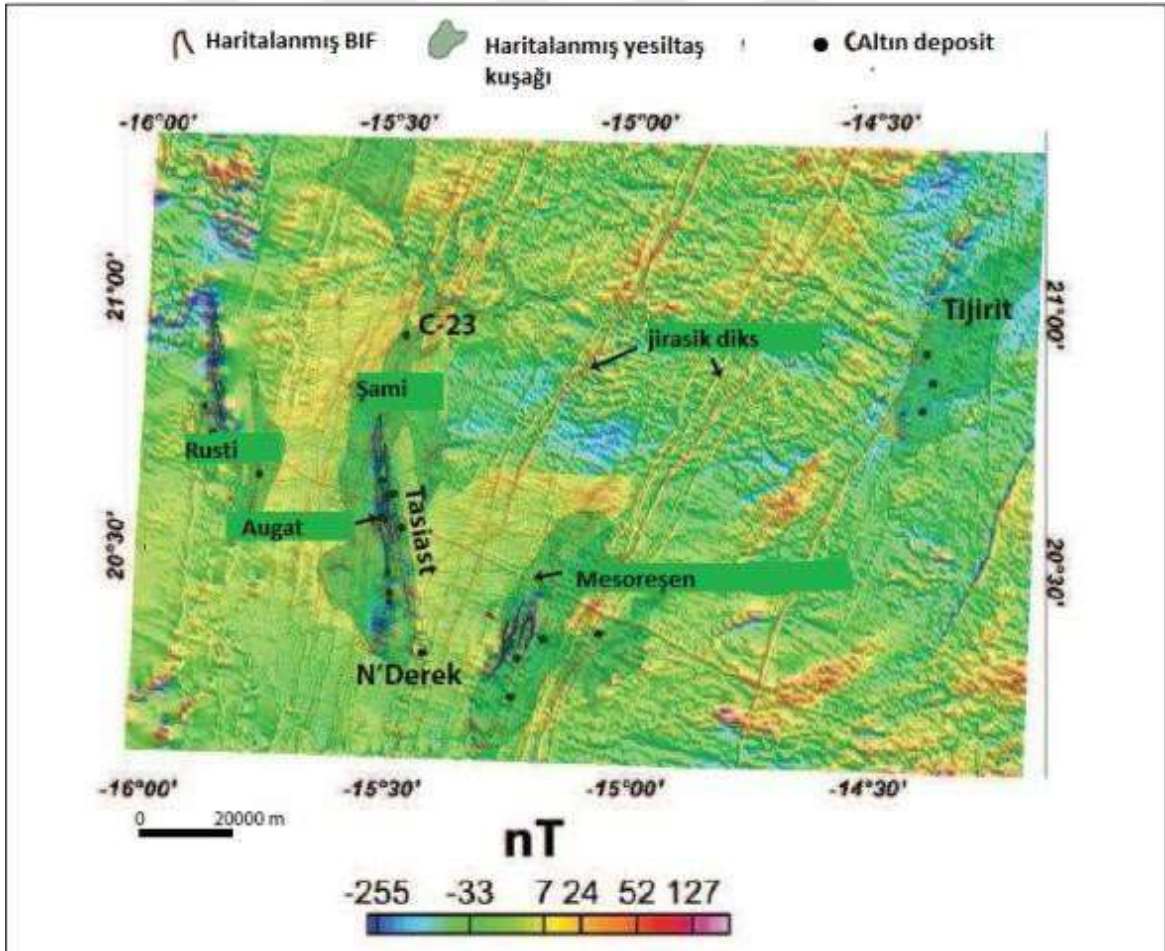
şist fasiyesinde metamorfize olmuş metapeliteinlerdeki kuvars damarlarıyla ilişkilidir. Bu trend boyunca güneydoğudaki birkaç 40Ar/39Ar yaşı, bu prospektiflerin Paleoproterozoyik yaşında olduğunu önermektedir (Taylor vd., 2016).

Bölgenin daha fazla değerlendirilmesi, detaylı jeokimyasal haritalar, bölgesel metamorfik haritalar ve mevcut bölgesel yapının değerlendirilmesini gerektirecektir. Eğer Rgueibat Kalkanı'nda önemli altın kaynakları için uygun alanlar varsa, bu alanlar büyük olasılıkla, çoğunlukla yeşil şist fasiyesinin daha düşük metamorfik derecesine sahip olanlar olarak geniş bir şekilde tanımlanacaktır. Bu alanlar, Conchita-Florence oluşumlarını barındıran, Zednes fay kuşağının doğusunda yer alan, Alt ve Üst Birimiyan süprakrustal kayalar içerebilir. Ayrıca, kalkanın doğu yarısını kesen nispeten kuzeydoğu-batı doğrultusundaki ana faylar, altın cevherleri için özellikle uygun olabilecek yerlerdir; bu faylar üzerindeki herhangi bir düşük dereceli kayaç marjları dikkatlice incelenmelidir (Goldfarb vd., 2015). Rgueibat Kalkanı'nın en güneybatı köşesi (20°–21° enlem ve 14°–16° boylam) kalkanın Mesoarchean kısmındaki yeşil şist fasiyesi yeşil kaya kuşaklarının bulunduğu tek alandır; tanımlanan yedi kuşak, batıda N-S (örneğin, Chami) ve doğuda NE-SW doğrultusunda (örneğin, Tirijit) yer almaktadır.

Yeşil kaya kuşakları (Schofield vd., 2012) tarafından Tasiast-Tijirit güney kısmında yer alan ca. 3.1–3.0 Ga migmatitik gneyslardan oluşan bir temele yerleşmiştir ve ca. 2.97 Ga'da metamorfize olmuştur; yeşil kaya kuşakları, gneyslara benzer yaşa sahip olmalıdır. Daha genç, volkanik tonalit ve granodiyoritler, kubbe benzeri özelliklerin çekirdeklerini oluşturur, bu kayalar 2.95–2.87 ve 2.69–2.65 Ga tarihlerine sahiptir. Tasiast altın yatağı (Şekil 2), Chami yeşil kaya kuşağında, 70 × 15 km'lik bir alanda N-S doğrultusunda uzanan bir kayma sisteminde yer almaktadır. 2008 yılından bu yana Red Back Mining tarafından işletilen bu maden, şu anda Kinross Gold Corp. tarafından işletilmektedir. Kinross Gold Corp. en az 21 Moz (Million ounces) Au rezerv ve kaynağa sahip olduğunu bildirmektedir ve yıllık üretimi 200.000 oz Au'dan fazladır. Tasiast yatağı, üst yeşil şist ile alt amfibolit fasiyesinde, magnetit-kuvarsit BIF (Bantlı Demir Formasyonu) ve yanındaki volkaniklastik kayalarda barındırılan, şerit şeklinde kuvars-karbonat-albit-pirrotit damarları, altın içeren kuvars-karbonat damarları ve bitişik yayılmış altın olarak bulunur. Cevher gövdeleri, 6 km boyunca devam eden paralel iki kuşağı içinde bulunur (Davis, 2011). Kırılgan cevher gövdeleri, Tasiast ve Piment fay kuşaklarını içeren bir dizi yeniden

etkinleşmiş kırık boyunca uzanır. Yataktan anomal altın, As, Ag ve Sb içerikleri rapor edilmiştir. Altere olmuş kayaç, biyotit, serisit ve klorit içerir.

1.85 ve 1.50 Ga(jeolojik zaman birimi, milyar yıl) tarihlerinde hidrotermal serisit üzerinde yapılan K-Ar yaşları (Marutani vd., 2005), tipik olarak Mesoarchean kayaçlarının Mesoarchean altın yatakları, Paleoproterozoyik kayaçlarının ise Paleoproterozoyik yatakları barındırdığı göz önüne alındığında, olağandışı bir durumdur. önemli NW-doğru aeromanyetik hat, Chami yeşil kaya kuşağında Tasiast mineralize alanında kesişmekte olup, bu durum keşifciler için önemli sonuçlar doğurabilir (Şekil 2) (Taylor vd., 2012). Tasiast yatağına onlarca kilometre mesafedeki diğer potansiyel alanlar, Tasiast'ın kuzeydoğusunda, BIF ve mafik volkanik kayaçlarda altın içeren kuvars damarlarının belirlendiği Rusty prospektini içerebilir.



Şekil 2. Güney Tasiast-Tijirit aeromanyetik görüntüsü, Mesoarchean yeşil kaya kuşaklarının örtü altındaki jeofizik uzantılarını ve orojenik altın yataklarının ve prospektiflerinin yerlerini göstermektedir (Taylor, 2015).

C-23 prospekti, Tasiast'ın kuzeyinde ve Chami yeşil kaya kuşağında, bir granodiyorit kütlelerinin kaymaya uğramış kenarında altın içeren kuvars damarlarının bulunduğu bir alandır. Tasiast'ın güneyinde, çoğunlukla kumla kaplı alanlarda, Drake Resources Limited, Chami yeşil kaya kuşağının güney kısmından sondaj örneklerinde altın anomalileri rapor etmektedir. Aeromanyetik anomali, aynı zamanda Chami yeşil kaya kuşağının doğusunda ve batısındaki bitişik yeşil kaya kuşaklarını da kesmektedir ve bu yerlerde ek küçük orojenik altın prospektifleri bulunmaktadır. Yeşil kaya kuşaklarının ve lineamentin kesişimleri, belki de eski bir kraton sınırı veya sınırın hemen içindeki bir fay paralelindeki bu kesişimler, yeni kaynaklar için son derece uygun hedefler olarak kabul edilmektedir (Şekil 2). Kalkanın bu güneybatı kısmında daha ayrıntılı çalışmalar, diğer büyük tonajlı altın kaynaklarını tanımlayacaktır, çünkü tipik olarak orojenik altın yatakları yalnızca izole tek bir yatak olarak değil, bir dizi yatak olarak bulunur. Benzer orojenik altın yatakları, Tasiast yatağından yaklaşık 120 km doğuda, Tijirit yeşil kaya kuşağında bulunabilir. Bu alandaki potansiyelin kanıtı, bazalt, gabro ve şist içindeki 200 m boyunca devam eden altın içeren kuvars damarlarının yer aldığı NNE doğrultusunda uzanan bir kayma bölgesidir (Taylor vd., 2012).

1.2.2. Rgueibat Kalkanı

Kuzey Moritanya, Batı Afrika Kratonu'nun en kuzey kısmını oluşturan ve altın açısından zengin olan Rgueibat Kalkanı'nın Mesoarkean ve Paleoproterozoyik temel kayaçlarıyla karakterizedir (Schofield vd., 2006). Dünyada, Mesoarkean temel kayaçları genellikle damar tipi altın yatakları için uygun kayaçlar değildir. Bunun sebebi, genellikle yüksek derecede metamorfizma geçirmiş gnayslardan ve ilişkili litolojilerden oluşmalarıdır. Bununla birlikte, Güney Afrika'daki Barberton gibi önemli istisnalar da vardır. Rgueibat Kalkanı'nın Mesoarkean kısmının büyük bir bölümü, yüksek derecede metamorfizmaya sahip gnayslar olarak haritalanmış görünmektedir. Buna karşılık, Batı Afrika Kratonu'nun Paleoproterozoyik kayaçları, Taoudéni Havzası'nın güneyindeki Éburnéen veya Léo Kalkanı gibi bölgelerde, altın açısından çok uygun olan yeşil şist fasiyesleri ile geniş alanlar tanımlar. Ancak, Rgueibat Kalkanı'nın Paleoproterozoyik doğu yarısı, Arkeen kayaçlarla temas bölgesine yakın olmasına ve onlara benzemesine rağmen, batıda genellikle yüksek derecede metamorfizmaya sahip metamorfik kayaçlarla çevrilidir.

Bu kayaçlar, ayrıca, altın için uygun olmayan, kabuğun derin seviyelerinden gelen katmanları temsil etmektedir. Başka bir deyişle, Moritanya topraklarında bulunan Batı Afrika Kratonu'nun büyük kısmı, pre-kratonizasyon sırasında maruz kaldığı süreçler nedeniyle başlangıçta barındırabileceği tüm altını kaybetmiş olabilir. Bununla birlikte, Moritanya'daki Paleoproterozoyik kayaçların metamorfizma derecesi, Rgueibat Kalkanı'nın doğusunda yeşil şist fasiyesine doğru azalmaktadır, ki bu da daha uygun bir ortamdır. Bu nedenle, bu alan, Moritanya'daki Éburnéen kayaçları içinde orojenik altın yatakları için açıkça uygun bir bölgeyi tanımlamaktadır.

Drake Resources Limited tarafından şu anda keşfedilmekte olan birkaç küçük altın potansiyeli (Tablo 2), Moritanya'nın 21° enleminin kuzeyinde, Kalkan'ın yaklaşık 2,1 milyar yıl yaşındaki Eburnean kayaçlarının çoğunu içeren bir bölgede tanımlanmıştır. Bu oluşumlar hakkında çok az bilgi mevcut olsa da, Drake, Hendrix fay zone olarak adlandırılan 140 km uzunluğundaki anormal altın içeren fay zone sistemine bitişik Conchita'da yüksek tenörlü altın içeren yüzey örnekleri rapor etmektedir. Bu zone aynı zamanda, Kalkan'ın doğu kesiminde şimdiye kadar tanımlanan tek belirgin volkanoklastik kayaç kuşağını temsil etmektedir. Anomaliler, bazı baz metal sülfid mineralleri ile birlikte altın içeren kuvars damarlarının yüzeyde görüldüğü alanlarla ilişkilidir; bazı mineralizasyonlar duvar kayaçlarında dağınık halde veya gosan zonlarında bulunabilir. Ana kayaçlar, büyük olasılıkla yeşilşist fasiyesi metapelitler olup, Moritanya Jeolojik Araştırmalar Ofisi (OMRG) terminolojisine göre gnays veya “migmatit” olarak tanımlanmıştır. Bu eğilim boyunca güneydoğuda bulunan yataklardan hidrotermal serisit üzerinde yapılan birkaç $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ yaş belirleme çalışması, Paleoproterozoik döneme ait orojenik altın yataklarını işaret etmektedir (Taylor, 2015).

Rgueibat Kalkanı'nın güneybatı köşesi, yaklaşık 20–21° enlem ve 14–16° boylamda, kalkanın Mezoarkean bölümünde yeşilşist fasiyesi yeşiltaş kuşakları içeren tek bölgedir. Belirlenen yedi kuşak (Şekil 3) (Taylor, 2015) batıda (örneğin, Chami) kuzey-güney yönünde, doğuda ise (örneğin, Tijirit) kuzeydoğu-güneybatı yönünde uzanma eğilimindedir. Bu yeşiltaş kuşakları, Schofield ve diğerleri (2012) tarafından tanımlanan Tasiast-Tijirit bölgesinin güney kısmında yüzeylenmiştir. Yaklaşık 3.1–3.0 milyar yıl yaşında olan migmatitik gnayslardan oluşan bir zemin ile çevrilidirler; bu gnayslar yaklaşık 2.97 milyar yıl önce metamorfizmaya uğramıştır ve yeşiltaş kuşaklarının da benzer bir yaşa sahip olması muhtemeldir (Tablo 2).

Tablo 2. Moritanya'daki Altın (Au) Oluşumlarının Kimlik Numarası, Adı ve Konumu.

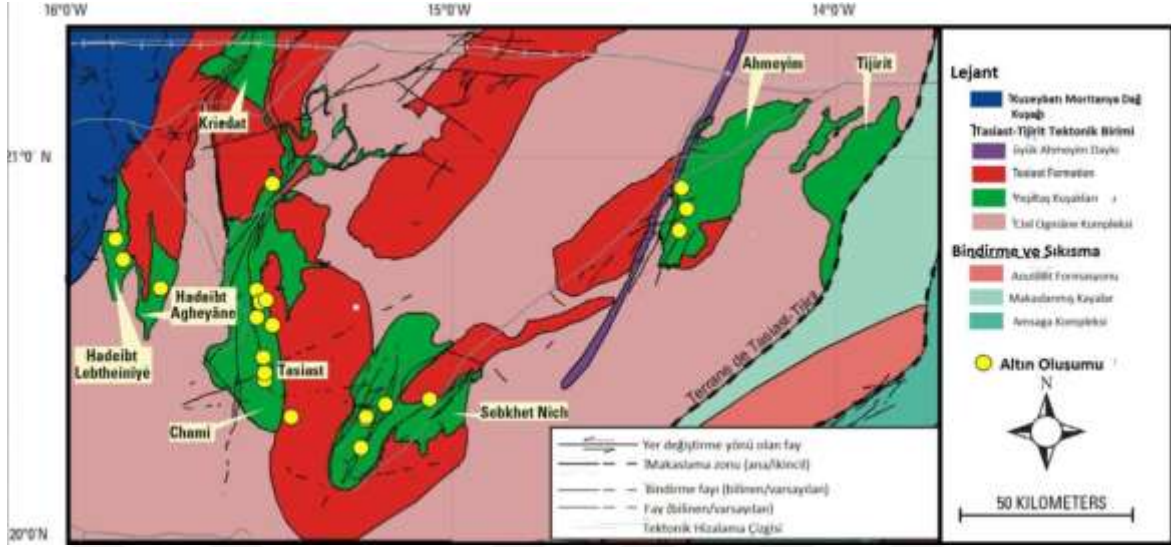
Sıra No	Kimlik / Kod	Yatak Adı
1	ID-001	Bia-652
2	ID-002	Jemelein
3	ID-003	Eucalyptus
4	ID-004	Acacia
5	ID-005	Jarrah
6	ID-006	N'Derek
7	ID-007	South Ahmeyim
8	ID-008	El Joul (Ouest)
9	ID-009	El Joul Est
10	ID-010	Camel Tick
11	ID-011	Redwood
12	ID-012	Guellb El Hadej
13	ID-013	Indice 78
14	ID-014	Oua Oua 3
15	ID-015	Fra Agharghar Nord
16	ID-016	Fra Agharghar Sud
17	ID-017	Boularath 3
18	ID-018	Oua-Oua 1
19	ID-019	Nema HC-6019
20	ID-020	Nema HC-5075
21	ID-021	Nema H-1028
22	ID-022	Conchita Florence
23	ID-023	Bou Zraibe 1
24	ID-024	Bou Zraibe 2
25	ID-025	Naaj
26	ID-026	Conchita Florence
27	ID-027	Aoueuat
28	ID-028	C5-1
29	ID-029	C6-7 Fennec
30	ID-030	C6-8 W
31	ID-031	C6-8 E
32	ID-032	C6-12
33	ID-033	C6-9S
34	ID-034	C6-15
35	ID-035	C6-14
36	ID-036	Lebzenia West
37	ID-037	Rusty
38	ID-038	C23
39	ID-039	Tijraj
40	ID-040	North Ahmeyim
41	ID-041	Fosse Sud, mine Tasiast
42	ID-042	Tasiast South Project

Daha genç ve hacimce büyük tonalitler ve granodiyoritler, günümüzde kubbe benzeri yapılar oluşturarak bu temel kayaçları ve yeşiltaş kuşaklarını çevrelemektedir (Maurin, Bronner, Le Goff, & Chardon, 1997). Bu kayaçların yaşları yaklaşık 2.95–2.87 milyar yıl ve 2.69–2.65 milyar yıl olarak belirlenmiştir (Schofield vd., 2012). (Taylor, 2015) tarafından elde edilen jeofiziksel veriler, bu kuşakların örtü altındaki uzanımlarını tanımlamaktadır; yüzeyin 500 metre altına kadar gömülü olan uzantılar da mineral kaynakları açısından elverişli alanlar olarak değerlendirilmektedir.

Tasiast altın yatakları, 70 x 15 km boyutlarındaki Chami Yeşiltaş Kuşağı içinde kuzey-güney doğrultusunda uzanan bir makaslama sistemi boyunca yer almaktadır. Tasiast, 2008 yılından beri işletilmektedir; önce Red Back Mining tarafından, şu anda ise Kinross Gold Corp. tarafından işletilmektedir. Kinross, 1.47 g/t tenörlü en az 21 milyon ons (Moz) altın içeren dünya çapında bir rezerv ve kaynak rapor etmektedir. Madenler yılda 200.000 onstan biraz fazla altın üretmektedir. Mevcut en detaylı bilgiler, (Henderson, 2010; Sedore & Masterman, 2012) tarafından hazırlanan şirket raporlarında bulunmaktadır.

Tasiast yatakları, üst yeşilist ile alt amfibolit fasiyesi arasında bulunan manyetit-kuarsit bantlı demir formasyonu (BIF) ve bitişik volkanik-klastik kayaçlar içinde, levha şeklinde gelişmiş kuvars-karbonat-albit-pirrotit-pirit damarları, altın içeren kuvars-karbonat damarcıkları ve bitişik dağılmış altın mineralleşmesi olarak görülmektedir. Cevher yatakları, doğrultu boyunca 10 km'den fazla uzanan iki paralel zon içinde bulunmaktadır (Davis, 2011; Sedore & Masterman, 2012).

Sert yapılı cevher zonları, yeniden etkinleşmiş bindirme faylarını takip eder ve bu zonlar Tasiast ve Piment fay sistemlerini içerir (Şekil 3). Yeşiltaş kuşağı, alt seviyelerde ultramafik kayaçlar ile felsik ve orta bileşimli akıntılardan oluşur. Üzerinde mafik volkanik kayaçlar ve volkanik-klastikler, ardından felsik volkanik kayaç dizisi içinde yer alan BIF oluşumu bulunur. Kuşağın kuzey ucundaki Piment yatakları, BIF, felsik volkanik kayaçlar ve ilişkili klastik kayaçlar tarafından barındırılırken, güney ucundaki West Branch yatakları, mafik kayaçlar içinde yer almaktadır (Şekil 3) (Sedore & Masterman, 2012). Yataklarda gümüş (Ag), arsenik (As), antimon (Sb) ve tungsten (W) anomalileri rapor edilmiştir. Alterasyon mineralleri arasında biyotit, serisit ve klorit bulunmaktadır (Davis, 2011).



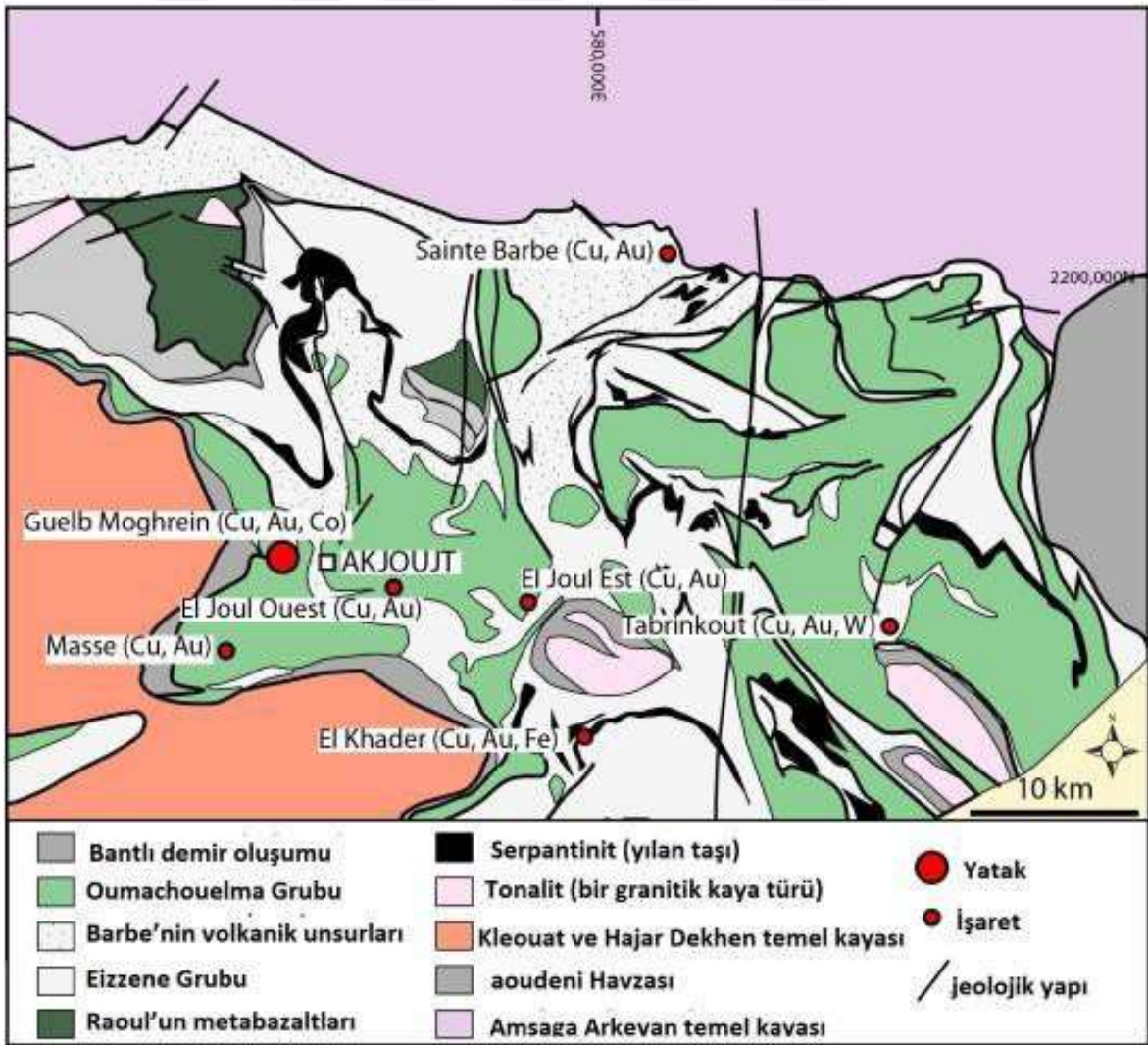
Şekil 3. Rgueibat Kalkanı'nı Tasiast-Tijirit bölgesindeki ana litotektonik birimleri (Davis, 2011).

Kil alterasyonu ve yüksek tuzluluk içeren akışkan kapanımları, bu yatakların epitermal altın yatağı olup olmadığı konusunda bazı tartışmalara yol açsa da, büyük olasılıkla Paleoproterozoik BIF içeren orojenik altın yataklarına benzemektedir (örneğin, Avustralya'nın Kuzey Bölgesi ve ABD'deki Homestake yatakları). Rapor edilen K-Ar yaş verileri, 1.85 ve 1.50 milyar yıl (Higashihara, 2004; Marutani vd., 2005) olarak belirlenmiştir. Bu durum alışılmadıdır, çünkü genellikle Mezoarkean kayaçlar Mezoarkean altın yataklarını, Paleoproterozoik kayaçlar ise Paleoproterozoik yatakları barındırır. Bölgede, kuzeybatı yönelimli büyük bir aeromanyetik çizgisel (Taylor, 2015), Tasiast mineralizasyon alanı içindeki Chami Yeşiltaş Kuşağı'nın Aoueouat sektörüyle kesişmektedir. Bu durum, keşif çalışmaları açısından önemli olasılıklar yaratabilir.

Ayrıca, kalkanın güneybatı kısmında daha detaylı çalışmaların yapılmasının, diğer önemli altın kaynaklarını ortaya çıkarması muhtemeldir. Genellikle, tekil orojenik altın yatakları veya yatak grupları izole halde bulunmaz. Tasiast'ın doğusunda bulunan Sabkhet Nich Yeşiltaş Kuşağı'nda, benzer orojenik altın yataklarının bulunması muhtemeldir. Kuzey-kuzeydoğu (NNE) doğrultusunda uzanan bir makaslama zonu, yaklaşık 200 metre boyunca devam eden altın içeren kuvars damarlarını barındırmaktadır. Bölgedeki ana kayaçlar bazalt, gabro ve şist içermektedir. Yüksek tuzluluk içeren akışkan kapanımları, yine orojenik altın yatakları için tipik olmayan bir özellik olarak rapor edilmiştir.

1.2.3. Kuzey Mauritanidler (Inchiri Bölgesi)

Kuzeybatı yönelimli Mauritanide kuşağı, Paleozoik Appalaş kuşağının Batı Afrika'daki devamıdır. Kuşağın kuzey bölümü (Akjoujt kesimi), Rgueibat Kalkanı'nın güney kenarını takip eden bir kıvrım sergiler. Bu bölgedeki kayaçların Arkeen yaşta olduğu öne sürülse de, jeolojik haritalama ve zirkon verileri Neoproterozoik yaşlı karmaşık nap gruplarını göstermektedir. Bölgede amfibolit, metadolerit, şist ve bantlı demir oluşumları (BIF) yaygındır ve bu birimler, tipik Arkeen yeşiltaş kuşaklarına benzer. Yeşiltaş fasiyesi kayaçlarının varlığı ve tersine dönmüş metamorfik diziler, bölgeyi orojenik altın yatakları için potansiyel olarak elverişli hale getirmektedir (Goldfarb vd., 2005). Akjoujt kesimi yüksek derecede mineralize olmuştur (Şekil 4).



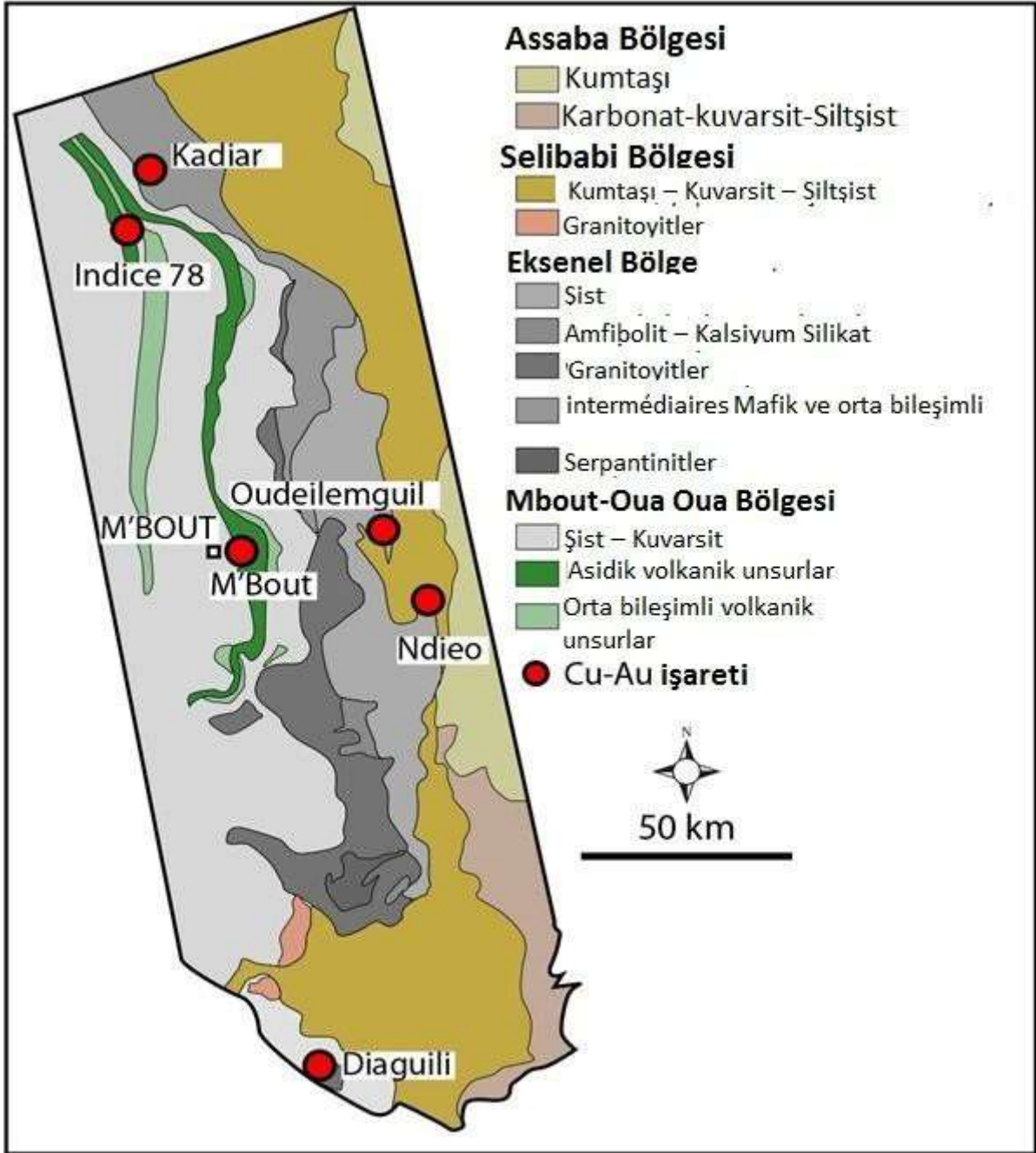
Şekil 4. Akjoujt bölgesinin genel jeolojisi (Davis, 2011).

Büyük Guelb Moghreïn Cu-Au yatağı, Kalkan'ın yaklaşık 25 km güneyinde ve en önemlisi, tartışmalı yaşa sahip bu kayaçların içinde yer almaktadır. Guelb Moghreïn'deki (Kolb, vd., 2006) yer değiştirme kütleleri yüksek altın tenörlerine ve birkaç yüzde bakıra sahiptir. Ek olarak, 1975 ve 1992 yıllarında yapılan keşif sondajları sırasında, tarihi bir W sahası olan Tabrinkout'ta mineralize kuvars damarları bulunmuştur. Mineralizasyon tipik olarak şist içindeki karbonat açısından zengin birimlerle sınırlıdır. Tabrinkout'ta, 1960'larda W için volframit madenciliği yapılmış ve daha yakın zamanda Au, Bi ve Cu değerleri anomali rapor edilmiştir. Şirket basın açıklamaları, mineralizasyonun 30 km batıda bulunan Guelb Moghreïn ile benzerlikler taşıdığını öne sürmektedir. Guelb Moghreïn'de madencilik faaliyetleri sürmektedir ve burada %1,88 Cu ve 1,41 g/t Au içeren yaklaşık 24 Mt kaynak bulunmaktadır. 2011 yılında yaklaşık 60.000 ons altın elde edilmiştir (Beaudoin, 2015).

1.2.4. Güney Mauritanidleri

Bölgede Chiron, Kadiar, Gold Project 337, Indice 78, Oudelemguil, M'Bout, Ndieo ve Diaguili dahil en az 15–20 küçük altın ve (veya) bakır sahası bulunmaktadır (Şekil 5) (Goldfarb vd., 2015).

Güney Mauritanides'teki altın-bakır sahalarına dair mevcut anlayış oldukça zayıftır. Alman araştırmacılar bu sahaları IOCG yatak türleri olarak tanımlarken, Japon araştırmacılar bunları epitermal veya mezotermal (orojenik) türde altın yatakları olarak sınıflandırmıştır. Japon araştırmacılar ayrıca, Oudeilemguil bakır sahasından alınan hidrotermal serisit üzerinde yapılan K-Ar yaşlandırması sonucunda 513 ± 13 milyon yıl olarak belirlenen bir yaş rapor etmişlerdir; bu da geç Pan-Afrikan dönemine ait bir mineralizasyon olayını işaret etmektedir. Sahaların tanımları, bunların geniş bir alana yayılmış, altın, pirit ve çeşitli bakır içeren sülfür ve oksit mineralleri içeren küçük kuvars damarcıkları ve ilgili gossanlardan oluştuğunu göstermektedir. Rapor edilen altın ve gümüş tenörlerinin çoğu oldukça düşüktür. Japon araştırmacılar tarafından yapılan birkaç ön keşif düzeyindeki sıvı kapanım çalışmaları, altın yatak türünü anlamak açısından kesin sonuçlar vermemektedir (Goldfarb vd., 2015).



Şekil 5. Güney Mauritanides'teki Cu-Au oluşumlarının genel jeolojisi ve konumu (Davis, 2011).

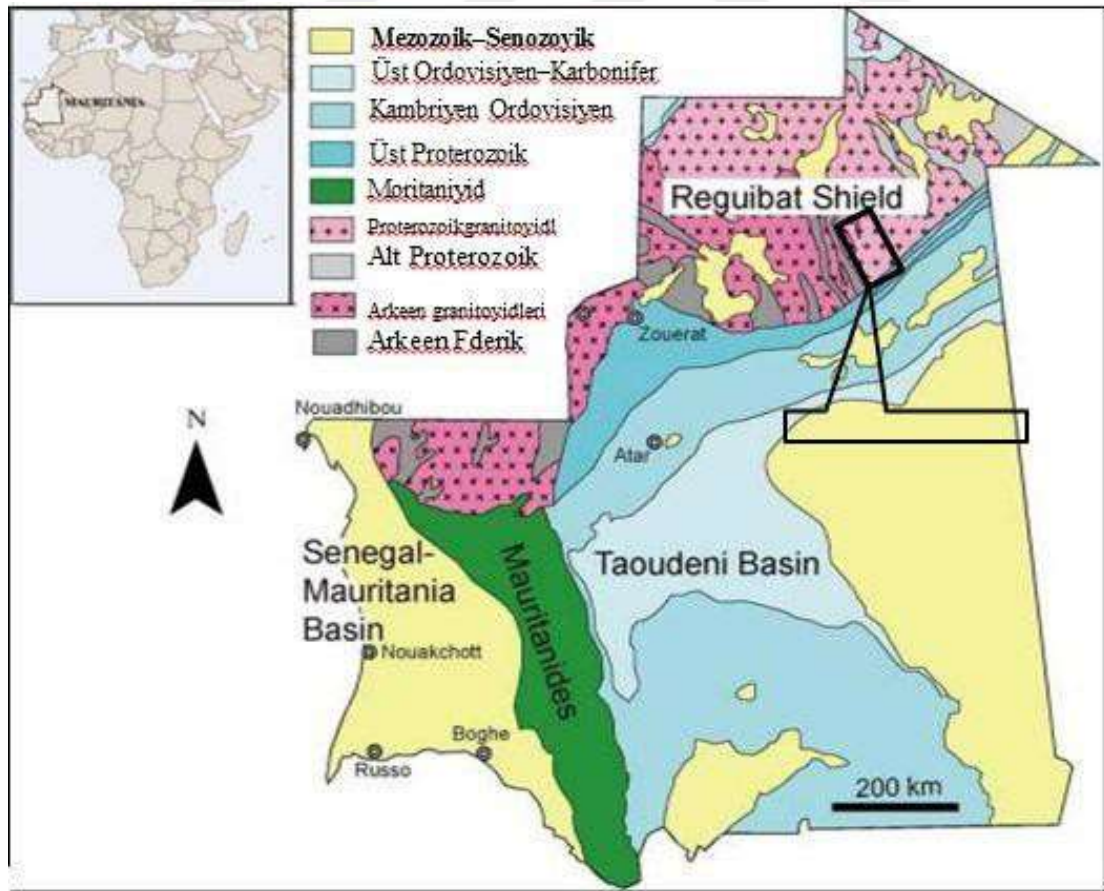
1.2.5. Taoudeni Havzası

Taoudeni Havzası'nın güneydoğusundaki, Mauritanya-Mali sınırı boyunca yer alan bölge hakkında çok az jeolojik bilgi mevcuttur. Nema köyü civarında, yalnızca konum bilgisi mevcut olan üç altın potansiyeli rapor edilmiştir. Bu potansiyellerin, Mezozoik

volkanizmasının görüldüğü bir bölgede bulunduğu ve epitermal yatak türlerinde altın kaynakları açısından en azından izin verilebilir bir bölgeyi temsil ettiği düşünülmektedir.

Rgueibat Şildi ile Taoudeni Havzası'nın (Şekil 6) kuzey tarafı arasındaki alan, Neoproterozoik'ten Erken Paleozoyik'e kadar uzanan platform sedimanter birimleri ile örtülüdür ve bu birimler önemli miktarda karbonat kayaçları içermektedir. Bu doğu-kuzeydoğu yönelimli kıta kenarı sedimanter kayaç dizisinden herhangi bir altın oluşumu bildirilmemiştir.

Bununla birlikte, eğer akarsu sedimanlarında herhangi bir cıva, antimon veya altın anomalisi bulunursa, bölge Carlin tipi yataklar için izin verilebilir olabilir. Ancak, bu olasılık düşüktür, çünkü buradaki karbonat kayaçları tipik Carlin altın yataklarını barındıran kayaçlara kıyasla daha derin su ortamlarında oluşmuştur. Ayrıca, daha eski sedimanter kayaçların üzerinde yer alan ve kuzeydoğuya doğru Cezayir'e uzanan başka bir Mezozoik volkanik kayaç kuşağı da epitermal altın potansiyeli açısından ayrıntılı bir şekilde incelenmiştir.



Şekil 6. Taoudeni Havzası'nı jeolojik bölgeleri ile önemli jeolojik birimleri gösteren harita

1.3. El Sanatları ve Küçük Ölçekli Alın Madenciliğinde (ASGM) Amalgamlama Uygulaması

Küçük ölçekli ve geleneksel altın madenciliği (ASGM), dünya genelinde yaklaşık 15 milyon madenci tarafından yürütülen ve küresel altın üretiminin %20'sine kadarını sağlayan bir faaliyettir (Dietz vd., 2022). Bu sektörde en yaygın kullanılan altın kazanım yöntemi, düşük maliyetli ve basit ekipman gerektirmesi nedeniyle özellikle gelişmekte olan ülkelerde tercih edilen cıva ile amalgamasyon yöntemidir (Eboigbe vd., 2025). Amalgamasyon, küçük ölçekli altın madenciliğinde kullanılan geleneksel bir yöntemlerdir. Bu yöntemde cevher genellikle 0,5 mm'nin altına öğütülerek cıva ile karıştırılır ve altın ile gümüş doğrudan alaşım oluşturan bir amalgam (Denklem 1) meydana getirir:



Ağır amalgam parçaları çökelme veya gravite ile diğer minerallerden ayrıldıktan sonra basit cihazlarda ısıtılarak cıvası buharlaştırılır ve geride saf altın kalır. Yöntem, altın geri kazanımında %30–90 aralığında verim sağlayabilmekle birlikte bu oran, altının serbestleşme derecesi, tane boyutu ve cevherin mineralojik özelliklerine bağlı olarak değişmektedir (Hilson & Pardie, 2006).

1.3.1. Amalgamlama Atıklarının Ekonomik Önemi ve Çevresel Etkileri

Amalgamasyon, ASGM sektöründe küresel cıva tüketiminin en büyük kaynağıdır. UNEP (2019) verilerine göre, her yıl yaklaşık 800 ton cıva atmosfere, 1200 ton cıva ise kara ve su ekosistemlerine salınmaktadır. Açık havada yapılan buharlaştırma işlemleri, atmosfere doğrudan cıva salınımına yol açarken, cıvanın bir kısmı su yollarına ve toprağa karışarak metilcıva (MeHg) formuna dönüşür. Metilcıva, balık ve diğer sucul organizmalar aracılığıyla biyolojik zincire girer ve insanlarda sinir sistemi hasarları, organ tahribatı ve gelişimsel bozukluklara neden olur (Chanda-Kapata, 2020).

Amalgamasyon atıkları, altın (genellikle birkaç ila onlarca g/t), gümüş ve bakır gibi değerli metaller içerdiğinden, ikincil kaynak olarak değerlendirilebilir. Bu atıkların gravite, flotasyon ve liç yöntemleriyle yeniden işlenmesi, ekonomik geri kazanım sağlarken, cıva ve arsenik gibi toksik elementlerin çevresel risklerinin azaltılması için mutlaka kontrollü süreçler uygulanmalıdır. (Velásquez-López, Veiga, & Hall, 2010)

Şekil 7. Moritanya'nın altın madenciliği işleme yerleri ve izin verilen altın koridorları

Hükümetin sektörü desteklemek ve altın sahalarını ASGM'nin kullanımına açmak için olumlu yönde tutumu bulunmaktadır. Ek olarak, Ulusal Jeoloji ve Madencilik Mirası Araştırma Ajansı (OMRG) ile mutabakat sağlanarak, altın madencileri için bir rehber olarak hizmet vermek amacıyla bir altın madenciliği haritası hazırlanmıştır (Şekil 7). Moritanya hükümeti, ilave madencilik koridorları açarak ve jeolojik bilgileri ASGM paydaşlarının kullanımına sunarak, sektörün resmileştirilmesini aktif ve gözle görülür şekilde desteklemektedir (Şekil 8 ve Şekil 9).



Şekil 8. ASGM Üretim yeri

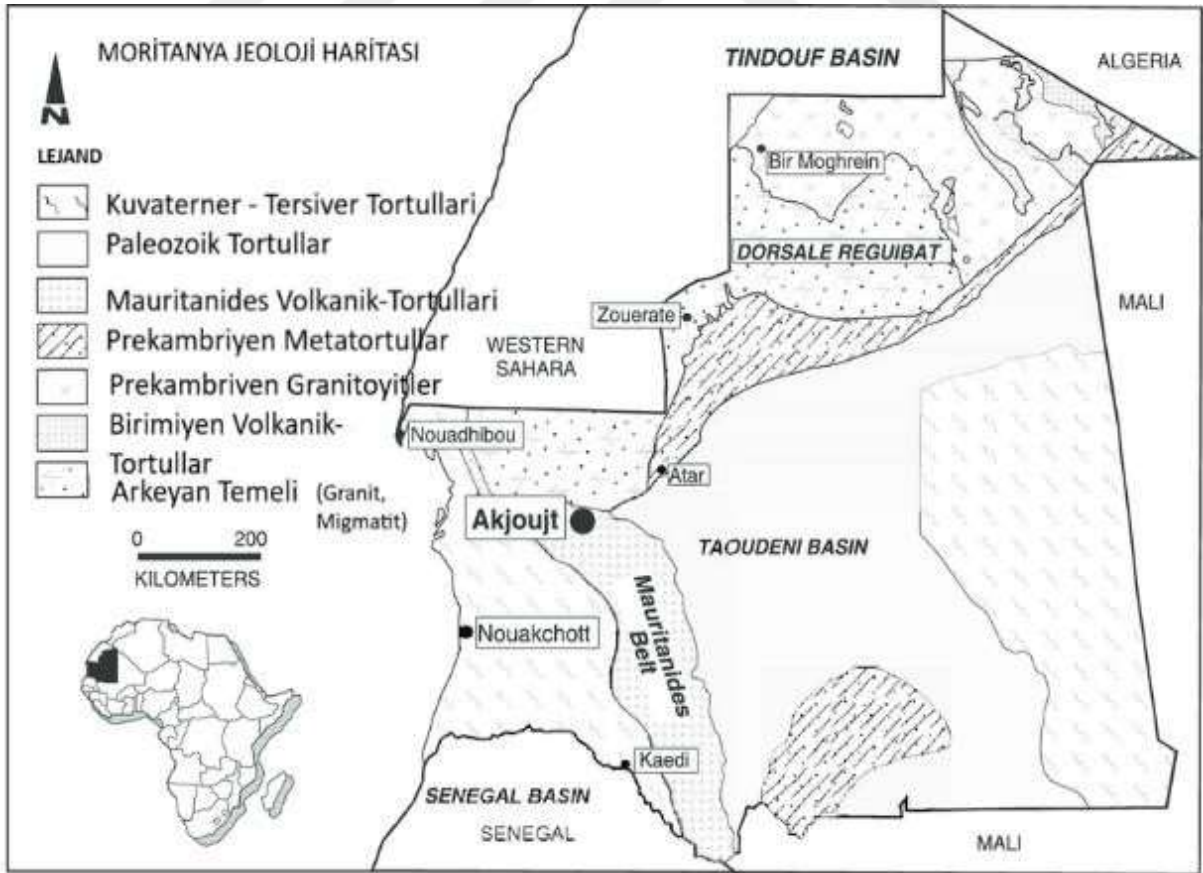


Şekil 9. Chami'deki valsli değirmenlerle cevherin yaş öğütülmesi ve işleme uygulamaları

2021 yılı itibarıyla, Moritanya ASGM sektörü yılda yaklaşık 32,8 milyar Moritanya Ouguiyası (yaklaşık 800 milyon Euro) üretmiştir ve bu, GSYİH'nın %9'unu oluşturmuştur. Her ne kadar zorluklarla karşılaşılsa da ASGM sektörü, yarı endüstriyel operasyonlar için öngörülen 15.200 pozisyon hariç, 2019'da yaklaşık 52.000 doğrudan iş yaratarak ülkede önemli bir istihdam ve gelir kaynağı olduğunu kanıtlamıştır. Ek olarak, Moritanya'nın toplam çalışan nüfusunun yaklaşık %5,5'ini oluşturan 222.098'den fazla kişi sektörden dolaylı olarak yararlanmıştır.

1.4.1. Zouerat-Bir Moghreïn Bölgesi Jeolojik Özellikleri

Zouérat-Bir Moghreïn bölgesi, Moritanya'nın kuzeybatısında, Batı Afrika Kratonu'nun kuzey kenarında yer almakta olup, Arkeen ve Paleoproterozoik yaşlı bantlı demir oluşumları (BIF), yeşiltaş kuşağı (greenstone belt) birimleri ve granitik intrüzyonlar ile karakterize edilir (Şekil 10) (Schofield vd., 2012).



Şekil 10. Moritanya Zouérate-Bir Mogrein bölgesi jeoloji haritası

Bölgede, özellikle Tasiast çevresindeki altın mineralizasyonları, üst yeşil şist–alt amfibolit fasiyesinde, kuvarsit-magnetit BIF’ler ve volkaniklastik kayalar içerisinde, kuvars-karbonat-albit-pirrotit damarları ve yaygın altın mineralizasyonları ile ilişkilidir.

Bu sahalar mineralojik olarak kuvars, pirit, hematit ve manyetitçe zenginleşmiş olup, altın ve cıva amalgamlarının oluşumuna uygun bir zemin sunmaktadır (Schofield vd., 2012). Bu bölgede amalgamlama işlemleri yapılmakta ve ortaya çıkan atıklar önemli çevresel etkilere ve ekonomik kayıplara neden olmaktadır.

1.5. Konu ile İlgili Yapılmış Çalışmaların Literatür Özeti

Brezilya Amazonu'ndaki terkedilmiş küçük ölçekli altın madenlerinin cıva kirliliği mirasını ele almışlardır. Çalışma, bölgedeki cıva kirliliğinin boyutlarını ve çevresel etkilerini ortaya koymaktadır (Veiga & Hinton, 2002).

Gana'nın küçük ölçekli altın madenciliği sektöründe cıvanın yoksulluk üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Çalışma, cıva kullanımının sosyo-ekonomik etkilerini ve madencilerin maruz kaldığı riskleri değerlendirmektedir (Hilson & Pardie, 2006)

Tanzanya'daki cıva maruziyeti ve çevresel adalet konularını mesleki sağlık perspektifinden değerlendirmiştir. Bu çalışma, madencilerin sağlık risklerini ve çevresel etkileri ele almaktadır (Spiegel, 2009).

Kolombiya'nın Antioquia bölgesindeki küçük ölçekli altın madenciliğinden kaynaklanan cıva kirliliğini araştırmışlardır. Çalışma, bölgedeki cıva kirliliğinin boyutlarını ve insan sağlığı üzerindeki potansiyel etkilerini incelemektedir (Cordy vd., 2011).

Endonezya'daki küçük ölçekli altın madenciliğinde cıva kayıplarını ve altın üretimini tahmin etmişlerdir. Çalışma, cıva kullanımının çevresel etkilerini ve madencilik süreçlerindeki verimliliği değerlendirmektedir (Yoshimura, Suemasu, & Veiga, 2021).

Senegal'in Kedougou bölgesinde yapılan bir çalışmada, küçük ölçekli altın madenciliği faaliyetlerinin toprak, tortu ve nehirlerde toplam cıva ve metilciva konsantrasyonlarını artırdığı belirlenmiştir. Bu durum, çevresel ve insan sağlığı açısından ciddi riskler oluşturmaktadır (Gerson vd., 2018).

Human Rights Watch tarafından yapılan bir raporda, Mali'deki küçük ölçekli altın madenciliğinde çocuk işçiliği ve cıva kullanımı konuları ele alınmıştır. Çalışma, çocukların

cıvaya maruz kalmasının sağlık üzerindeki olumsuz etkilerini vurgulamaktadır (Kippenberg, 2011)

Sudan'ın Darmali bölgesinde yapılan bir çalışmada, küçük ölçekli altın madenciliği faaliyetlerinden kaynaklanan cıva kirliliği değerlendirilmiştir. Toprak ve su örneklerinde yüksek cıva seviyeleri tespit edilmiş ve bu durumun insan sağlığı üzerindeki potansiyel riskleri vurgulanmıştır (Elwaleed vd., 2024)

Cezayir ve Fas'ta amalgamlama atıklarında bulunan altın ve cıvanın mineralojik karakterizasyonuna yönelik spesifik bir çalışmaya rastlanmamıştır. Ancak, bu ülkelerde küçük ölçekli altın madenciliği faaliyetlerinin çevresel etkileri üzerine genel değerlendirmeler yapılmıştır.

Moritanya'nın kuzeyinde açılan madencilik koridorlarında yapılan incelemeler kapsamında Cheggat Koridoru ve Diğer ASGM Alanlarında Yapılan Çalışmalarda amalgamlama sürecinde kullanılan cıvanın büyük bir kısmının atıklarla birlikte doğaya salındığını göstermektedir. Özellikle açık alanda yapılan amalgamlama süreçleri, cıva kayıplarını artırarak çevresel kirliliği ciddi oranda etkilemektedir (Heidi, 2022).

Moritanya'da ASGM sektörü nispeten yeni gelişmiş olmasına rağmen, özellikle Zouérate bölgesi gibi altın madenciliğinin yoğun olduğu alanlarda amalgamlama atıklarının karakterizasyonu üzerine henüz detaylı çalışmalar yapılmamıştır.

1.6. Çalışmanın Amacı ve Literatürde Dolduracağı Boşluk

Amalgamlama, küçük ölçekli altın madenciliğinde (ASGM) yaygın olarak kullanılan bir yöntem olup, çevresel ve insan sağlığı açısından önemli riskler barındırmaktadır. Cıva, bu süreçte altını ayırmak için kullanılırken, büyük bir kısmı doğrudan atıklar yoluyla çevreye salınmakta ve ekosistem üzerinde geri dönüşü zor etkilere yol açmaktadır. Özellikle Moritanya ve benzeri ülkelerde, cıva kirliliğinin kontrol altına alınması ve çevresel etkilerinin azaltılması yönünde yeterli çalışma bulunmamaktadır.

Yapılan literatür incelemesi, amalgamlama atıklarında altın ve cıvanın mineralojik karakterizasyonuna dair çeşitli araştırmaların bulunduğunu göstermektedir. Ancak, bu çalışmalar genellikle Latin Amerika (Brezilya, Kolombiya), Afrika (Gana, Tanzanya) ve Asya (Endonezya, Filipinler) bölgelerinde yoğunlaşmıştır. Moritanya özelinde yapılan araştırmalar ise oldukça sınırlıdır ve özellikle Zouérate ve Bir Mogrein bölgelerindeki altın

madencilik atıklarının mineralojik ve kimyasal karakterizasyonu hakkında detaylı veriler içeren çalışma sayısı yetersizdir.

Bu noktada, mevcut araştırmalar şu eksiklikleri içermektedir:

Bölgesel eksiklikler: Moritanya'daki ASGM faaliyetleri 2016'dan sonra hızla artmasına rağmen, bu bölgedeki amalgamlama atıkları üzerine yapılan akademik çalışmalar oldukça sınırlıdır.

Cıva ve altının bağlanma şekilleri: Cıvanın farklı minerallerle birleşim özellikleri ve atıklardaki altın kazanım potansiyeli üzerine detaylı mineralojik analizler eksiktir.

Proses optimizasyonu: Çevresel etkileri azaltmaya yönelik daha sürdürülebilir yöntemler geliştirmek için, atıklarda kalan altının hangi formda bulunduğu dair yeterli bilgi mevcut değildir.

Yerel madencilik uygulamalarıyla ilişkilendirme: Mevcut çalışmalar genellikle küresel ölçekte genel değerlendirmeler içermektedir; ancak Moritanya'daki madencilik yöntemlerinin spesifik karakteristikleri göz önünde bulundurulmamıştır.

Bu çalışmanın temel amacı, Moritanya Zouérate ve Bir Mogrein bölgesindeki ASGM faaliyetlerinden kaynaklanan amalgamlama atıklarını mineralojik ve kimyasal olarak karakterize etmek ve altın ile cıvanın atıklardaki dağılımını belirlemektir. Bu doğrultuda, aşağıdaki hedefler belirlenmiştir:

- ✓ Atıklarda bulunan ana bileşenleri belirlemek,
- ✓ Cıva ve altının mineralojik bağlanma formlarını detaylı olarak incelemek,
- ✓ Atıklardaki altın kazanım potansiyelini değerlendirmek ve daha sürdürülebilir geri kazanım yöntemleri geliştirmeye yönelik bilimsel veri sağlamak,
- ✓ Bölgesel bazda çevresel kirliliği azaltmaya katkı sağlayacak stratejiler önermek.

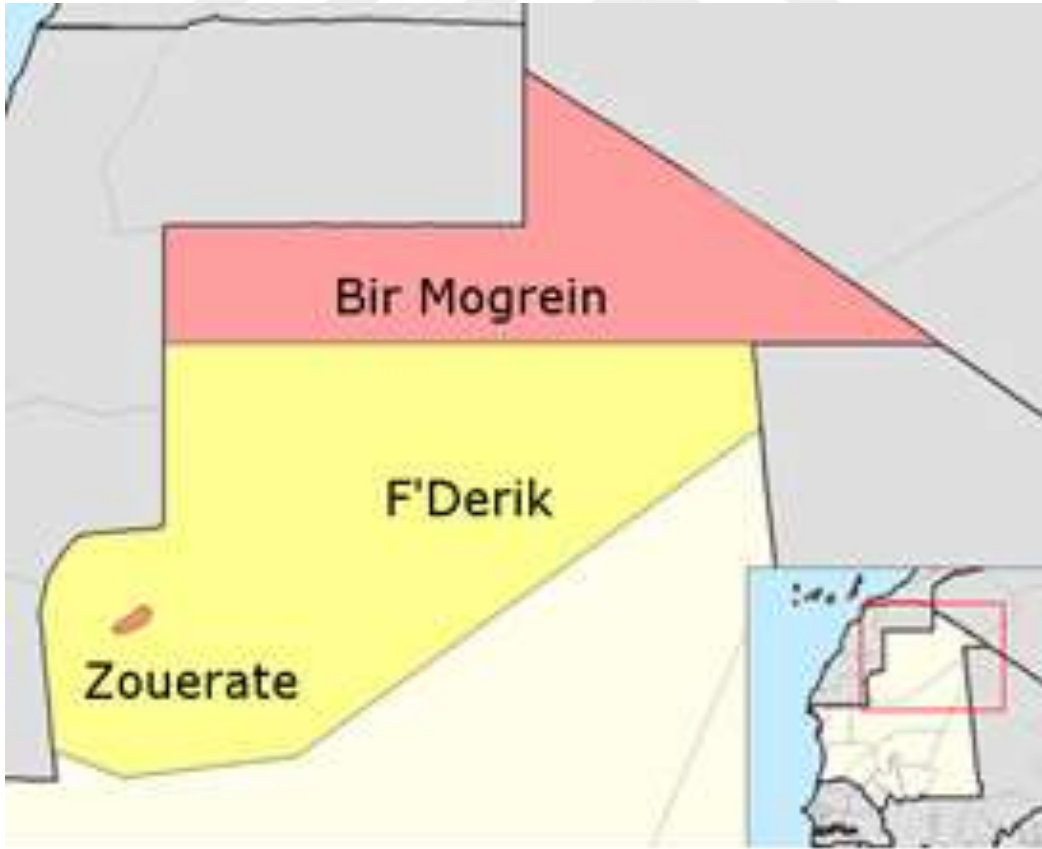
Bu çalışmanın bulguları, hem Moritanya özelinde ASGM sektörünün çevresel etkilerini azaltmaya yönelik politika önerileri geliştirilmesine katkı sağlayacak hem de bölgesel bazda atık yönetimi ve madencilik süreçlerinin iyileştirilmesi için bilimsel bir temel sunacaktır. Aynı zamanda, cıva maruziyetinin insan sağlığı ve ekosistem üzerindeki etkilerini azaltmaya yönelik stratejilere ışık tutacaktır.

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

Bu bölümde, Moritanya'nın Zouérat–Bir Moghrein bölgesinden temin edilen amalgamasyon atıklarının mineralojik ve kimyasal karakterizasyonuna yönelik olarak gerçekleştirilen laboratuvar ve analiz çalışmaları sunulmaktadır. Numunelerin hazırlanması, elek ve ağır ortam ayırma testleri, XRF, ICP-AES, Fire Assay, AAS-FIAS analizleri, XRD, SEM-EDS ve liç deneyleri gibi yöntemler detaylandırılmıştır.

2.1. Malzeme

Yapılan çalışmada incelenen örnekler Moritanya Zouérate-Bir Mogrein bölgesinden temin edilmiştir (Şekil 11). Sahadan alınan temsili atık numuneleri paketlenerek laboratuvarımıza getirilmiştir (Şekil 12).



Şekil 11. Örneklerin alındığı Moritanya Zouérate-Bir Mogrein bölgesi yer bulduru haritası



Şekil 14. Örnek bölme işleminden sonra paketlenen atık numuneleri

Tane boyutu dağılımını belirlemek amacıyla 600 μm , 500 μm , 324 μm , 150 μm , 106 μm , 74 μm , 38 μm , 25 μm ve 10 μm boyutlarında standart ASTM elekleri kullanılarak yaş eleme yöntemi uygulanmıştır (Şekil 15). Eleme işlemi, her elek katmanı üzerinde su yardımıyla ve manuel (elle) titreşim uygulanarak gerçekleştirilmiştir. Her fraksiyon ayrı ayrı kurutulmuş, tartılmış ve ağırlık yüzdeleri hesaplanmıştır. Bu fraksiyonlar daha sonra mineralojik ve kimyasal analizler için kullanılmış; özellikle -74+38 μm aralığı ağır ortam ayırma ve mikroskobik analizler için tercih edilmiştir.



Şekil 15. Laboratuvar ortamında gerçekleştirilen yaş elek analizi süreci ve farklı boyut fraksiyonlarına ait numune görselleri

İnce tane boyutlarında yapılacak deneylerde kullanılma üzere temsili örneğin öğütülmesi kuru olarak seramik bilyalı değirmen içerisinde gerçekleştirilmiştir (Şekil 16). Öğütme süresi ve tane boyutu öncelikle lazerli tane boyut ölçüm sistemi cihazı (Malvern MasterSizer) ile kontrol edilerek belirlenmiştir. Öğütme işlemi sonucunda hedeflenen alt boyutlara ulaşılmış ve d_{80} tane boyutu $74\ \mu\text{m}$ ve $+38\ \mu\text{m}$ arasında değişen ürünler elde edilmiştir (Şekil 17). Analizi yapılacak örnekler öncelikle halkalı öğütücü yardımı ile 38 mikron boyut altına geçecek şekilde kuru olarak öğütülmüştür (Şekil 18).



Şekil 16. kuru seramik bilyalı değirmen Öğürme değirmeni



Şekil 17. Lazerli Tane boyut analiz cihazı (Malvern Mater Sizer)



Şekil 18. Halkalı öğütücü sistemi

2.2.2. Örneklerin Kimyasal Analiz Yöntemleri

Öğütülen numune, daha sonra kimyasal analizlere tabi tutulmuştur. Cevher örneği için XRF (X- Işını Floresansı) analiz tekniği ile ana oksit bileşimleri belirlenmiş, ICP-AES yöntemiyle çoklu element analizleri gerçekleştirilmiştir. Altın (Au) miktarı ise ergitme analizi ile küpelyon yöntemi (FA) kullanılarak analiz edilmiştir. Diğer örneklerin Au, Ag, Cu ve Hg metal analizleri ise kral suyu çözündürmesi sonrasında AAS ile gerçekleştirilmiştir.

2.2.3. Katı Örneklerin Kral Suyu ile Çözündürme İşlemleri

Katı numunelerin çözündürülmesi, metal analizlerine uygun sıvı faza geçişin sağlanması amacıyla kral suyu (*aqua regia*) yöntemiyle gerçekleştirilmiştir. Her bir numuneden yaklaşık 5 gram alınarak bir beher içine yerleştirilmiş ve üzerine hacimce 3:1

oranında hazırlanmış taze derişik HCl ve HNO₃ karışımı (yaklaşık 40 mL) eklenmiştir. Numuneler açık sistemde, kontrollü şekilde yaklaşık 200 °C sıcaklıkta çözündürülmüş ve çözünme tamamlandıktan sonra çözelti oda sıcaklığına soğutulmuştur. Soğuyan çözeltiler, süzgeç kâğıdından süzülerek 50 mL balon joje içine aktarılmış ve saf su ile seviye tamamlanarak analiz için hazır hale getirilmiştir (Şekil 19).

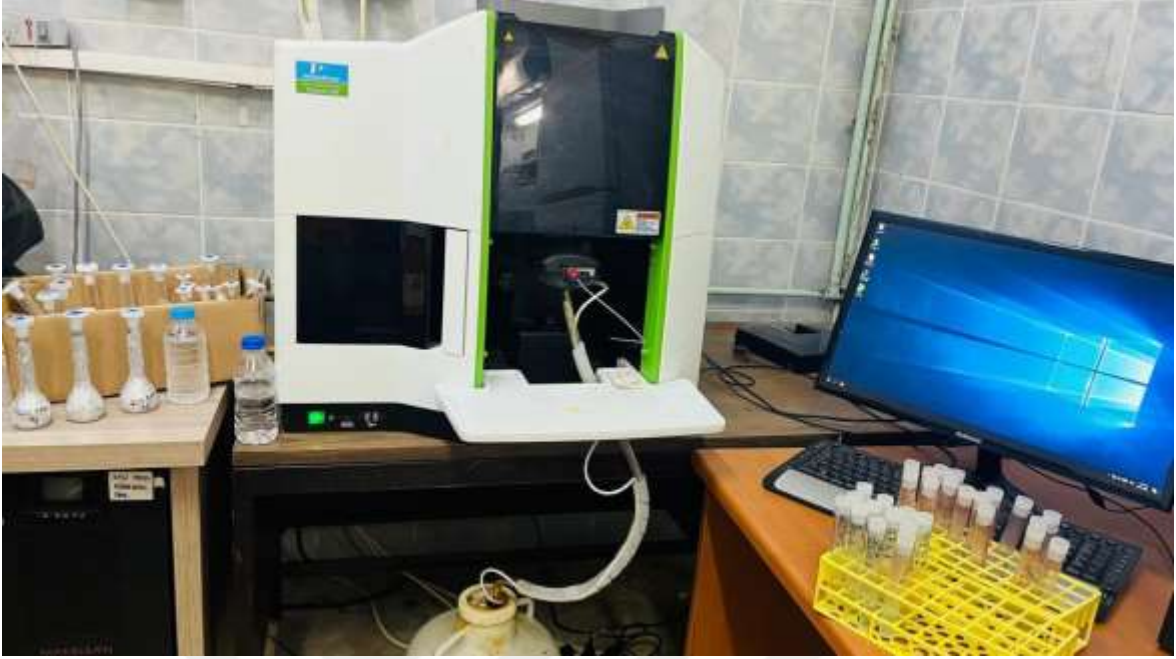


Şekil 19. Kral suyu ile çözündürülmüş katı numunelerin analiz öncesi çözelti hâli

2.2.4. AAS ile Çözeltiden Metal Analiz Sistemi

Elde edilen çözeltiler, Au, Cu, Ag ve Hg elementlerinin tayini amacıyla Hg analizlerini Perkin Elmer AAnalyswt 400 ve FIAS 100 model cihazlarla edilmiştir. (Şekil 20).

AAS analizleri, elementlerin atomik absorpsiyon dalga boylarındaki geçişlerine dayalı olarak gerçekleştirilmiştir. Kalibrasyon çözeltileri, her bir element için 1000 ± 2 ppm stok çözeltilerden türetilmiş, uygun konsantrasyonlarda seyrelterek standart çözeltiler hazırlanmıştır. Altın (Au), gümüş (Ag) ve bakır (Cu) elementleri için ayrı ayrı kalibrasyon eğrileri oluşturulmuş, tüm analizlerde $R^2 \geq 0,999$ korelasyon katsayısı elde edilmiştir. Ölçüm güvenilirliğini artırmak amacıyla her numune için iki tekrar ölçüm yapılmış ve ortalama değer kullanılmıştır.



Şekil 20. AAS Analiz sistemi

Numunelerdeki cıva (Hg) analizleri, FIAS (Flow Injection Analysis System) ünitesi ile entegre Perkin Elmer AAnalyst 400 Atomik Absorpsiyon Spektrometresi kullanılarak (Şekil 21) soğuk buhar tekniği ile gerçekleştirilmiştir. Bu yöntem Hg^{2+} iyonlarının absorpsiyon yoluyla tayin edilmesine dayanır. Analiz öncesinde numuneler, uygun derişime ulaşacak şekilde nitrik asit (HNO_3) ile seyreltilmiş ve toplam hacimleri 10 mL olacak şekilde hazırlanmıştır. Seyreltme işlemi, örneğe göre 100 ile 2000 kat arasında değişecek şekilde uygulanmıştır.

İndirgeme işlemi sırasında, cıva iyonlarının metalik hale dönüştürülmesi için sodyum borhidrür (NaBH_4) çözeltisi kullanılmıştır. Ortaya çıkan cıva buharı, argon gazı taşıyıcı ortam olarak kullanılarak atomizasyon hücresine yönlendirilmiş ve 253,65 nm dalga boyunda absorpsiyon ölçümü yapılmıştır. Kalibrasyon eğrisi oluşturmak amacıyla, 1000 ppm'lik stok çözeltiden hazırlanan 10, 20, 30 ve 40 $\mu\text{g/L}$ konsantrasyonlarında standart çözeltiler kullanılmıştır. Her ölçüm iki kez tekrarlanmış ve ortalamaları alınmıştır. Kalibrasyon doğruluğu yüksek olup, $R^2 \geq 0,999$ korelasyon katsayısı elde edilmiştir. Bu yöntem ile numunelerdeki cıva içeriği yüksek hassasiyet ve tekrarlanabilirlik ile belirlenmiştir.



Şekil 21. FIAS sistemi

2.3. Karakterizasyon Testleri

Bu bölümde, Moritanya'nın Zouérat–Bir Moghreïn bölgesinden alınan amalgamasyon atıklarının mineralojik ve kimyasal özelliklerini belirlemek amacıyla gerçekleştirilen karakterizasyon çalışmaları sunulmaktadır. Numuneler üzerinde yapılan stereo ve floresan mikroskop incelemeleri, XRD-Rietveld analizleri, SEM-EDS görüntülemeleri ve ağır ortam ayırma testleri gibi yöntemler ile mineral fazların tanımlanması ve değerli metallerin dağılımı incelenmiştir.

2.3.1. XRD Karakterizasyon Testleri

Panalytical X'Pert3 Powder model XRD cihazı yardımı ile toz örnekler üzerinden Cu (1.54 Angstrom dalga boyu) X-ışını kaynağı kullanarak Pixcel 1D Detektör ile çalışılmıştır. Cihaz 1 mg numunelerden az toz numuneler için tek kristal silikon tutucu yardımı ile 5-140° ölçüm aralığında 45 kV ve 40 mA çalışma parametreleri ile çalışmaktadır. X-ışını Kırınım yöntemi (XRD) (Şekil 22), her bir kristal düzenine sahip malzemenin kendine özgü atomik dizilimlerine bağlı olarak, X-ışınlarını karakteristik bir düzen içerisinde kırması esasına dayanır. Her bir kristal ya da faz için bu kırınım desenleri

bir nevi parmak izi gibi o kristali tanımlar. Bu teknikte incelenecek olan örnek 25 mikrondan daha ince tane boyutuna gelene kadar öğütülerek toz hale getirilerek analiz edilmektedir. Elde edilen X-ışını difraktogramları High Score Plus programındaki veri tabanları kullanılarak gerekli pik düzeltmeleri (Rietveld Refinement) yapılmakta ve standart sapma oranları ile birlikte minerallerin % oranları verilmektedir.



Şekil 22. XRD analiz cihazı

2.3.2. Yüzdürme Batırma Testleri

Örneklerin gravite ile konsantre edilebilirliğini belirlemek için karakterizasyonu amacıyla Bromoform ($2,89 \text{ g/cm}^3$) ile ağır ortam ayırması gerçekleştirilmiştir (Şekil 23).



Şekil 23. Yüzdürme –Batırma test ünitesi

2.3.3. Stereo Mikroskop İncelemeleri

Numunelerin mineralojik özelliklerini belirlemek için farklı fraksiyonlar üzerinde Leica Stereo Mikroskop sistemi ile 5X-125x büyütme ve 0.4X-16.5X zoom aralığında kullanılarak incelenmiştir (Şekil 24).



Şekil 24. Stereo Mikroskop inceleme sistemi

2.3.4. Örnek İnceleme Kesitlerinin Hazırlama Süreci

SEM-EDS analizlerine uygun kesitlerin hazırlanması amacıyla, örnekler önce Metkon Epocold-R ile Metkon Epocold-H soğuk montaj reçinesi ile 1/4 oranında karıştırılarak kalıplara dökülmüş ve oda sıcaklığında kürlenmeye bırakılmıştır Şekil 25. Sertleşen numuneler, yüzey morfolojisinin bozulmadan gözlenebilmesini sağlamak için Metkon Forcipol 1V Grinder/Polisher cihazında mekanik olarak zımparalanmıştır (Şekil 25).



Şekil 25. Epoksi reçine (Metkon Epocold-R) ile kalıplanmış numunenin hazırlanması

Zımparalama işlemleri sırasıyla P300, P600, P800 ve P1200 kodlu SiC zımpara kâğıtları kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Zımparalama esnasında cihazın dönüş hızı 250–300 rpm aralığında tutulmuştur (Şekil 26).

Zımparalama sonrası numuneler, Buehler Micropolish alümina süspansiyonları (1,0 μm ve 0,3 μm) kullanılarak parlatılmış, ardından izopropil alkol ile temizlenmiş ve karbon kaplama işlemi sonrası SEM ve palarisan mikroskop analizine hazır hale getirilmiştir.



Şekil 26. Metkon Forcipol 1V cihazında numunenin P300–P1200 arası zımparalanması

2.3.5. Polarizan Mikroskop İncelemeleri

Hazırlanan parlak kesitler Nikon marka Eclipse LV100 POL model polarizan araştırma mikroskobu yardımı ile incelenmiştir. İncelemeler üstten aydınlatma modunda CFI Achromat P 4X, P 10X, LWD P 20X, P 40X, P 100X Yağlı objektifler kullanılarak CFI60 sonsuz optik sistemle gerçekleştirilmiştir(Şekil 27). Analizlerde Clemex Vision PE görüntüleme ve işleme programından faydalanılarak değerlendirmeler yapılmıştır.



Şekil 27. Polarizan mikroskop inceleme ve görüntüleme sistemleri

2.3.6. SEM-EDS Analizi ile Mikroskobik ve Elementel İncelemeler

Bu çalışmada, numunedeki mineral fazların morfolojik yapılarının gözlemlenmesi ve kimyasal bileşimlerinin belirlenmesi amacıyla Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ile Enerji Dağılımlı X-Işını Spektroskopisi (EDS) analizleri gerçekleştirilmiştir (Şekil 28). Analizler, ZEISS EVO LS10 marka SEM cihazı kullanılarak 20 kV ivme gerilimi altında yapılmıştır. Bu yöntemle, mikron altı düzeyde detaylı yüzey görüntüleme sağlanmış ve hedeflenen taneler üzerinde elementel bileşim analizleri gerçekleştirilmiştir.

Ağır ortam ayırmasından elde edilen ağır mineral konsantresinden epoksi reçineler yardımı ile parlak kesit örnekleri hazırlanarak aşındırma zımpara ve tozları ile silinerek parlatılmıştır. Parlatma işlemleri sonrasında kesitler iletkenliğin sağlanması için karbon kaplama işlemine tabi tutulmuştur. Kaplanan örnekler SEM vakum odasına yerleştirilerek yüksek kaliteli görüntüsü alınmıştır. Elektron geri saçınım modundaki parlaklık durumuna göre hedef mineraller seçilerek belirlenen noktalardan EDAX analizlerine tabi tutulmuştur.



Şekil 28. SEM-EDAX inceleme sistemi

Liç sonrası alınan atıkların karakterizasyonu için KTÜ Merkez Laboratuvarında bulunan SEM-EDAX analiz cihazında incelemeler yapılmıştır. Örneklerden ağır ortam sıvısı yardımıyla ağır mineral konsantresi elde edilmiştir. Konsantrelerdeki taneler karbon bant yardımı ile tutturularak karbon kaplama yapılmadan elektron mikroskobu sisteminde incelenmişlerdir.

Aynı örneklerin gelişmiş bir cihazda TS (Thermo Scientific) Apreo 2C FEG-SEM cihazı üzerinde çalışan, Bruker XFlash 6/60 çift (dual) EDS ile görüntüler alınmıştır (Şekil 29). Yeterliliği yüksek cihazlarla çok daha kaliteli ve net görüntülerin alınmasının mümkün olduğu görülmektedir. Özellikle atıklardan yapılan incelemeler için yüksek çözünürlükte çalışabilen cihazların tercih edilmesinin önemli ve gerekli olduğu değerlendirilmiştir.



Şekil 29. TS (Thermo Scientific) Apreo 2C FEG-SEM

2.3.7. MLA Karakterizasyon Testleri

Moritanya örneklerinin MLA yardımı ile öncelikle modal analizlerinin yapılması hedeflenirken aynı zamanda altın ve cıvaya yönelik yapıların ortaya çıkarılması amaçlanmıştır. Diğer taraftan liç sonrası atıkların karakterizasyonu da gerçekleştirilmiştir.

İncelemelere esas örnekler dar tane aralığında elekler yardımı ile sınıflandırıldıktan sonra ağır sıvı ayırmasına tabi tutulmuştur. Böylelikle örneklerin içerisindeki ağır mineral taneleri ayrılarak ağır mineral konsantrisi (H) ve hafif mineral ürünü (L) fraksiyonlarına ayrılmıştır. Hem modal analiz ve hem de detay mineralojik analizler bu örneklerden ayrı ayrı gerçekleştirilmiştir. Numuneler, Otomatik döner bölücü cihazında çeyreklenerek Tablo 3'te verilen miktarlarda temsili numuneler hazırlanmıştır.

Tablo 3. MLA numune miktarları ve ölçümlerinin yapılan tane sayıları

ÖRNEK TANIMI (-74+38 micron)	Örnek Ağırlığı (g)	Temsili Örnek (g)	Eklenen Grafite (g)	Parçacık Sayısı	Tane Sayısı
MOR-L	4.5	1.2	0.3	30.070	35.380
MOR-H	0.3	0.3	0.4	25.263	43.571

Çeyreklenen temsili numuneler ile soğuk kalıplama reçinesi (4 br. Reçine+1 br. Sertleştirici), 30 milimetrelik kalıplara dökülerek karıştırılmış ve oda sıcaklığında katılaşması beklenmiştir. Tamamen katılaşmış numuneler kalıplardan çıkarılarak, otomatik aşındırma-parlatma makinesi kullanılarak yaklaşık 8 aşamada yüzeyleri parlatılmıştır. MLA cihazına yerleştirilmeden önce, parlatılmış numunelerin yüzeyleri karbon ile kaplanarak analize uygun hale getirilmiştir. MLA ölçümlerinin yapıldığı toplam parçacık ve tane sayıları Tablo 3'te verilmiştir.

Örneklerin analizleri, TS (Thermo Scientific) Apreo 2C FEG-SEM cihazı üzerinde çalışan, Bruker XFlash 6/60 çift (dual) EDS sistemi kullanılarak yapılmıştır. Bu aşamada parçacıklardan (minerallerden) otomatik olarak BSE (Backscattered Electron) görüntüleri alınarak, her parçacık üzerindeki farklı bileşime sahip noktaların kimyasal analiz (EDS) verileri toplanmıştır. Cihaz tarafından otomatik olarak verilerin toplanmasından sonra sırasıyla; mineral tanımlama, gruplandırma, sınıflandırma, tanımlanamayan parçacıkların (Unknown, Low-Counts, No-Xray) tanımlanması işlemlerine geçilerek veriler üretilmiş ve raporlanmıştır. Sonuçların değerlendirilmesinde, TS Maps Mineralogy + TS Nanomin program paketleri ve mineral kütüphaneleri kullanılmıştır. EDS analizleri, 5 mikron aralıklarla (X-ray spacing) Grid analiz modu ile gerçekleştirilmiştir (Şekil 30).



Şekil 30. MLA Analiz cihazı

2.4. Çözündürme Deneyleri

Liç çalışmaları siyanür ve glisin reaktifleri kullanılarak ayrı ayrı gerçekleştirilmiştir. Testler kesikli ve sürekli kinetik testler şeklinde yürütülmüş olup, belirli zaman aralıklarında çözeltiden örnekler alınarak çözünmüş altın (Au), gümüş (Ag), bakır (Cu) ve cıva (Hg) analizleri gerçekleştirilmiştir. Deney sonunda katı-sıvı ayrımı yapılarak, katı fazda kalan metal miktarları çözündürme yapılarak belirlenmiştir. Bu sayede, gerçek çözünme oranları hesaplanabilmektedir.

Çalışma sırasında kullanılan siyanür ve glisin reaktiflerinin tüketim miktarları kontrol altında tutulmuştur. Reaktif konsantrasyonu sabit tutulmaya çalışılmış; ortamın redoks potansiyeli (Eh) ölçülerek, düşüş gözlemlendiğinde oksidant ilavesi yapılmıştır. Deneyler farklı tane boyutlarında öğütülmüş numuneler üzerinde uygulanmıştır (Şekil 31).

Çözünme verimleri metal miktarlarından hesaplanmıştır (Denklem 2).

$$\text{Meta} \text{ Kaza} \text{ Veri} = \frac{\text{Çözünmüş Metal Miktarı}}{\text{T. Metal Miktarı}} \times 100 \quad [2]$$



Şekil 31. Çözündürme test ünitesi

Tablo 4. Tez çalışmalarında kullanılan Laboratuvar ekipmanları ve cihazlar

No	Cihaz adı	Cihaz Markası	Cihaz modeli
1	Saf Su Cihazı	Krosteknolojik	Rentro Immu
2	Manyetik Karıştırıcı	Wisestir	Msh-20d
3	PH Metre	Hanna	H12211
4	PH Metre	Thermo Scientific	Orion Star 111
5	Manyetik Karıştırıcı	Dlab	Ms-H380-Pro
6	PH Metre	Hanna	Edge
7	Manyetik Karıştırıcı	Heidolph	Mr3001k
8	Vacum Pompası	Rockk	
9	Hassas Terazı	Pioneer (Ohaus)	Pa214c
10	Mastersizer	Malvern Inst.	Mastersizer 200mu
11	Sentrifüj	Hettich	Eba Iıı
12	Çeneli Kırıcı	Ünal	100*100
13	Halkalı Değirmen	Ünal	Tm7312
14	Dğeirmen Döndürücü	Weg	Cfw10 Easydrive
15	Etüv	Venticell	Mmm Group
16	AAS	Perkinelmer	Pinaacle 500
17	AAS	Perkinelmer	Aanalyst 400
18	FIAS	Perkinelmer	FIAS100
19	Mikro Dalga Cözücü	Milestone	Ethos Easy
20	Numune Bölücü	Fritsch	Rotary Sample Divider Laborette 27
21	Santrifüj	Müve	Nf 400
22	Hassas Terazi	Kern	Abj 220-4 Nm
23	XRD	Panalytical X'pert3 Powder Xrd	Panalytical X-Pert3 Powder
24	SEM	Zeiss Evo Ls10	Evo Ls 10
25	Zımparalama Ve Parlatma	Metkon	Forcipol 1v
26	Stereo Mikroskop	Carl Zeiss	Stemi 508
27	Polarizan Mikroskop	Nikon	Eclipse LV100 POL

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1. Kimyasal Bileşimi

Yapılan kimyasal analiz sonuçları, numunenin ana bileşeninin %86.57 oranı ile SiO₂ olduğunu görülmektedir. Altın, gümüş, bakır ve cıva tenörleri sırasıyla %2,60 ve %2,46 oranında Al₂O₃ ve Fe₂O₃ bulunduğunu göstermektedir. Cr₂O₃ ve TiO₂'nin sırasıyla 14.41, 1,02, 364.8 ve 179.4 g/t olduğu belirlenmiştir (Tablo 5).

Tablo 5. Bir Mogrein bölgesinden alınan örneğin kimyasal analiz sonuçları

Bileşik	%	Element	g/t	Element	g/t	Element	%
SiO ₂	89.57	Au	14.41	Mo	15.92	Al	0.19
Al ₂ O ₃	2.60	Ag	1.02	Ni	15.73	Ca	0.64
Fe ₂ O ₃	2.46	As	347.70	Pb	102.00	Fe	1.49
K ₂ O	0.56	Ba	59.85	Sb	<5.00	K	0.06
MgO	0.52	Be	<1.00	Sc	<0.10	Mg	0.14
SO ₃	0.72	Bi	9.12	Sn	<5.00	Na	0.06
TiO ₂	<0.01	Cd	4.08	Sr	35.34	P	0.01
CaO	1.56	Co	5.70	Th	<2.00	Ti	0.01
Cr ₂ O ₃	0.07	Cu	364.80	Tl	<5.00	Toplam C	0.22
SrO	0.01	Ga	<5.00	V	25.59	Toplam S	0.35
BaO	<0.01	Hg	179.40	W	21.92		
Na ₂ O	0.60	La	2.47	Zn	326.30		
P ₂ O ₅	<0.01	Mn	122.60	Zr	1.52		
MnO	0.02						
Ateş Kaybı	1.10						

Bu durum, amalgamlama sırasında yeterince cıva kullanılmaması sebebiyle oluşmuş olabileceği gibi nispeten daha iri tane boyutlarında cıvanın daha düşük kaybının gerçekleşmesinin nedenlerinden biri olarak değerlendirilmektedir. Bazı literatüre göre 150-350 g/t olarak verilen Hg kayıplarının kullanılan yöntem, uygulanan malzeme boyutu gibi faktörlere göre değişim gösterebileceği açıktır. Örneğin sıcak hava şartlarında atmosferik şartlara açık olarak uzun bekleme süresinde de Hg'nın buharlaşma veya yıkama yoluyla da

atmosfere veya çevreye yayılabilmesi mümkün görünmektedir. Deneyleri yapmak üzere temin ettiğimiz örnekte daha düşük konsantrasyonlarda Hg (179.4 g/t) bulunmasının çalışmalarda deneysel araştırma sistematigi anlamında daha verimli olabileceği değerlendirilmiştir. Elde edilen bu kimyasal analiz verileri Tablo 6’de sunulmaktadır.

Tablo 6. Örnekte belirlenen değerli metal içerikleri (g/t)

Element	Ölçülen Değer (g/t)
Au	15.52
Ag	1.82
Cu	42.10
Hg	175.89

Örneklerin gravite ile konsantre edilebilirliğini belirlemek için karakterizasyonu amacıyla Bromoform (2,89 g/cm³) ile ağır ortam ayırması gerçekleştirilmiştir (Tablo 7). -74+38 mikron boyut aralığındaki örnekten ağır ortam ayırması ile 555 Au g/t ve 46.5 g/t Ag ve 3255 Cu g/t içerikli bir ağır ortam konsantresi üretilebilmektedir. Bu sonuçlar altının önemli bir miktarının konsantre olarak toplanabileceğini göstermektedir.

Tablo 7. -74+38 mikron için ağır ortam ayırma ürünlerinin analizleri ve oranları.

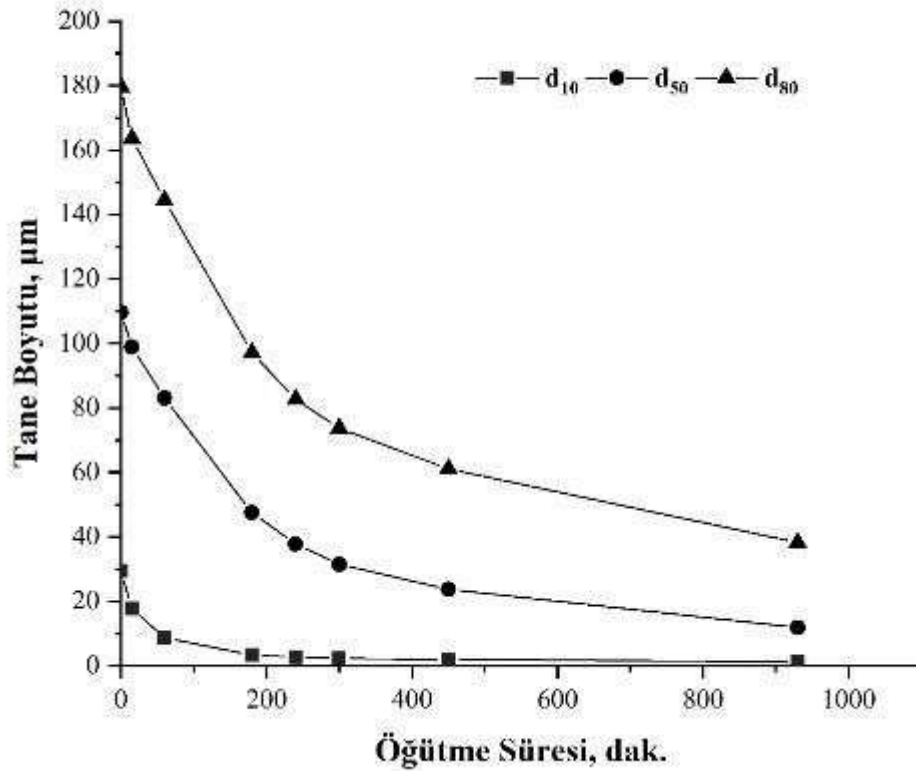
Ağır Ort.	Miktar	Metal Tenörü, g/t			Metal Dağılım, %		
Ürünleri	%	Au	Ag	Cu	Au	Ag	Cu
Ağır Ü.	2.68	554.70	46.50	3254.68	70.55	54.52	74.37
Hafif Ü.	96.71	5.81	1.01	27.70	26.67	42.73	22.84
Besleme	99.39	21.20	2.30	118.00	100.00	100.00	100.00
Kons. O.	37	26	20	28			

3.2. Tane Boyut ve Elek-Metal Dağılımı

Tane boyut dağılımı grafiklerinden numunenin nispeten daha ince olduğu, ortalama tane boyutunun ise yaklaşık 100 µm olduğu dikkat çekmektedir. Bu, bazı ASGM tesislerinde uygulanan yetersiz öğütme proseslerine göre daha verimli bir öğütmeyi göstermektedir. Ancak bu durum altının yeterince kazanılamamasının prosesin verimli

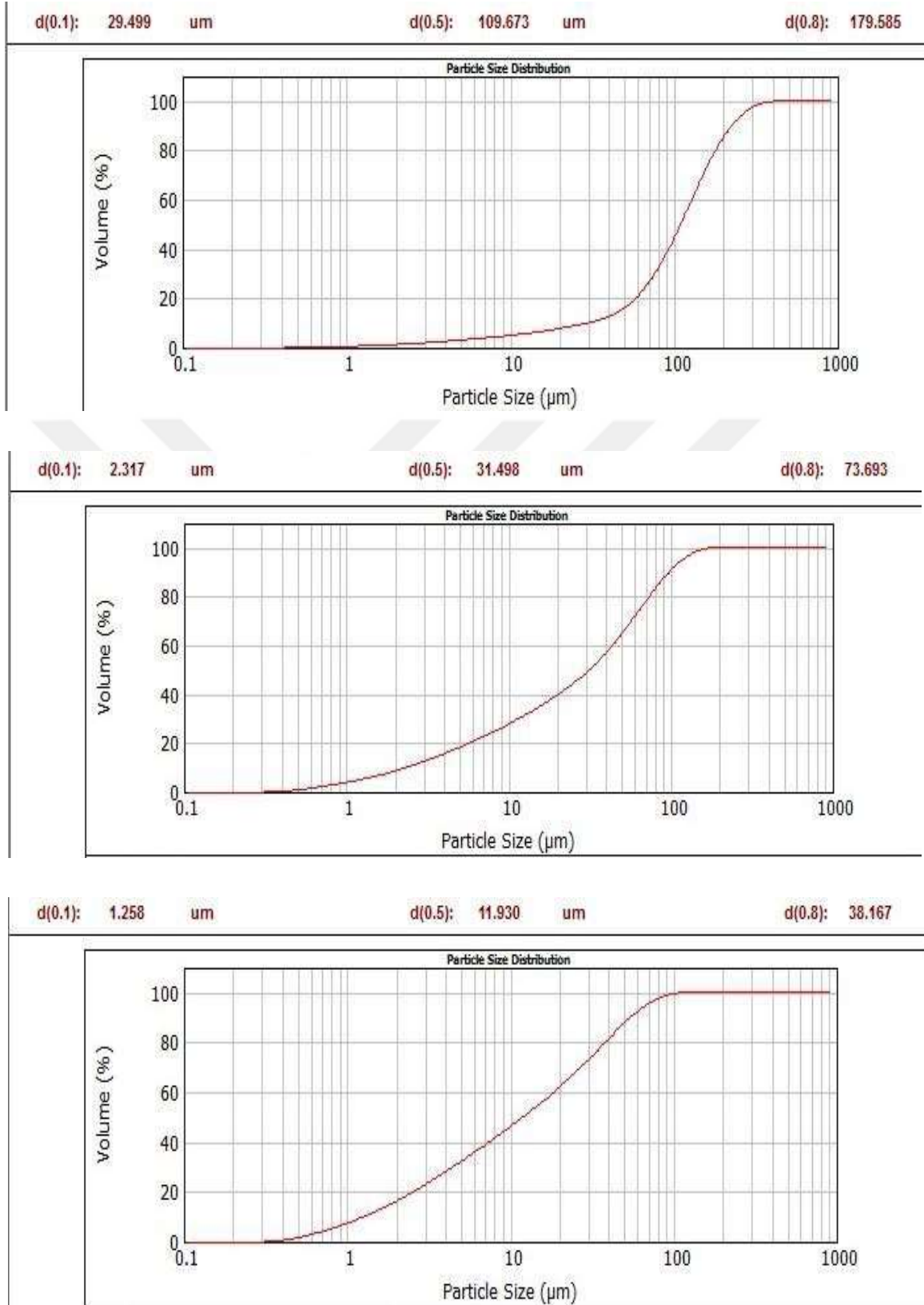
uygulanamamasından daha çok ince tane boyutlarında kapanım şeklinde bulunmasıyla bağlantılı olabileceğini de düşündürmektedir.

Şekil 32’de görülen eğilim, cevherin başlangıçta gevrek ve kırılgan fazlardan (örneğin kuvars, pirit) oluşması nedeniyle kolay parçalanması, ancak ince boyutlara yaklaşıldıkça yüzey enerjisinin artması ve ince tanelerin aglomerasyon eğilimi nedeniyle öğütme hızının düşmesi ile açıklanabilir. Ayrıca, sert minerallerin (hematit, manyetit gibi) ve ince fraksiyonlarda altın içeren amalgamların daha zor öğütülmesi de bu yavaşlamaya katkı sağlar.

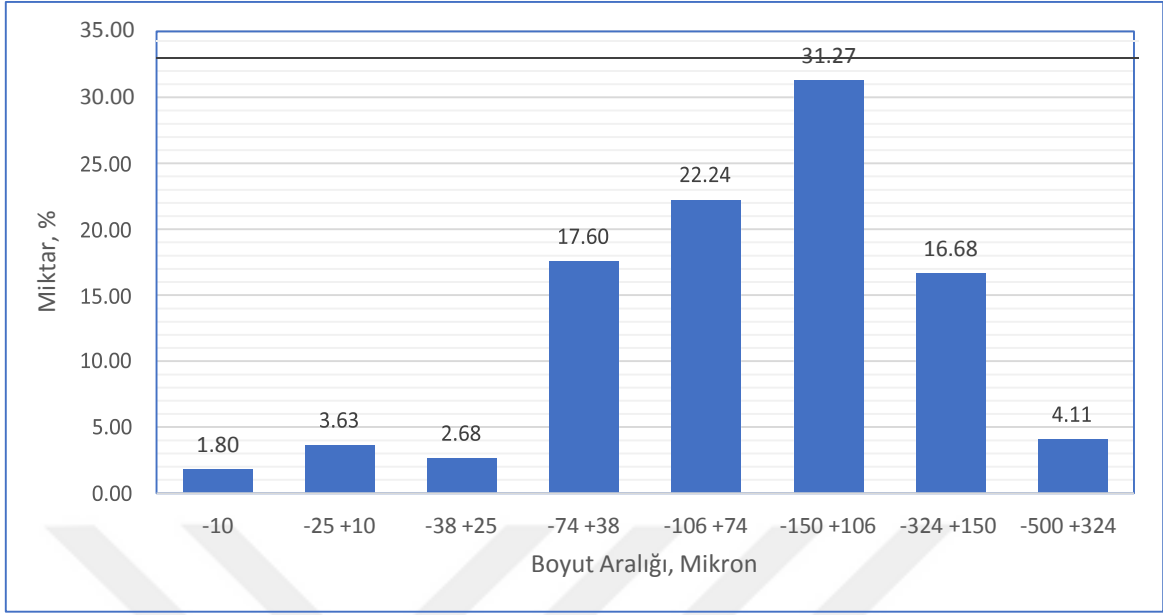


Şekil 32. Moritanya örneğinin öğütülebilirlik sonuçları

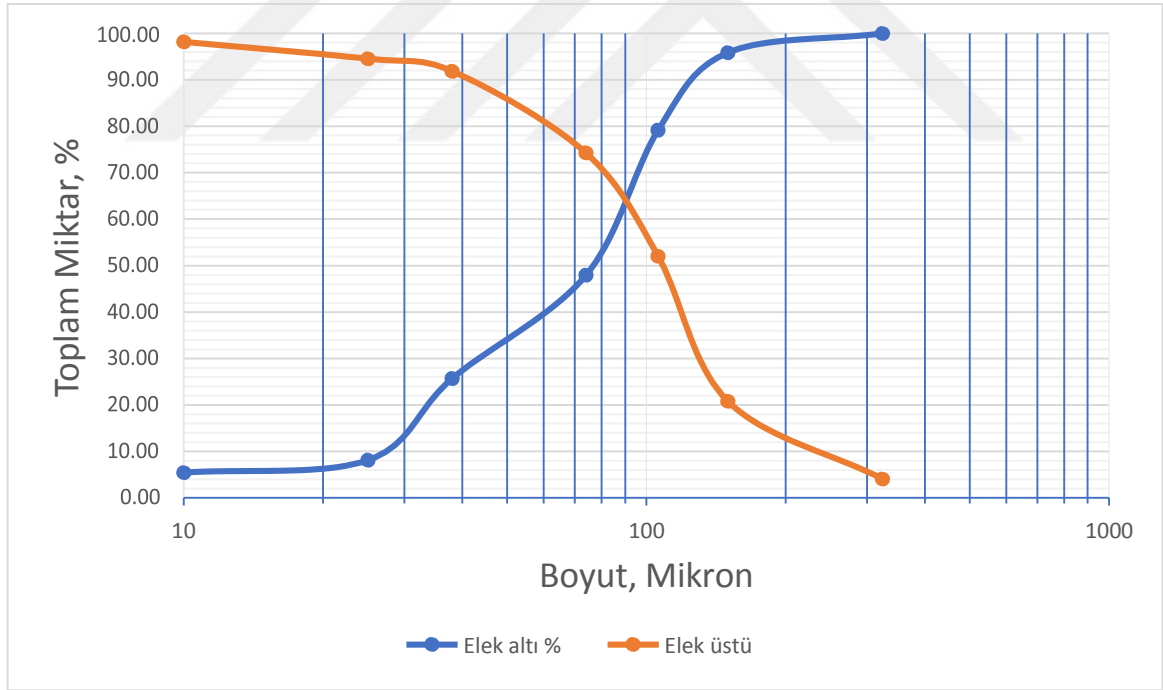
Moritanya bölgesinden alınan örneğimizin deneyler sırasında gerekli durumlarda uygulandığında kullanılmak üzere öğütülebilirlik testleri yapılarak sonuçlar (Şekil 32)’te ayrı ayrı ve (Şekil 33)’te ise toplu olarak grafiklerde gösterilmiştir. Öğütme işlemi kuru olarak seramik bilyalı değirmen içerisinde gerçekleştirilmiştir. Boyut dağılım analizleri ise Malvern Mastersizer lazerli tane boyu analiz cihazı yardımı ile gerçekleştirilmiştir.



Şekil 33. Örneğin orijinal ve farklı öğütme süreleri sonundaki tane boyut dağılımları



Şekil 34. Moritanya Örneğinin Boyut Dağılım Karakteristiği



Şekil 35. Örneğin Toplam Elek Altı ve Elek Üstü Dağılım Karakteristiği

Orijinal örneklerin elek fraksiyonlarının metal analizleri yapılarak elek metal dağılım karakteristikleri ortaya çıkarılmıştır. Tablo 8'de metal içeriğine ve dağılımına bakıldığında Hg, Cu, Au ve Ag'nin tenörlerinin numunenin en ince fraksiyonuna doğru arttığı görülmektedir. En iri boyut aralığında da metal tenörleri de yüksek gözükmemektedir. İnce

boyutlardaki artışın sebebi amalgamlama prosesinin daha verimsiz olmasıdır. İri boyutlarda ise metallerin kapanım veya bağlı şekilde kalmış olmaları beklenmektedir. Hg'deki değişimin benzer bir durum göstermesi, iri boyutta da tenörün yükselmesi iri boyutlarda bağlı tanelerin bulunması ve bu tanelerle ilişkili olarak Hg amalgamlarının oluştuğu düşünülebilir. Diğer taraftan cevher içerisinde mineral şeklinde Hg'nin de bulunması değerlendirilmesi gerekecektir. Altının yaklaşık %58'i 74 µm'nin altındaki fraksiyonlarda bulunmaktadır.

Tablo 8. Örneğin boyut dağılımı sonrası elek-metal dağılım sonuçları.

Boyut, µm		Miktar		Tenör, ppm				Dağılım%			
Üst	Alt	gr	%	Au	Ag	Hg	Cu	Au	Ag	Hg	Cu
500	324	62.7	4.11	15.8	1.2	261	104	4.5	3.8	10.9	5.0
324	150	254.5	16.68	8.7	0.2	106	63	10.0	2.0	18.1	12.3
150	106	477.0	31.27	6.4	0.2	46	54	13.8	3.7	14.5	19.9
106	74	339.2	22.24	9.1	0.5	49	51	13.9	9.1	11.2	13.2
74	38	268.4	17.60	21.2	2.3	113	118	25.7	31.9	20.2	24.2
38	25	40.8	2.68	35.3	3.3	213	187	6.5	7.0	5.8	5.9
25	10	55.4	3.63	90.2	10.7	337	251	22.5	30.9	12.4	10.6
10	0	27.5	1.80	24.8	8.1	375	424	3.1	11.6	6.9	8.9
TOPLAM		1525.6	100	14.5	1.3	98	86	100	100	100	100
BESLEME		1535.0		14.4	1.0	179	365				

Tablo 9. Örneğin boyut dağılımı sonrası kümülatif elek-metal dağılım sonuçları.

Boyut,		Miktar	Elek altı	Σ Elek Altı Tenör, Σ g/t				Toplam Elek Altı, Σ % Miktar			
Üst	Alt	%	Σ%	Au	Ag	Hg	Cu	Au	Ag	Hg	Cu
500	324	4.11	100,00	14.52	1.25	98	86	100.0	100.0	100.0	100.0
324	150	16.68	95,89	14.47	1.26	91	85	95.5	96.2	89.1	95.0
150	106	31.27	79,21	15.68	1.49	88	89	85.5	94.2	71.0	82.7
106	74	22.24	47,94	21.72	2.36	116	112	71.7	90.5	56.5	62.9
74	38	17.60	25,70	32.66	3.97	173	165	57.8	81.4	45.3	49.6
38	25	2.68	8,11	57.54	7.65	305	268	32.1	49.5	25.1	25.4
25	10	3.63	5,43	68.50	9.80	349	308	25.6	42.5	19.3	19.6
10	0	1.80	1,80	24.83	8.06	375	424	3.1	11.6	6.9	8.9
TOPLAM		100.00	-	14.5	1.3	98	86	-	-	-	-

Tablo 9'daki sonuçlar, numunenin ağırlıkça çoğunluğunun iri fraksiyonlarda ($\geq 150 \mu\text{m}$) bulunmasına rağmen, altın, gümüş, cıva ve bakırın büyük kısmının ince tanelerde ($\leq 74 \mu\text{m}$) yoğunlaştığını göstermektedir. Özellikle 25–10 μm fraksiyonunda altın (68,5 g/t) ve cıva (349–375 g/t) tenörleri belirgin şekilde artmıştır. Bu durum, değerli metallerin ince fraksiyonlarda kapanım veya amalgam yapılar içinde bulunması nedeniyle geleneksel kazanım yöntemleriyle geri kazanımın sınırlı kaldığını ve çevresel açıdan risk taşıyan bir atık yapısı ortaya çıktığını göstermektedir.

3.2.1. Yüzdürme –Batırma ile Serbestleşme Analiz Sonuçları

Altın (Au): Bütün fraksiyonlarda altın verimi batan fazda belirgin olarak yüksektir. Özellikle +38 μm (%94,03) fraksiyonunda en yüksek verim gözlenmiştir. Bu durum, altının yüksek yoğunluklu minerallerle (pirit, serbest altın) birlikte ağır fazda toplandığını göstermektedir.

Gümüş (Ag): En yüksek Ag verimi +150 μm batan fazda (%100) elde edilmiştir. Ancak ince fraksiyonlara doğru hem batan hem de yüzen fazda verim düşmektedir. Bu, gümüşün daha çok iri ve orta boy fraksiyonlarda ağır fazda yoğunlaştığını gösterir.

Bakır (Cu): +38 μm fraksiyonunda batan fazda %87,42, +74 μm yüzen fazda ise %75,37 gibi yüksek oranlarda kazanım gözlenmiştir. Bu, Cu içeren minerallerin hem ağır hem hafif fazlarda yer alabildiğini, yaygın kapanım gösterdiğini düşündürmektedir.

Cıva (Hg): Cıva verimi dağılımı daha karmaşıktır. Örneğin, +150 μm 'de batan fazda %70, ancak +25 μm 'de yüzen fazda %82,07 verim gözlenmiştir. Bu durum, cıvanın bazı fraksiyonlarda serbest veya yüzey kaplamalı olarak daha hafif mineral fazlarla taşındığını düşündürmektedir. Cıva, sadece yoğunlukla değil aynı zamanda tanecik yapısı ve kapanım tipiyle de ilişkilidir.

Bu veriler, özellikle altın ve gümüş gibi değerli metallerin orta ve iri fraksiyonlarda ve batan fazlarda yoğunlaştığını göstermektedir. Cıva ise boyut ve faz açısından daha dağınık davranmaktadır. Bu nedenle, ön zenginleştirme işlemlerinde ağır ortam ayırması verimli olabilir, ancak cıva için ek ayırıştırma ve arıtım teknikleri gereklidir.

-74+38 mikron boyut aralığındaki örnekten ağır ortam ayırması ile 563 Au g/t ve 58 g/t Ag ve 1705 Cu g/t içerikli bir ağır ortam konsantresi üretilmektedir. Bu sonuçlar altının önemli bir miktarının konsantre olarak toplanabileceğini göstermektedir.

Tablo 10. -324+150 mikron için Ağır ortam ayırma ürünlerinin analizleri ve oranları

Ağır Ort.	Miktar	Metal Tenör, g/t				Metal Verimi, %			
Ürünleri	%	Au	Ag	Cu	Hg	Au	Ag	Cu	Hg
Ağır Ü.	0.34	644.93	58.06	2057.60	7944.70	32.00	3.92	4.69	18.40
HafifÜ.	99.66	4.69	0.00	143.00	147.80	68.00	0.00	95.31	84.46
Besleme	100.00	6.87	0.20	149.53	174.39	100.00	3.92	100.00	102.86
Kons. O.	293.21	93.83	293.21	13.76	45.56				

Tablo 11. -150+106 mikron için Ağır ortam ayırma ürünlerinin analizleri ve Oranları

Ağır Ort.	Miktar	Metal Tenör, g/t				Metal Verimi, %			
Ürünleri	%	Au	Ag	Cu	Hg	Au	Ag	Cu	Hg
Ağır Ü.	0.62	575.85	72.11	1465.99	8795.92	43.61	8.32	47.26	9.47
HafifÜ.	98.78	4.69	0.28	10.30	529.86	56.39	5.21	52.74	90.53
Besleme	99.40	8.27	5.43	19.42	581.61	100.00	13.5	100.00	100.00
Kons. O.	159.74	69.67	13.28	142.27	15.12				

Tablo 12. -106+74 mikron için Ağır ortam ayırma ürünlerinin analizleri ve Oranları

Ağır Ort.	Miktar	Metal Tenör, g/t				Metal Verimi, %			
Ürünleri	%	Au	Ag	Cu	Hg	Au	Ag	Cu	Hg
Ağır Ü.	0.67	300.00	35.56	683.70	2294.07	23.49	35.7	7.68	38.39
HafifÜ.	98.37	6.67	0.44	56.05	25.12	76.51	64.3	92.32	61.61
Besleme	99.04	8.65	0.67	60.30	40.50	100.00	100	100.00	100.00
Kons. O.	147.57	34.66	52.71	11.34	91.32				

Tablo 13. -74+38 mikron için Ağır ortam ayırma ürünlerinin analizleri ve Oranları

Ağır Ort.	Miktar	Metal Tenör, g/t				Metal Verimi, %			
Ürünleri	%	Au	Ag	Cu	Hg	Au	Ag	Cu	Hg
Ağır Ü.	1.90	563.13	58.13	1705.00	2082.50	65.72	54	45.82	18.05
HafifÜ.	97.37	5.74	0.96	39.41	184.84	34.28	46	54.18	81.95
Besleme	99.27	16.43	2.06	71.34	221.22	100.00	100	100.00	100.00
Kons. O.	52.15	34.27	28.22	23.90	9.41				

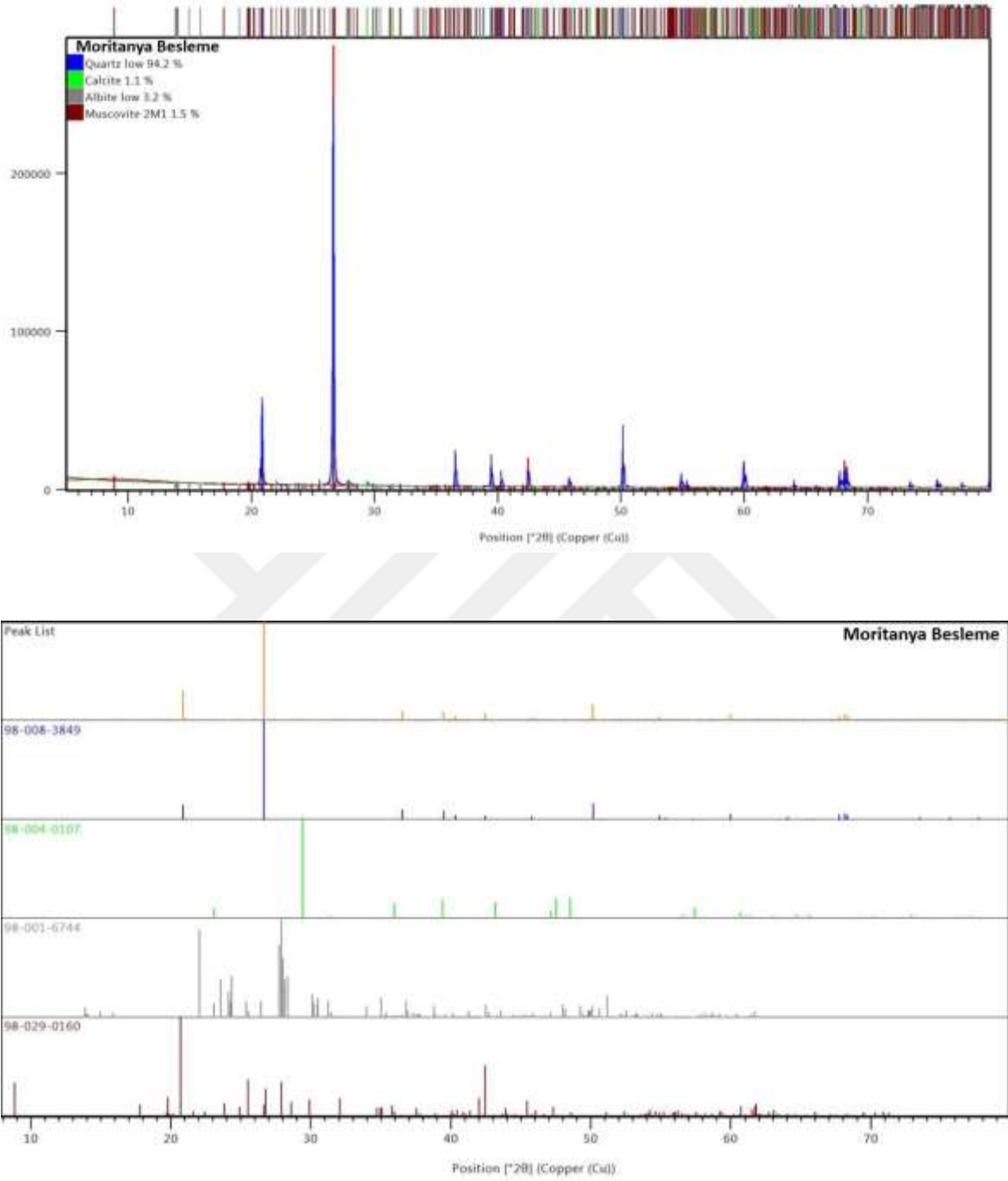
Tablo 14. -38+25 mikron için Ağır ortam ayırma ürünlerinin analizleri ve Oranları

Ağır Ort.	Miktar	Metal Tenör, g/t				Metal Verimi, %			
Ürünleri	%	Au	Ag	Cu	Hg	Au	Ag	Cu	Hg
Ağır Ü.	1.07	2543.8	228.75	2031.25	6048.75	70.67	51	15.98	10.58
HafifÜ.	98.82	11.43	2.36	115.63	553.63	29.33	49	84.02	89.42
Besleme	99.89	38.54	4.78	136.14	612.47	100.00	100	100.00	100.00
Kons. O.	93.38	66.00	47.85	14.92	9.88				

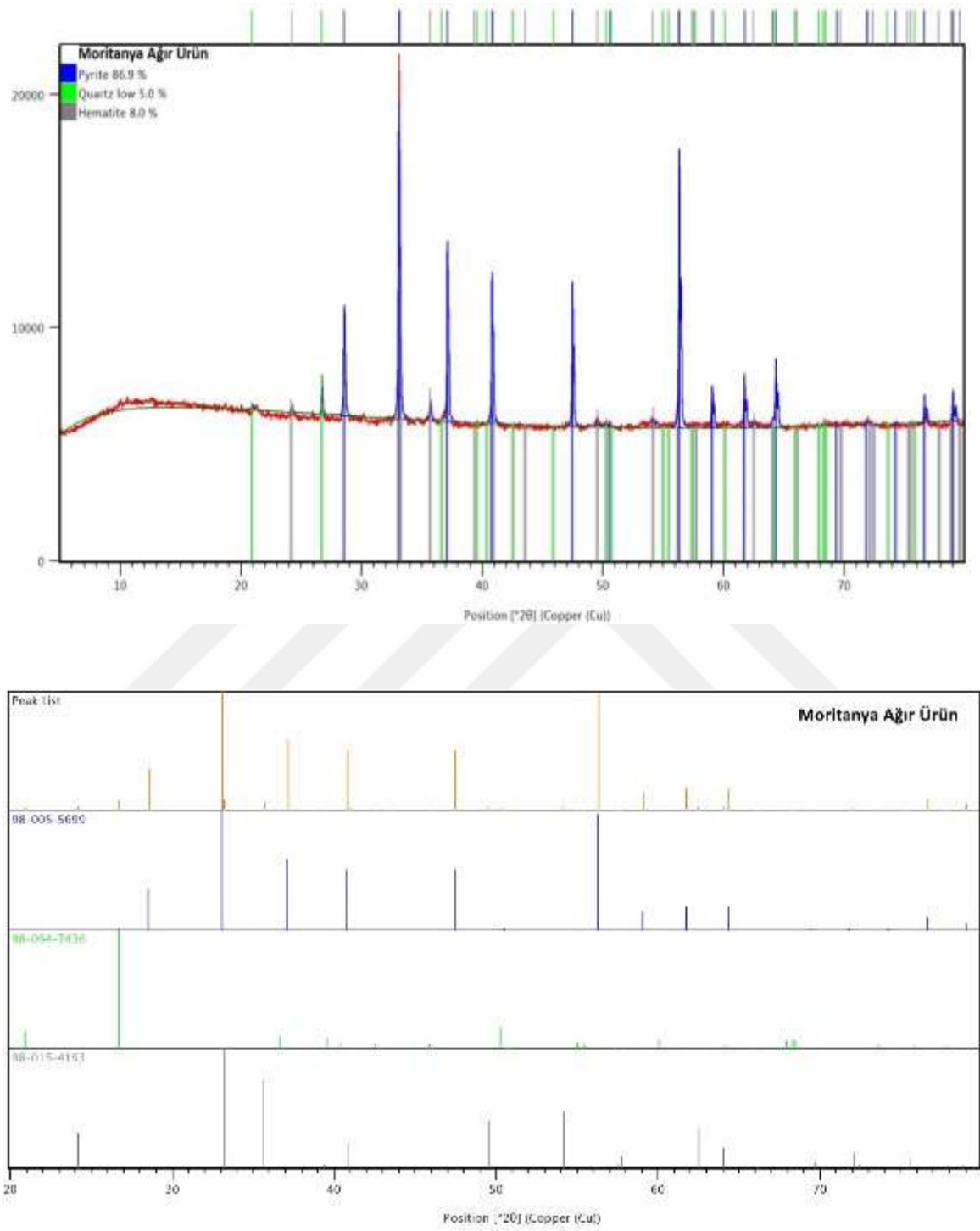
3.3. Mineralojik Bileşim ve XRD Analiz Bulguları

Örneği oluşturan mineralleri ve miktarlarını belirlemek için XRD (X-Ray Difraktometre) ve Rietveld tekniğini kullanılmış olup analize ait bilgiler (Şekil 36) ve (Şekil 37) için de sunulmuştur.

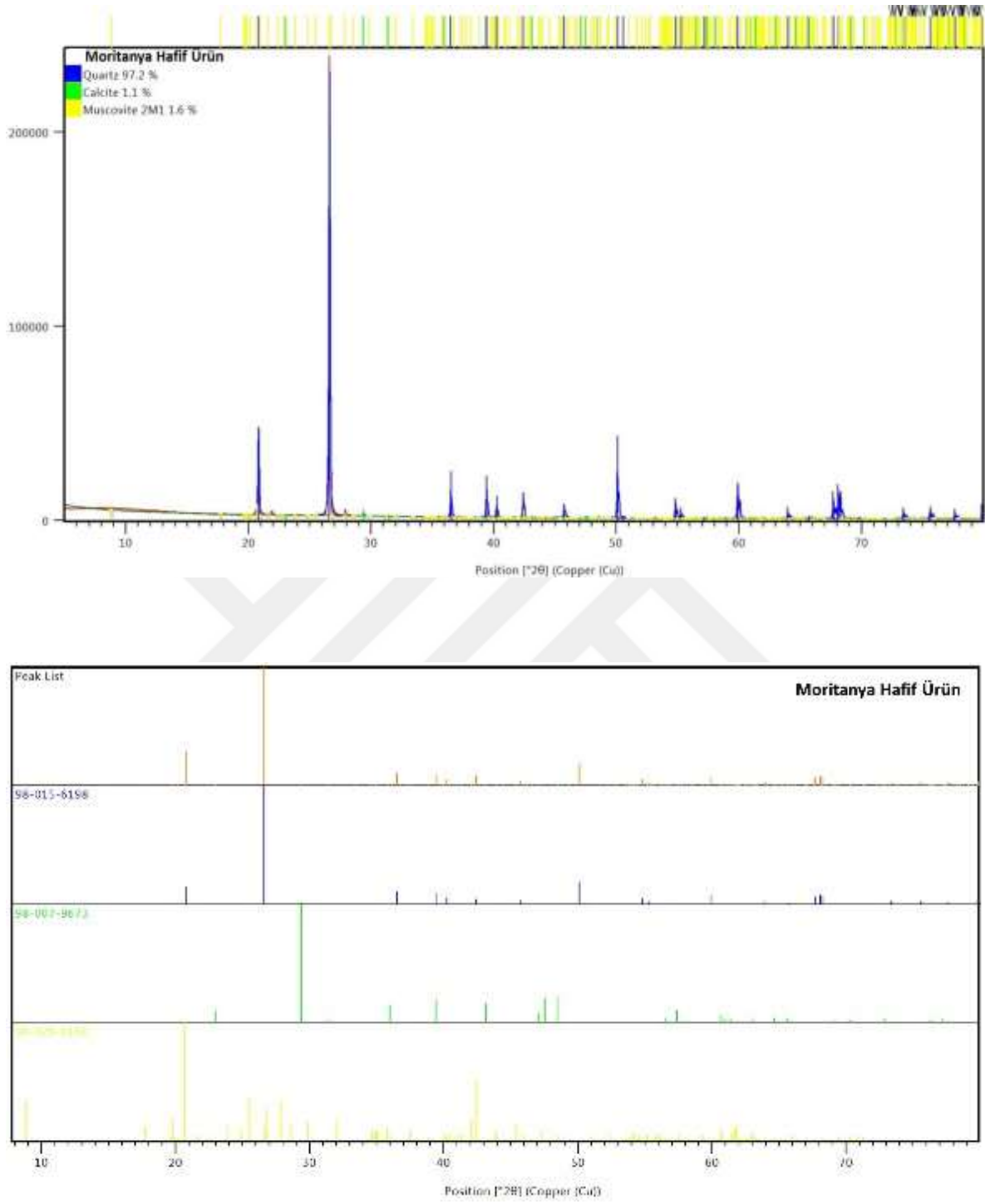
Mineralojik analizlerde, numunedeki ana mineralin %88, 5 ile kuvars olduğunu, az oranlarda da kalsit ve muskovit gibi minerallerinin varlığı tespit edilmiştir. Bu durum yoğunluk ayırmasında ayrılan hafif üründeki kuvars miktarının %97'ye kadar çıkması ile daha iyi görünmektedir. Ağır minerallerin analizi ise örnek içerisinde pirit mineralinin varlığını göstermektedir. Bu yönü ile Moritanya örneğinin Kamerun ile farklı mineralojik yapıya sahip olduğu gözükmemektedir.



Şekil 36. Moritanya cevheri XRD paterni ve mineral içeriklerinin Rietveld analiz sonucu (R expected: 1,696; R profile: 7,979; GoF: 6,595)



Şekil 37. Moritanya cevheri ağır mineral konsantresinin XRD paterni ve mineral içeriklerinin Rietveld analiz sonucu (R expected: 1,258; R profile: 2,049; GoF: 2,089).



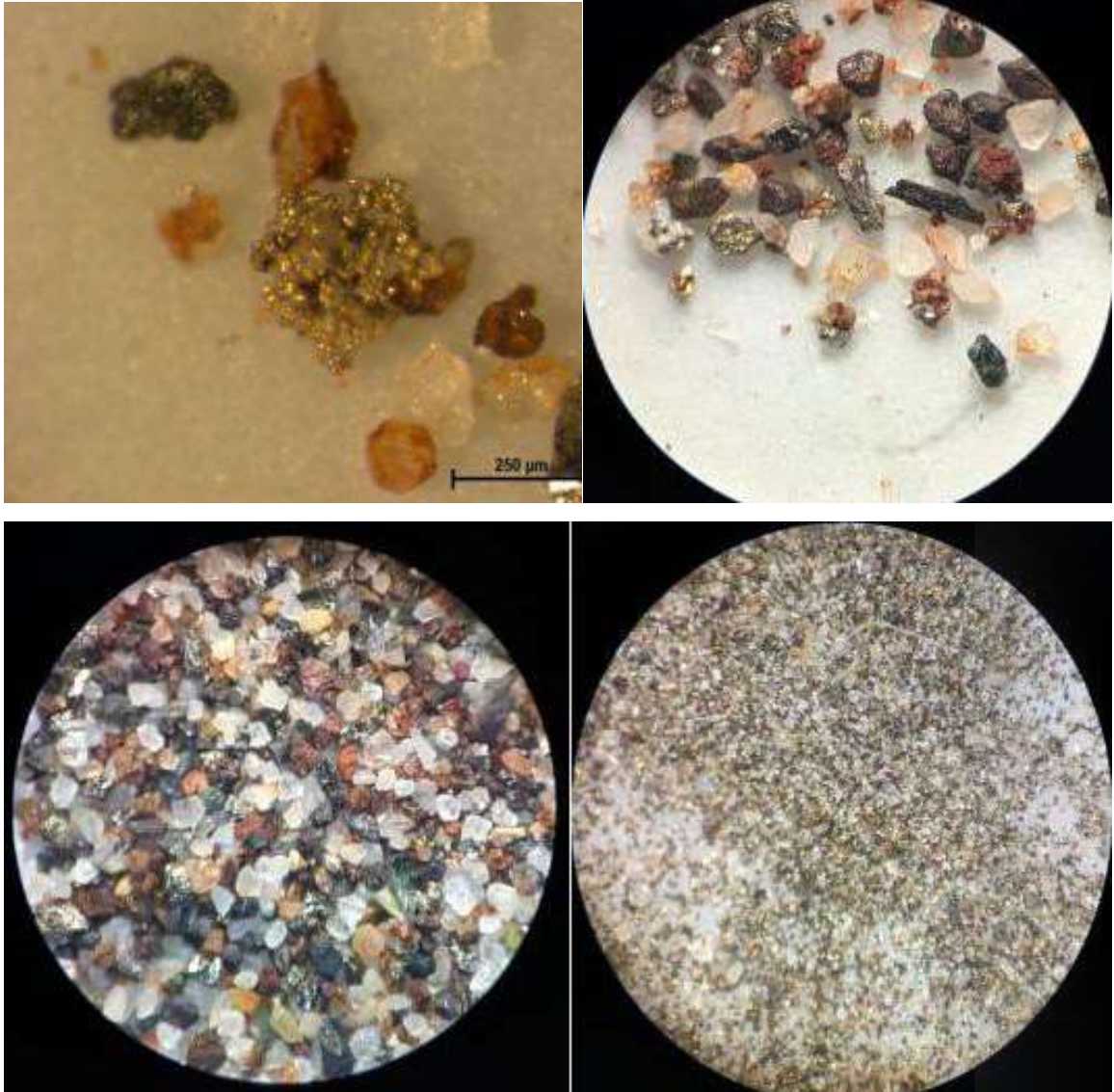
Şekil 38. Moritanya cevheri hafif ürün XRD paterni ve mineral içeriklerinin Rietveld analiz sonucu (R expected: 1,821; R profile: 10,693; GoF: 7,781)

3.4. Mikroskopik Mineralojik İncelemeler

3.4.1. Stereo Mikroskop İncelemesi

Kuvars (SiO_2), pirit (FeS_2), hematit (Fe_2O_3), manyetit (Fe_3O_4), ilmenit (FeTiO_3) gibi ana minerallerin yanı sıra, altın ve cıva içeren amalgam yapılar gözlenmiştir (Şekil 39)

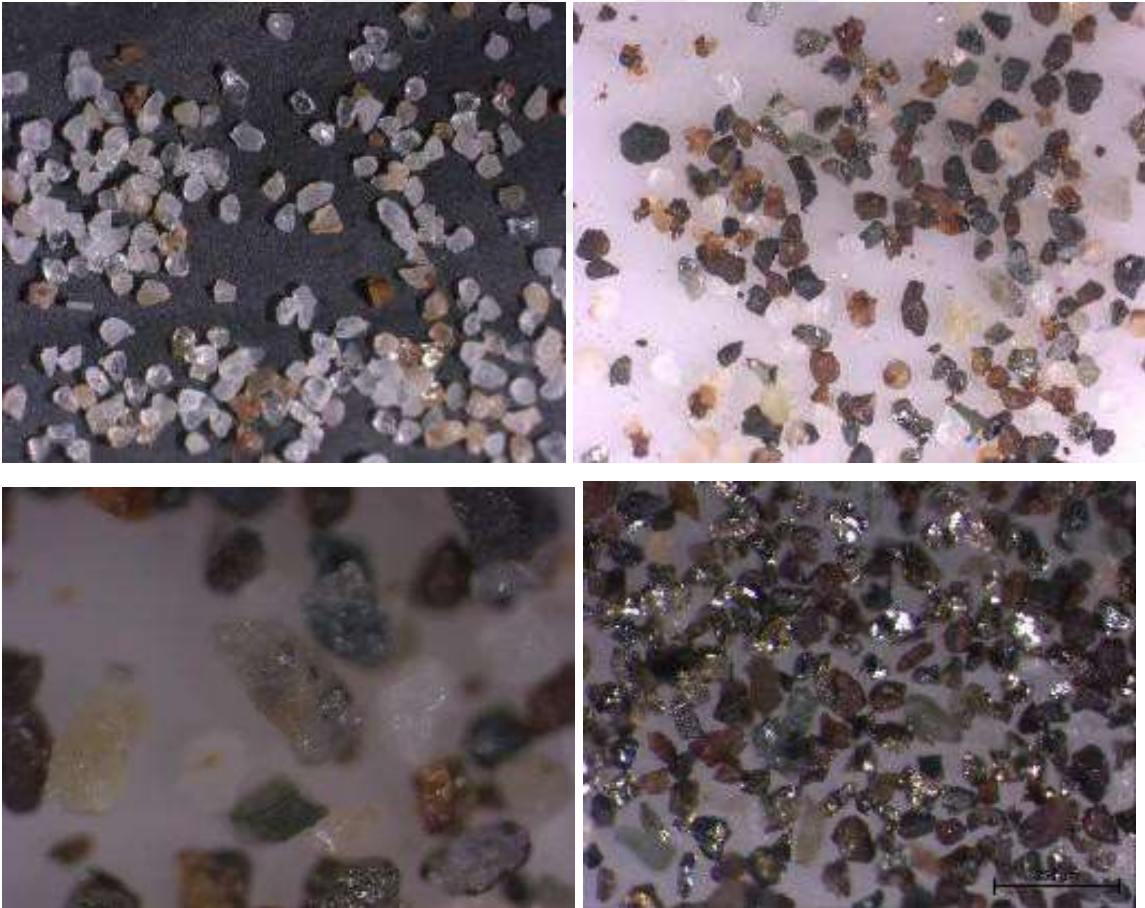
Bu incelemeler, XRD ve SEM-EDS analizleri ile desteklenmiş ve elde edilen mineral fazlarının tanımlanması doğrulanmıştır.



Şekil 39. Farklı tane boyutlarına ait numunelerin çeşitli büyütmeelerde alınmış görüntüleri

Moritanya bölgesi örneğinden yapılan elek analizi fraksiyonlarından -74+38 mikron boyut aralığında ayrılan malzemeye ağır ortam ayırması yapılarak elde edilen ağır mineral konsantresi ve hafif mineral ürünleri üzerine mineralojik incelemeler yapılmıştır. Öncelikle binoküler mikroskop yardımı ile mineral tanelerinin tanımlamaları yapılmıştır. İnceleme sırasında alınan görüntülerden örnekler Şekil 40'de görülmektedir. İncelemeler sırasında XRD analizlerine benzer olarak kuvars ve pirit tanelerinin varlığı görülmektedir. Manyetit ve hematit gibi diğer demir mineralleri ve Ti ve Mn mineralleri de tanımlanmıştır. Amalgam yapılarının kesin tanımlama için SEM-EDS analizleri yapılması gerekmiştir.

Özellikle ağır fazda bulunan amalgam tanelerinin varlığı, cıva kontaminasyonunun hem fiziksel kapanım hem de yüzey adsorpsiyonu şeklinde kalıcı olabileceğini göstermektedir.



Şekil 40. Moritanya örneği ağır ortamda ayrılan ürünlerin görünümü (Hafif kuvars ve ağır piritler)

3.4.2. Polarizan Mikroskop İncelemesi

Numunelerdeki bazı mineral fazların optik özelliklerini değerlendirmek amacıyla floresans mikroskop incelemeleri yapılmıştır. UV ışığı altında alınan görüntülerde, özellikle zinnover (HgS) kırmızı, kuvars (SiO_2) mavimsi beyaz, pirit (FeS_2) sarımsı ve hematit (Fe_2O_3) koyu tonlarda floresans tepkileri vermiştir (Şekil 41) ve (Şekil 42).

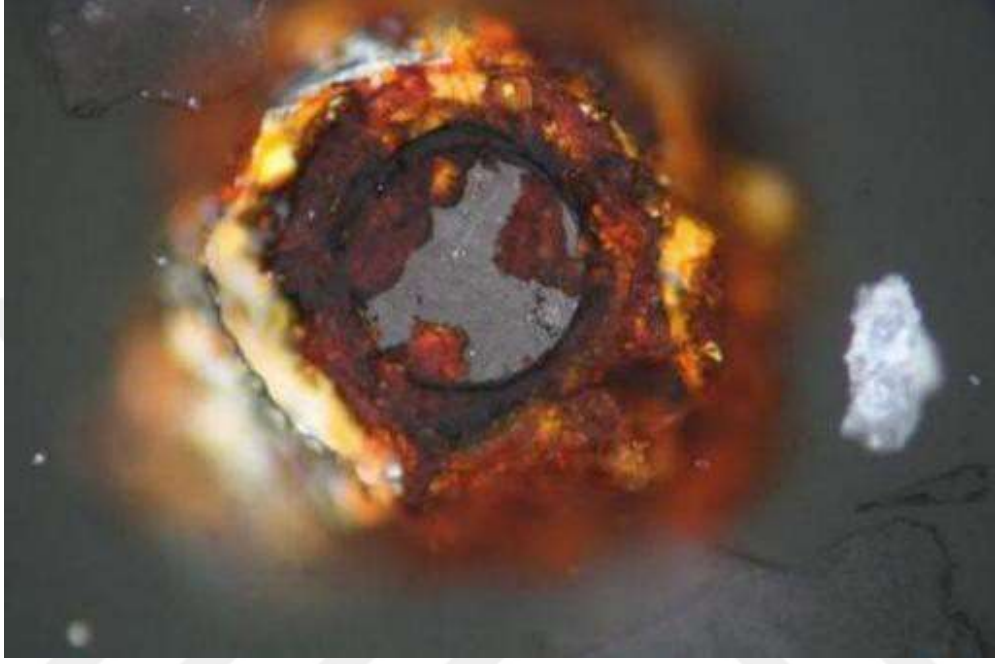


Şekil 41. Farklı tane boyutlarına ait numunelerin polarizan ışığı altındaki genel görünümü



Şekil 42. Farklı tane boyutlarına ait numunelerin polarizan ışığı altındaki genel görünümü

Ayrıca amalgam yapılarının çevresinde Hg'ye bağlı yüzey yansımaları gözlemlenmiştir. Bu bulgular, SEM-EDS ve XRD analizlerini görsel olarak desteklemiştir (Şekil 43) ve (Şekil 44).



Şekil 43. Farklı tane boyutlarına ait numunelerin polarizan ışığı altındaki genel görünümü



Şekil 44. Farklı tane boyutlarına ait numunelerin polarizan ışığı altındaki genel görünümü

3.4.3. SEM Gözlemleri ve EDS Bulguları

SEM görüntülerinde; kuvars (SiO_2), pirit (FeS_2), hematit (Fe_2O_3), manyetit (Fe_3O_4), ilmenit (FeTiO_3) gibi yaygın mineral fazlara ait morfolojik özellikler detaylı biçimde incelenmiştir. Bazı minerallerin yüzeylerinde çatlaklar, yüzey pürüzlülükleri ve metalik parlaklık gösteren kapanımlar tespit edilmiştir. Bu bölgelerde yapılan EDS analizleri, aşağıdaki başlıca elementlerin varlığını ortaya koymuştur:

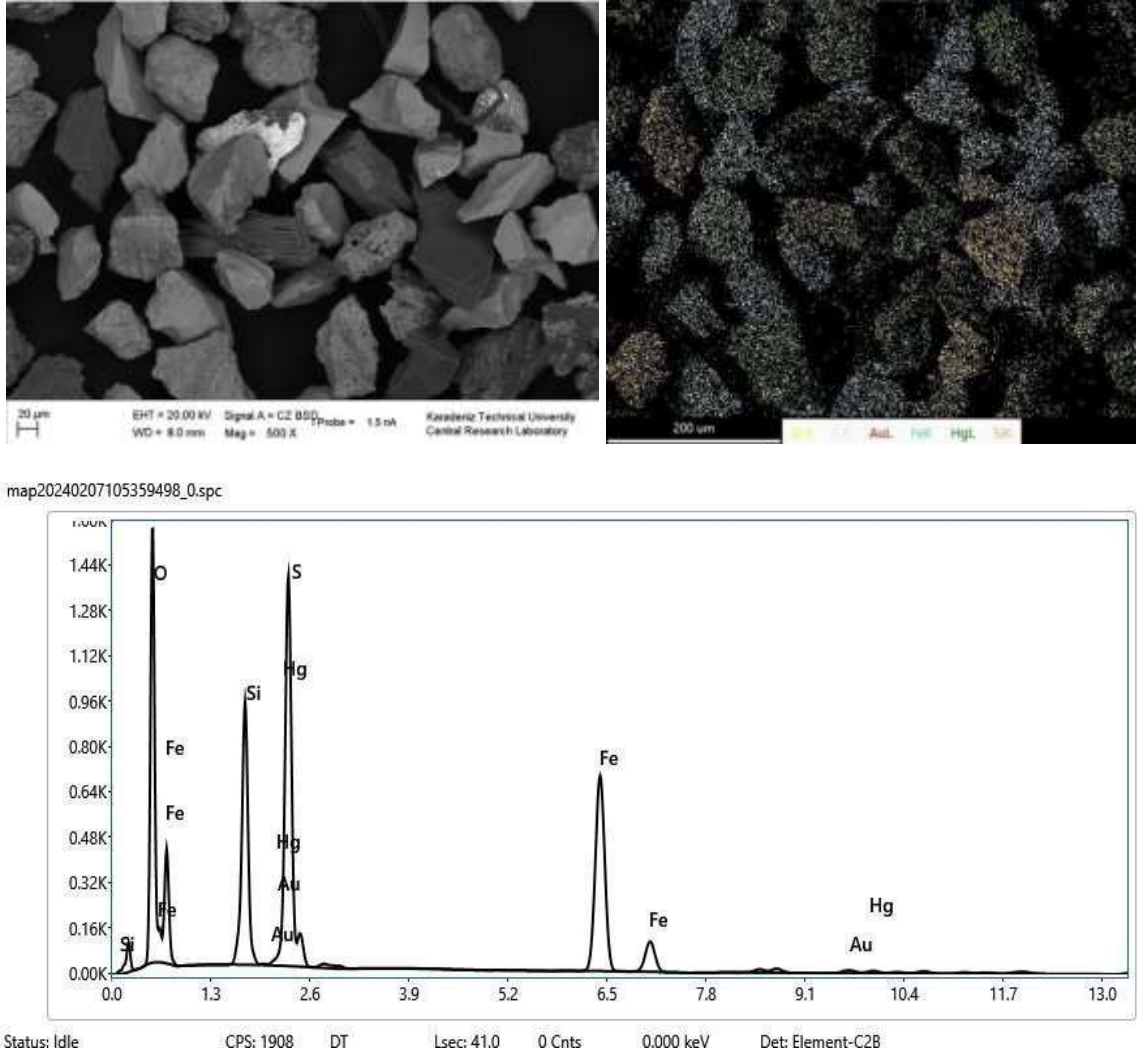
Altın (Au) ve cıva (Hg) birlikte gözlemlenmiş, bu yapıların amalgam fazları olduğu doğrulanmıştır. Bazı örneklerde yüzeyde Pb, As ve S elementlerinin birlikte bulunduğu, bu yapıların muhtemel sülfürlü bileşiklere işaret ettiği değerlendirilmiştir. EDS ile elde edilen elementel bulgular, daha önce yapılan XRF ve XRD analizleriyle uyumlu bulunmuştur.

Belirlenen SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , gibi oksitler SEM analizleri ile görsel olarak desteklenmiştir.

Moritanya örneğinin ağır sıvı ayırım testi sonrasında ayrılan ağır mineral konsantresinden alınan taneler SEM ile görüntülenerek EDS analizi ile incelenmiştir. SEM incelemesinde elektron geri saçınım modunda minerallerin kendilerini oluşturan elementlerin atom numaralarına bağlı olarak gri renk ölçeğindeki görünüm ve parlaklık farklılığından faydalanılarak hedef mineralleri tespit edilmeye çalışılmıştır. Sonrasında haritalamalı EDS analizleri yapılarak incelemeler gerçekleştirilmiştir (Şekil 45Şekil 46Şekil 47).

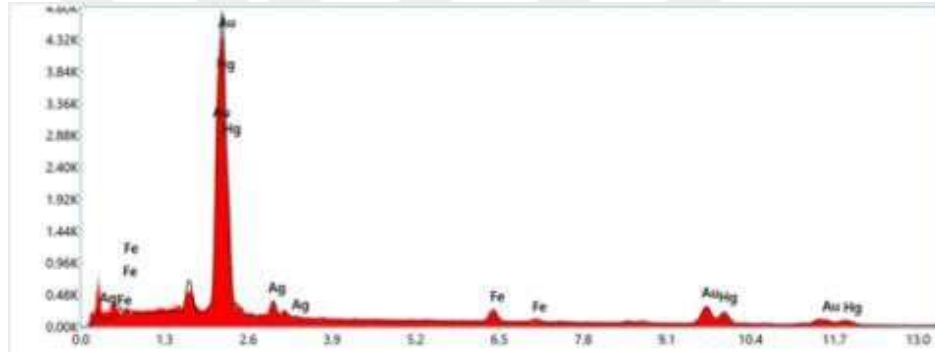
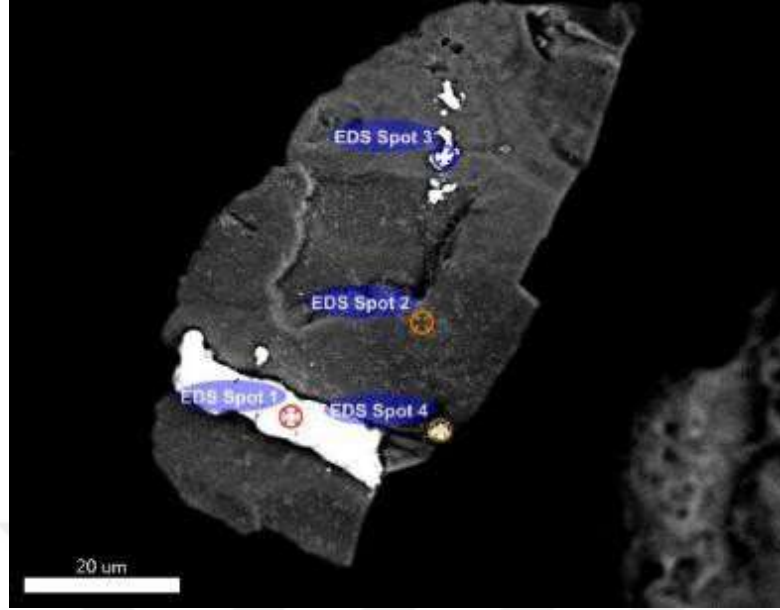
Yapılan çalışmalarda ağır ürün olarak ayrılan tanelerin çoğunlukla pirit içeriğinde (Fe-S) ve Fe-oksit (Fe-O) içerikli tanelerin varlığı görülebilmektedir (Şekil 48). İncelemeler taneler karbon bant üzerine yerleştirildikten sonra vakum odasına alınarak tane yüzeylerinden kaplamasız olarak gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışmalarda tamamen veya kısmen Au-Ag ve Hg içeren tanelerin tespit edilmesi amaçlanmış ancak başarıya ulaşılamamıştır. Bunun birkaç nedeni olabileceği düşünülmektedir:

Bu çalışmada uygulanan inceleme tekniğinde, numunelerin yüzeyinde iletkenlik sağlamak için genellikle kullanılan karbon veya altın kaplama yapılmamıştır. Bu durum, elektron mikroskobisi ve EDS analizlerinde yüzey yüklenmesine yol açarak hem görüntü kalitesini hem de analiz hassasiyetini sınırlamış olabilir. Gelecek çalışmalarda numunelerin parlatılmış kesitler halinde hazırlanması ve kaplama yöntemlerinin uygulanması, incelemelerin güvenilirliğini artıracaktır.

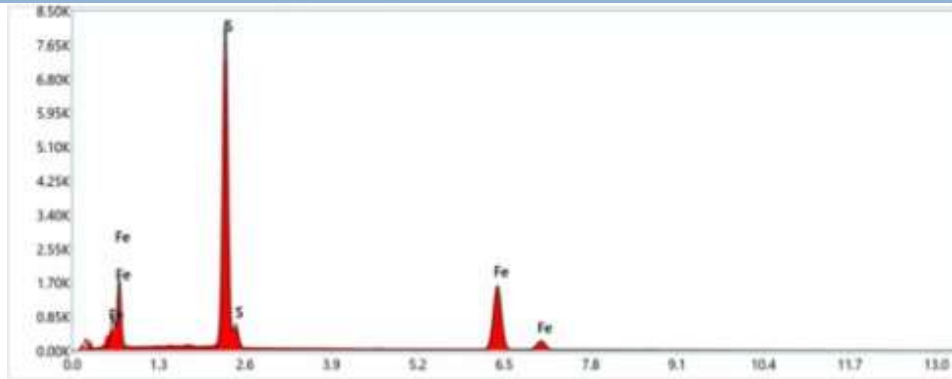


Şekil 45. Moritanya örneği ağır ürün konsantresinin SEM inceleme sonuçları

Ayrıca, geniş alanlardan alınan spektrumlar yerine tek taneler üzerinde noktasal analizlerin yapılması daha doğru mineral tanımları sağlayacaktır. Bu yöntem, altın, gümüş veya cıva gibi değerli metallerin kapanım ve amalgam fazlarındaki dağılımını daha net ortaya koyacak, aynı zamanda farklı mineraller arasındaki ilişkilerin daha ayrıntılı biçimde değerlendirilmesine imkân tanıyacaktır. Böylece atıkların daha güvenilir mineralojik karakterizasyonu mümkün hale gelecektir.

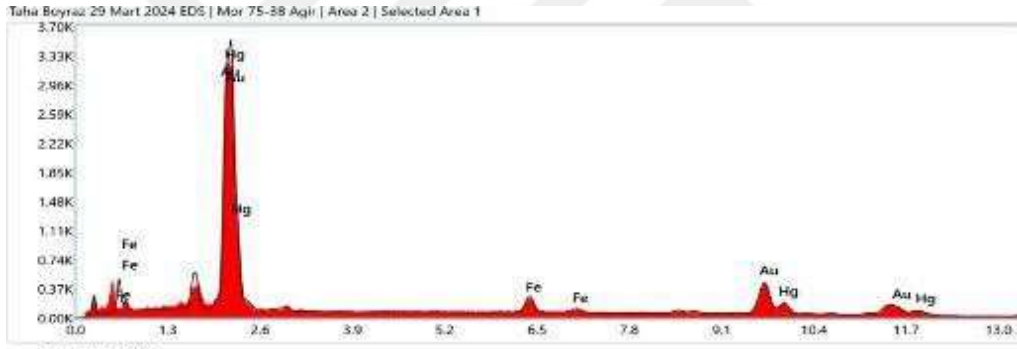
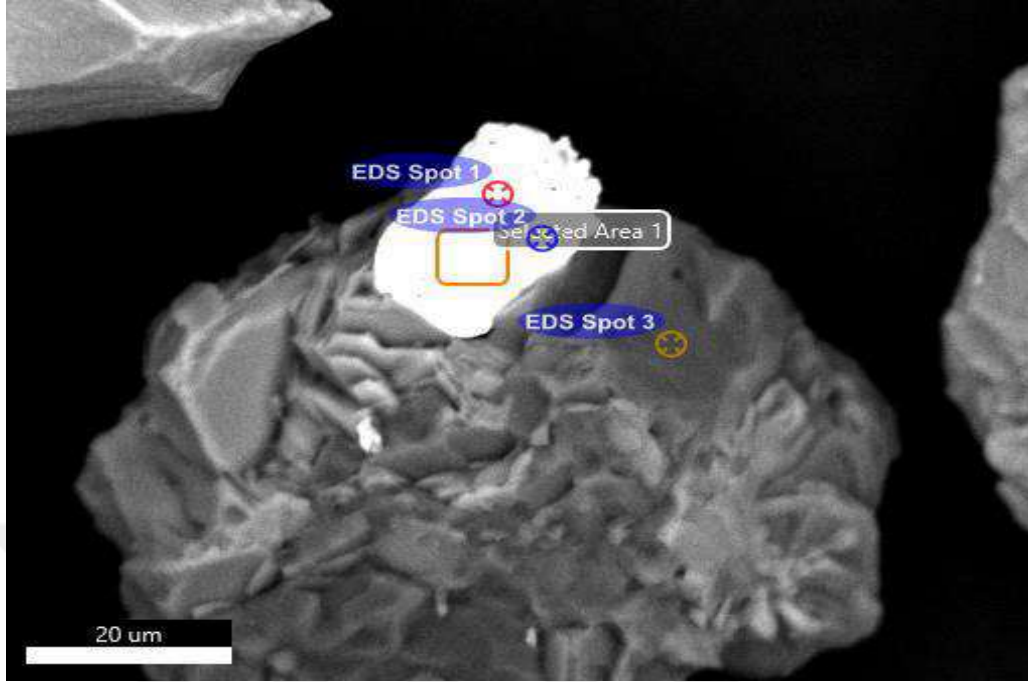


Element	Weight %	Atomic %	Net Int.	Error %	R	A	F
FeK	4.35	13.27	86.56	10.74	0.7489	0.8390	1.1408
AgL	6.54	10.31	79.25	20.87	0.6932	0.4339	1.0053
AuL	50.79	43.89	160.61	12.89	0.8693	0.9515	1.0488
HgL	38.32	32.52	107.47	14.66	0.8794	0.9540	1.0396

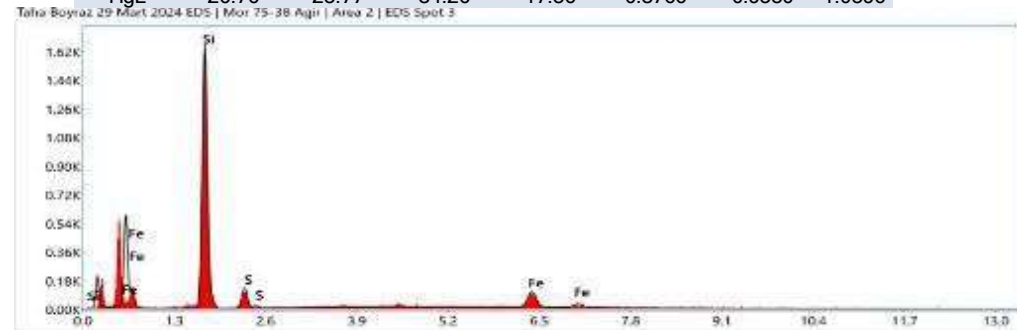


Element	Weight %	Atomic %	Net Int.	Error %	R	A	F
S K	55.66	68.62	2579.03	4.07	0.8851	0.7321	1.0095
FeK	44.34	31.38	770.71	2.88	0.9272	0.9449	1.0312

Şekil 46. Ağır ürün içerisindeki Au ve pirit tanesinin görünümü ve EDS analizi

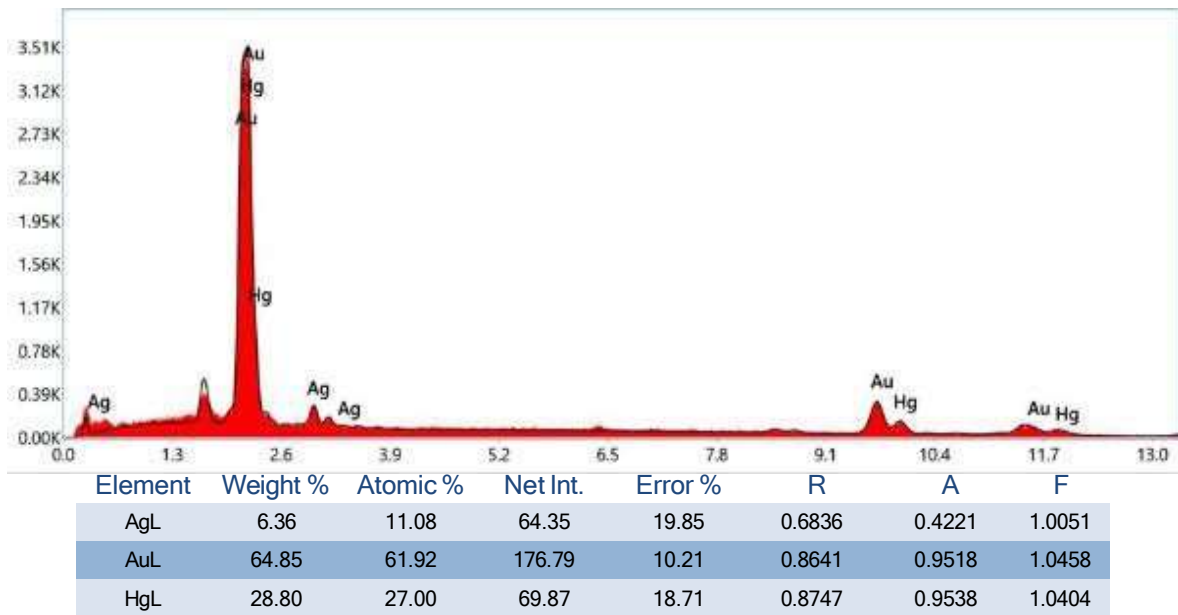
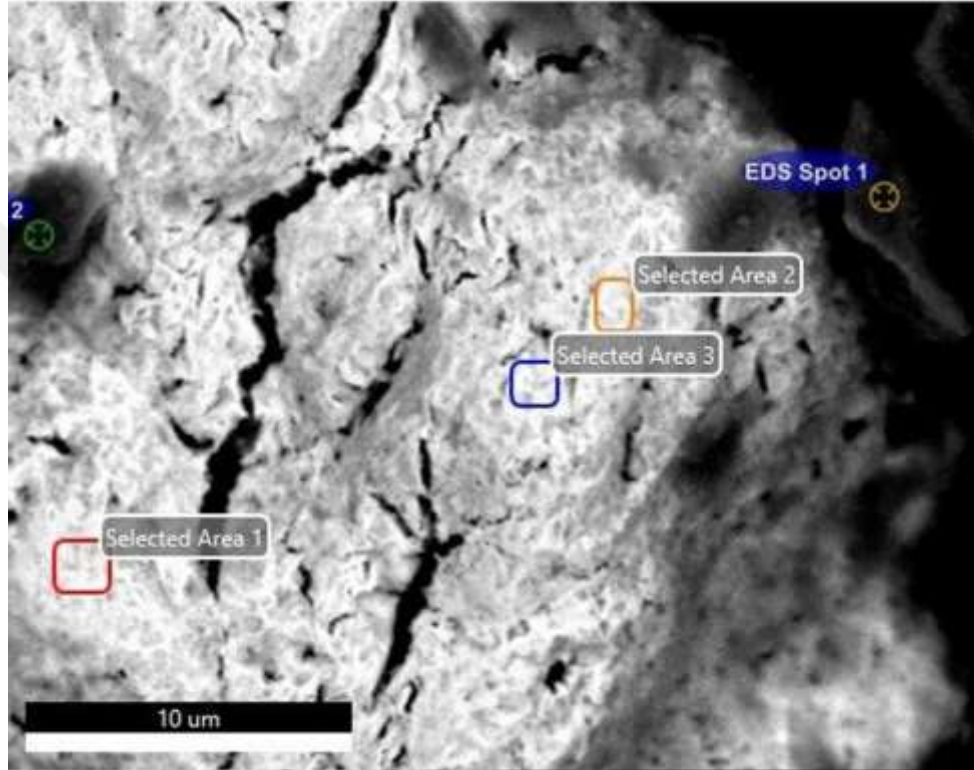


Element	Weight %	Atomic %	Net Int.	Error %	R	A	F
FeK	4.38	13.96	98.25	9.79	0.7436	0.8394	1.1498
AuL	68.86	62.28	243.44	9.53	0.8663	0.9511	1.0441
HgL	26.76	23.77	84.26	17.36	0.8766	0.9530	1.0396



Element	Weight %	Atomic %	Net Int.	Error %	R	A	F
SiK	67.31	76.66	473.06	5.20	0.8983	0.6658	1.0051
S K	10.86	10.84	40.03	10.28	0.9067	0.4823	1.0071
FeK	21.83	12.51	46.42	8.36	0.9432	0.9507	1.0396

Şekil 47. -75+38 μm ağır ürün içerisindeki Au ve pirit tanesinin görünümü ve EDS analizi

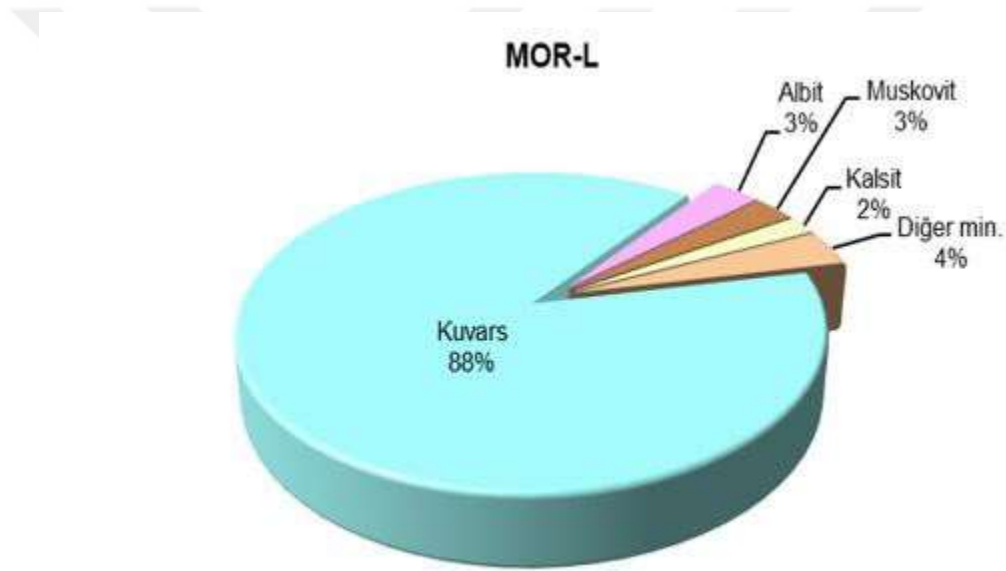


Şekil 48. -75+38 µm ağır ürün içerisindeki Au tanesinin EDS analizi

3.4.4. MLA Analizleri

“MOR-L” işaretli numunede kuvarsın baskın olduğu; daha az oranlarda muskovit, albit, kalsit; eser oranlarda da diğer minerallerin bulunduğu görülmektedir (Şekil 49). Modal mineralojik bileşim grafikleri % ağırlıkça verilmiştir. Sadeleştirmek için ağırlıkça %1 altındaki mineraller “Diğer mineraller” adı altında toplanmıştır.

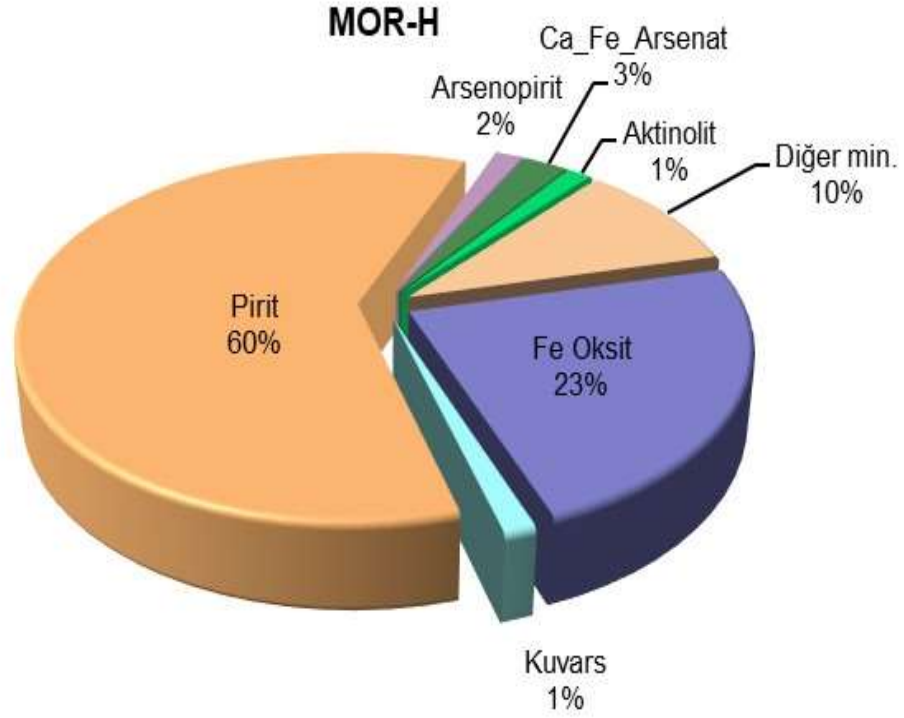
“MOR-H” işaretli numunede piritin baskın olduğu; daha az oranlarda Fe oksit, Ca_Fe_arsenat, arsenopirit, aktinolit, kuvars; eser oranlarda da diğer minerallerin bulunduğu görülmektedir (Şekil 50).



Şekil 49. Moritanya ağır mineral konsantresinin mineralojik kompozisyonu

Moritanya atığından ağır ürün olarak ayrılan üründen hazırlanan kesitlerde detay incelemeler yapılarak atıkta bulunan altın, gümüş ve cıva amalgam yapılarının bulunuş şekilleri aydınlatılmaya çalışılmıştır. Kamerun atığından alınan görüntülere ait resimler Şekil 51 ve Şekil 59’da verilmiştir.

Ayrıca, gözlenen minerallere ait EDS spektrumları kullanılarak kimyasal içerikler ortaya konulmuş olup, bu sonuçlar Şekil 49’de verilmiştir. Bu analizler sayesinde özellikle altın ve gümüşün cıva ile oluşturduğu amalgam fazlarının kompozisyonları netleştirilmiş, ayrıca atıkların çevresel açıdan potansiyel risk taşıyan bileşenleri daha iyi anlaşılmıştır.

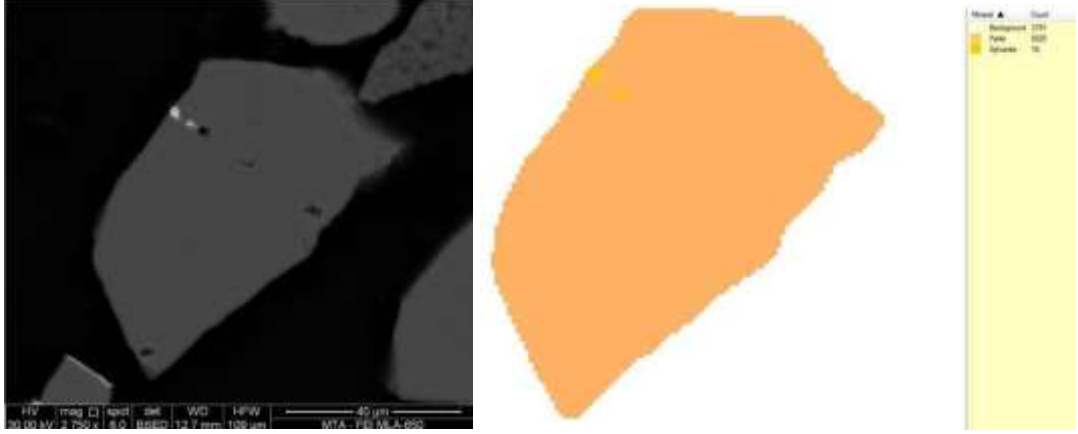


Şekil 50. Moritanya ağır mineral konsantresinin mineralojik kompozisyonu.

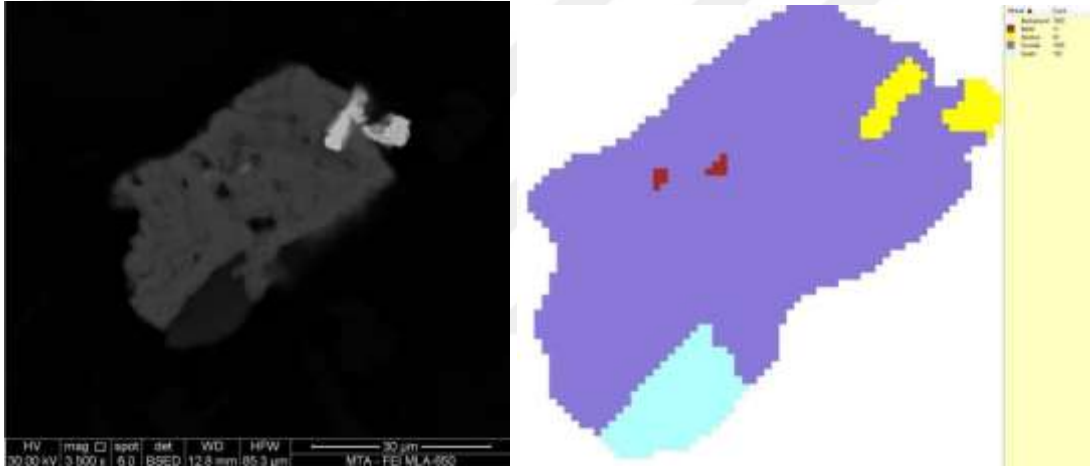
Yapılan incelemelerde, Moritanya atığının içerisinde genellikle pirit mineral tanelerine bağlı olarak elektrik ve amalgam tanelerinin bulunduğu gözlemlenmiştir. Daha az miktarda ise pirit ve Fe-oksit minerallerine bağlı silvanit taneleri belirlenmiştir. Bu sonuçlar, Moritanya atık malzemesinin tam bir oksidasyon sürecinden geçmediğini, dolayısıyla piritlerin henüz Fe-oksit minerallerine tamamen dönüşmediğini göstermektedir.

Muhtemelen pirit tanelerine bağlı veya serbest halde bulunan elektrik şeklindeki altın taneleri, süreçte sonradan dışarıdan katılan cıva ile etkileşerek amalgam fazlarını

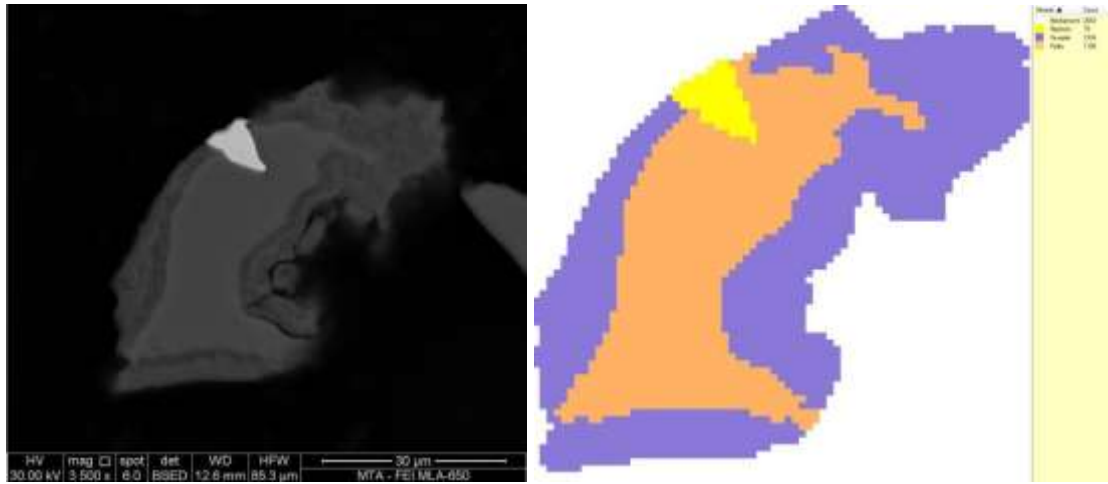
oluşturmuştur. Diğer taraftan, örnekler içerisinde tespit edilen Silvanit (Ag,Au)Te₂ mineralinin varlığı da dikkat çekicidir. Bu mineralin özellikle siyanürlü liç gibi çözündürme işlemlerinde verim kayıplarına yol açabilecek potansiyel bir faktör olabileceği değerlendirilmektedir.



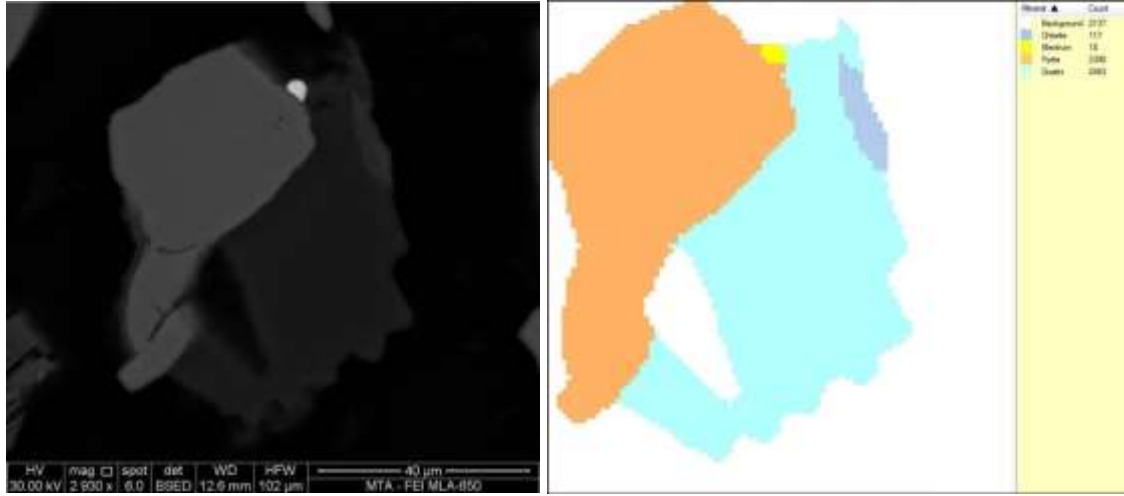
Şekil 51. Pirit ile kenetli silvanit mineraline ait (A) SEM-BSE ve (B) MLA görüntüsü.



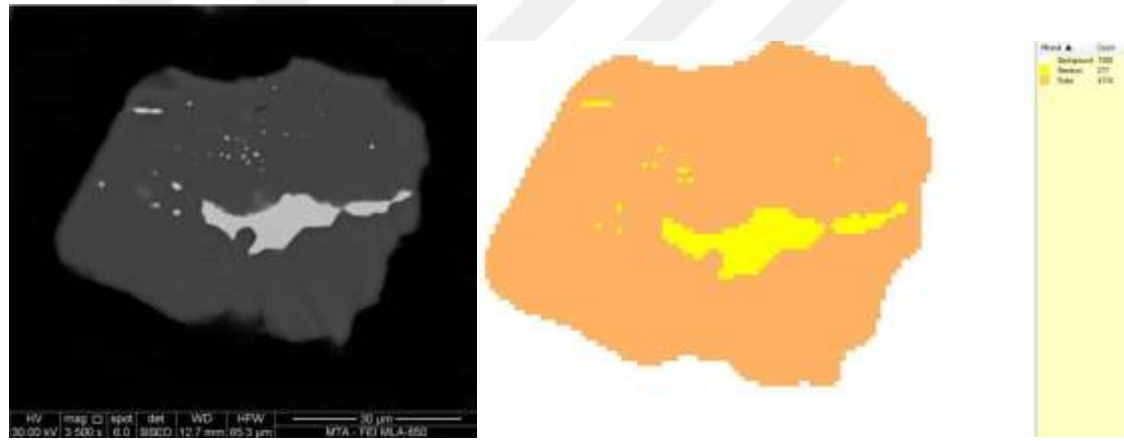
Şekil 52. Fe-oksit ile kenetli elektruma ait (A) SEM-BSE ve (B) MLA görüntüsü.



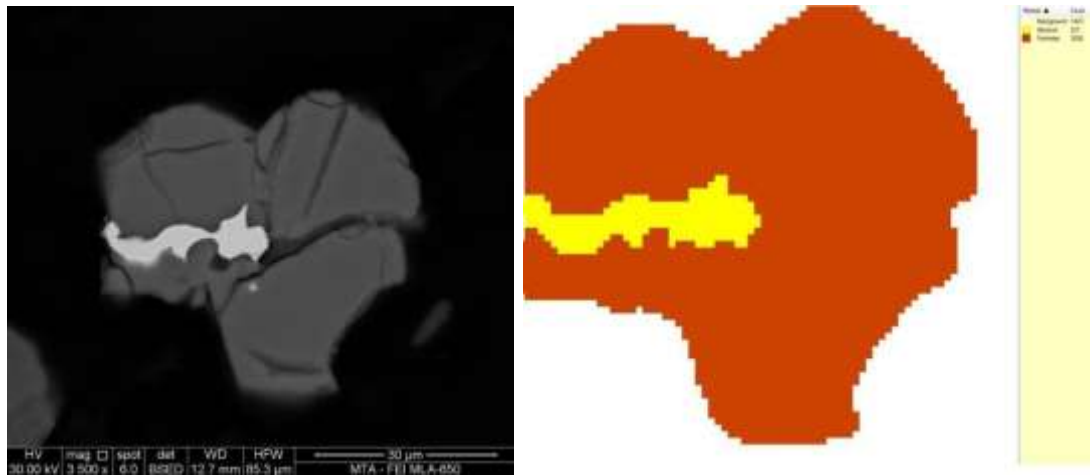
Şekil 53. Pirit ile kenetli elektrum mineraline ait (A) SEM-BSE ve (B) MLA görüntüsü.



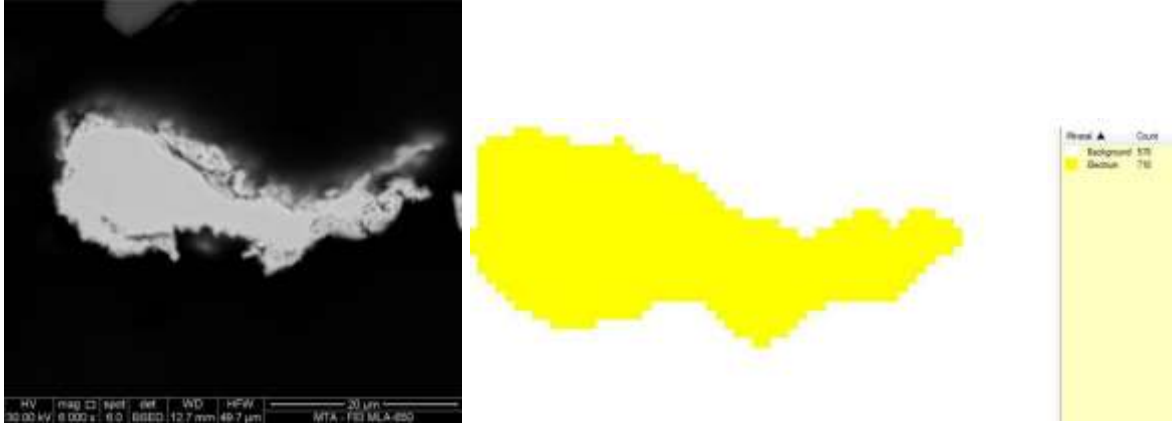
Şekil 54. Pirit ile kenetli elektrik mineraline ait (A) SEM-BSE ve (B) MLA görüntüsü.



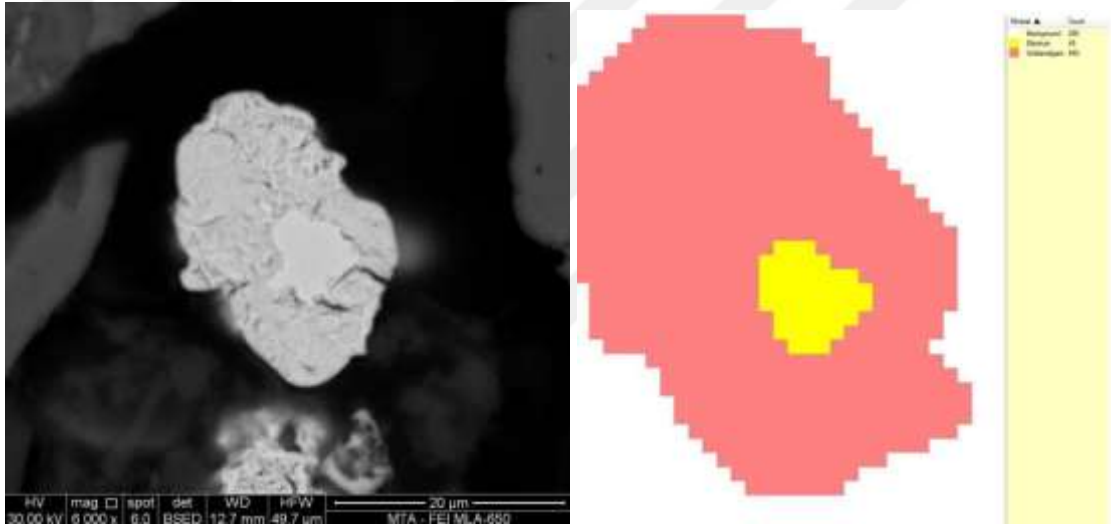
Şekil 55. Pirit ile kenetli elektrik mineraline ait (A) SEM-BSE ve (B) MLA görüntüsü.



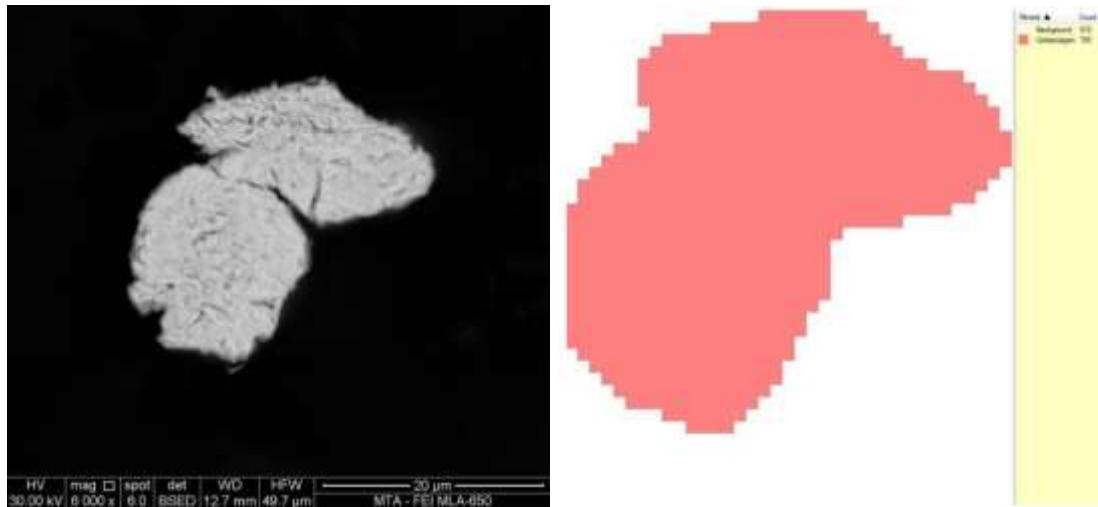
Şekil 56. Pirit ile kenetli elektrik mineraline ait (A) SEM-BSE ve (B) MLA görüntüsü.



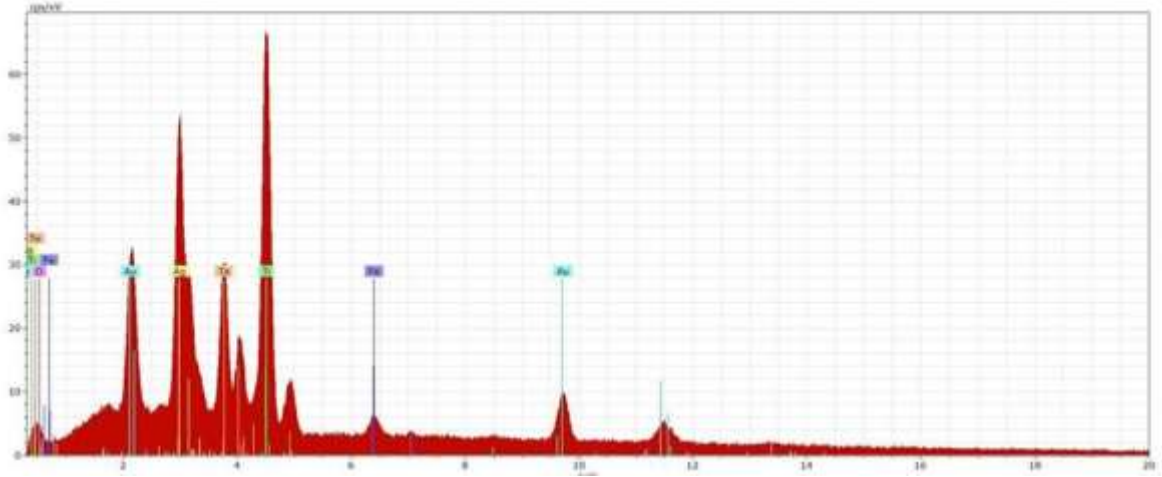
Şekil 57. Serbest elektron tanesine ait (A) SEM-BSE ve (B) MLA görüntüsü.



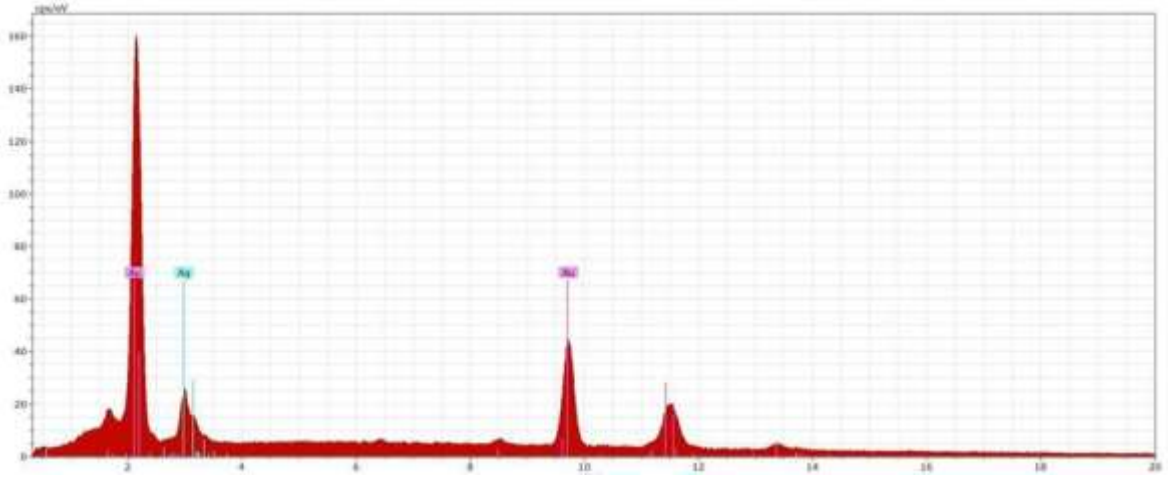
Şekil 58. Amalgam içinde Elektron tanesine ait (A) SEM-BSE ve (B) MLA görüntüsü.



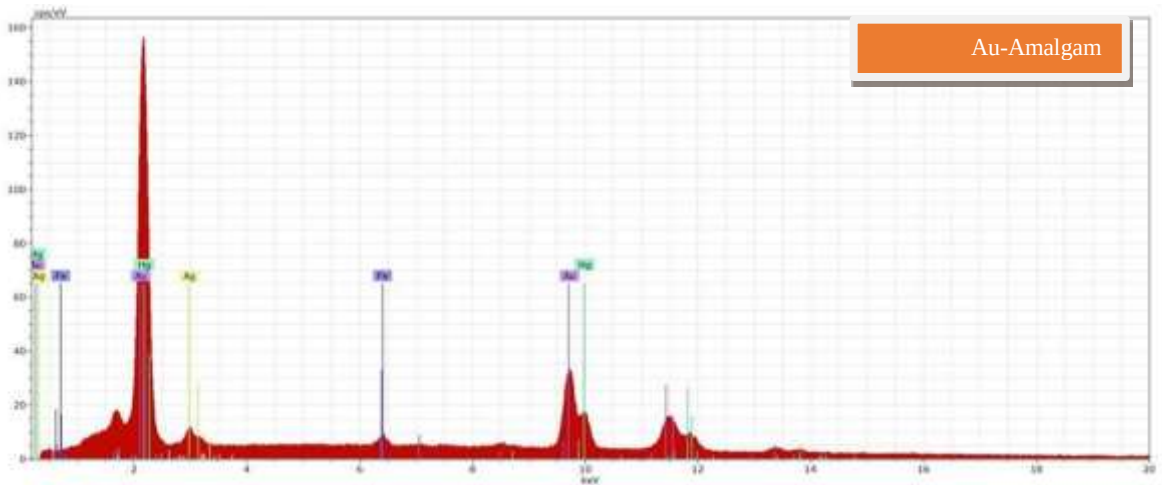
Şekil 59. Au-Amalgam tanesine ait (A) SEM-BSE ve (B) MLA görüntüsü.



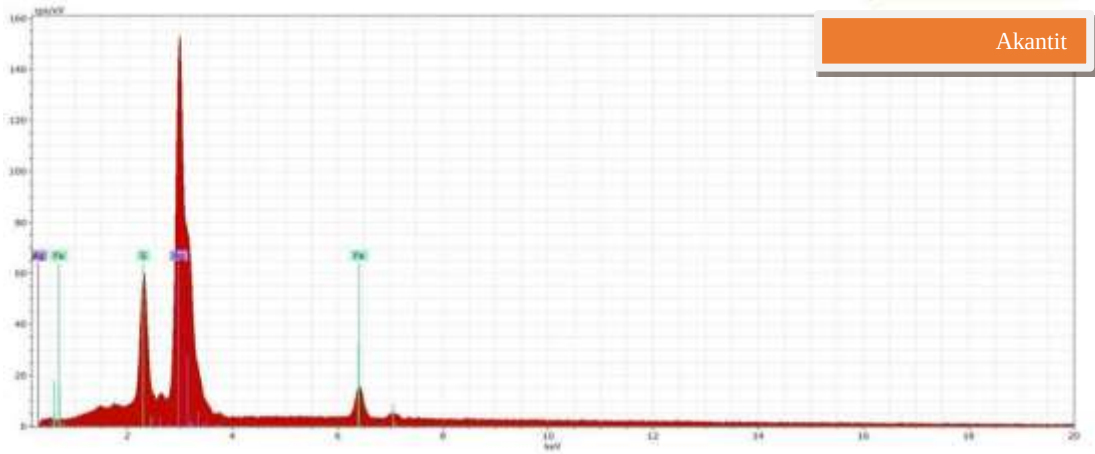
Şekil 60. Silvanit tanelerinden alınan EDS Spektrumları



Şekil 61. Elektrum tanelerinden alınan EDS Spektrumları



Şekil 62. Amalgam tanelerinden alınan EDS Spektrumları



Şekil 63. Akantit tanelerinden alınan EDS Spektrumları

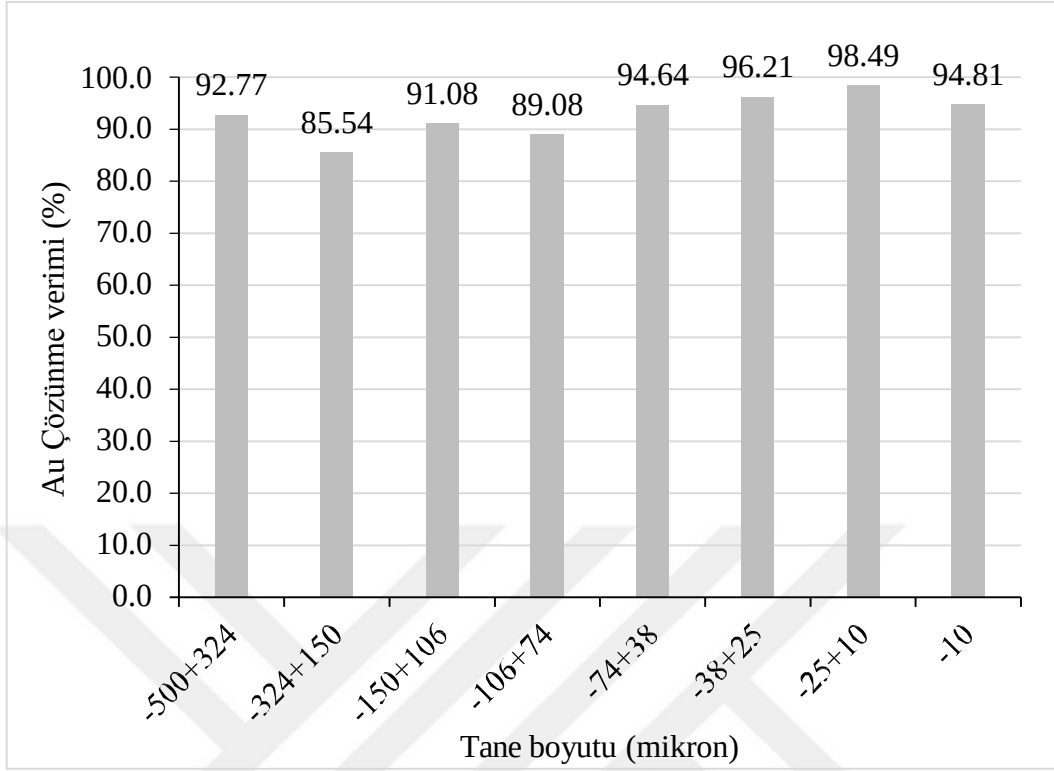
3.5. Çözündürme Karakterizasyon Çalışmaları

Atık örneğimizin kazanım özelliklerini belirlemek üzere öncelikle siyanür liçi performansları araştırılmıştır. Sonrasında çevreci ve toksik olmayan yenilikçi liç reaktifi amino asitlerle çözündürülme performansı araştırılmıştır. Liç sonuçları hem reaktiflerle hem de farklı atıklardan elde edilen kazanım verimleriyle karşılaştırılmıştır. Liç sonrasında elde edilen atıkların karakterizasyonu ile de verim kayıplarının nedenleri hakkında sonuçlara ulaşılması amaçlanmıştır.

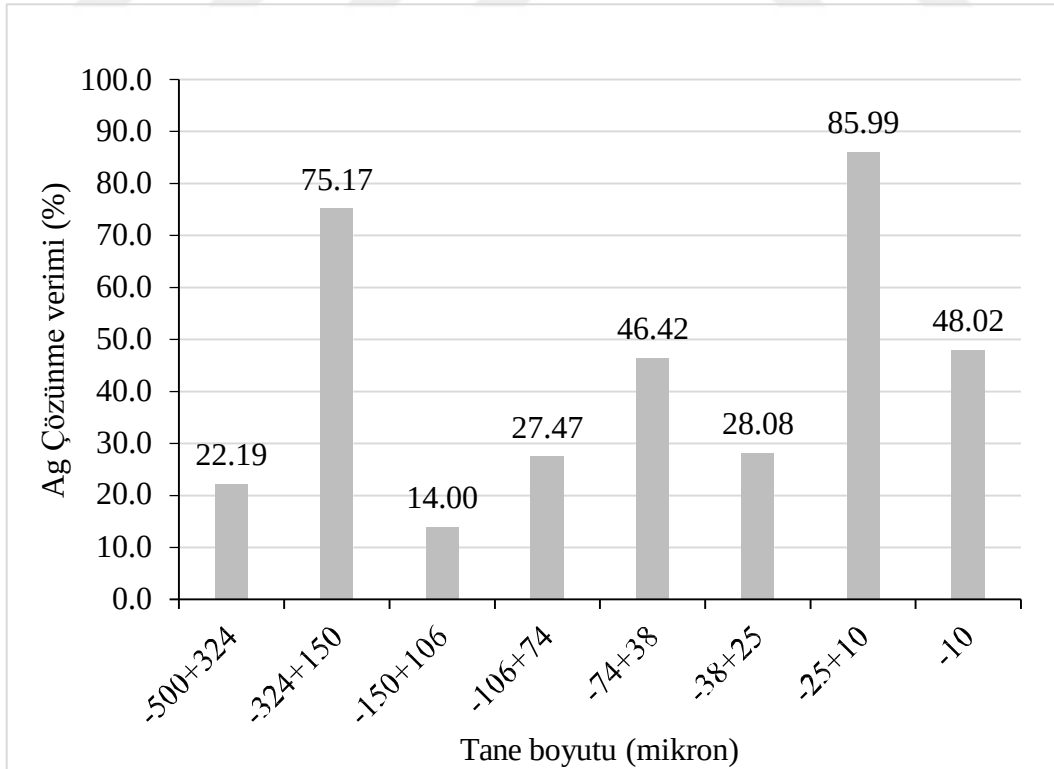
3.5.1. Tüvenan Atıklarının Siyanür Liçi Test Sonuçları

Yapılan deneysel çalışmalar, farklı mineralojik yapıya sahip atıklardan elde edilen liç performanslarının karşılaştırılmasını mümkün kılmıştır. Bu durum, yalnızca metal kazanımı açısından değil, aynı zamanda geliştirilen prosesin tek mineralojik yapılardaki davranışını değerlendirmek açısından da önem arz etmektedir.

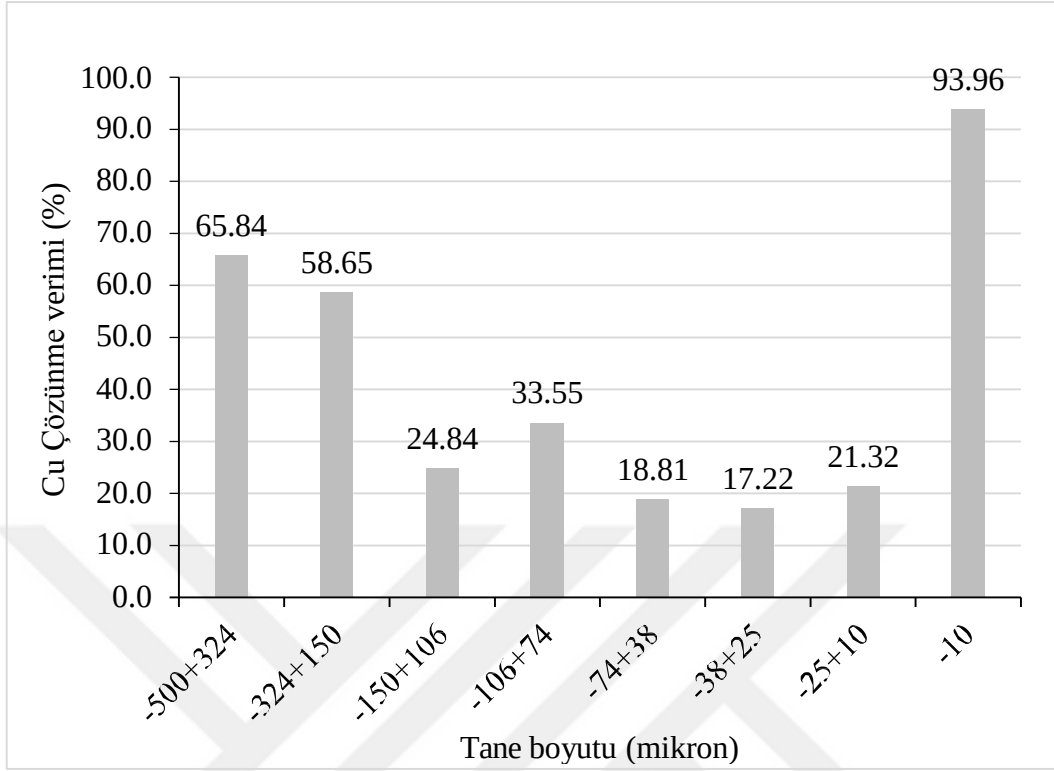
Kinetiksiz (fraksiyon bazlı) veriler, metal dağılımının tane boyutuna bağlı olarak belirgin farklılıklar gösterdiğini ortaya koymaktadır. Altın ve gümüş, (Şekil 64, Şekil 65) özellikle orta ve ince fraksiyonlarda (74–38 μm) yüksek verim (%85–98.5) ile toplanırken, iri fraksiyonlarda kazanım düşmektedir. Bakır ve cıva (Şekil 65) ve (Şekil 66) ise çoğunlukla ince fraksiyonlarda yoğunlaşarak daha yüksek çözünme ve verim eğilimi göstermektedir. Bu durum, atıkların zenginleştirilmesi ve değerli metallerin geri kazanımı için ince fraksiyonların işlenmesinin daha avantajlı olduğunu göstermektedir.



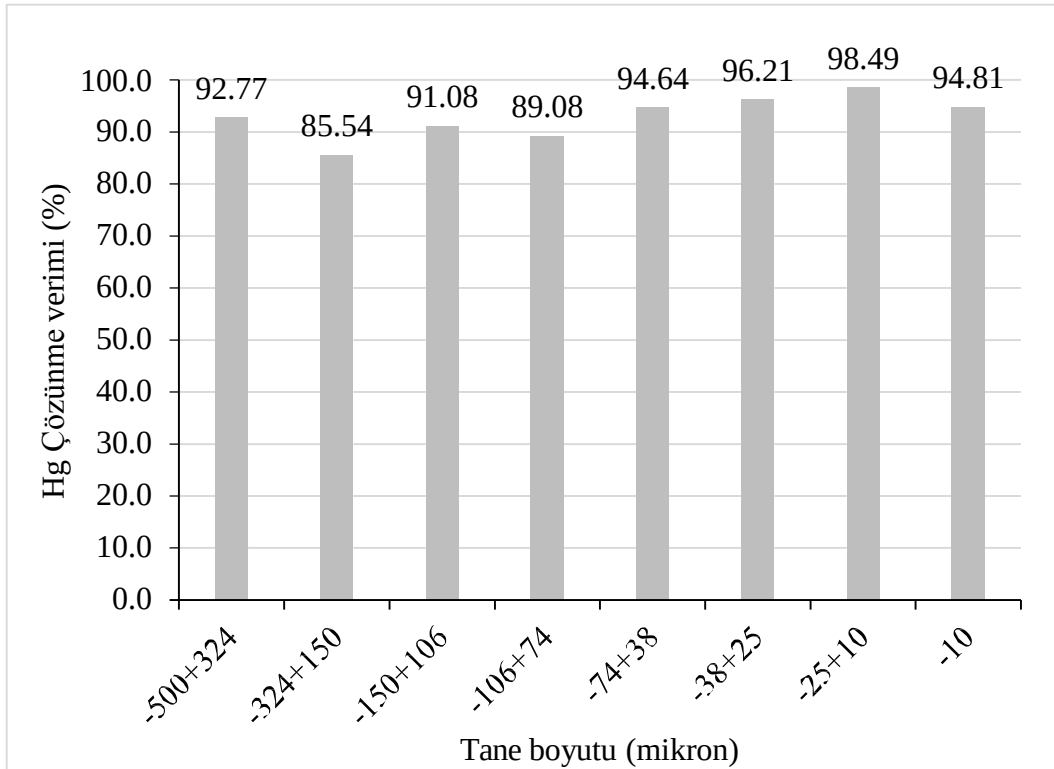
Şekil 64. Farklı tane boyutlarında elde edilen altın (Au) verim değişimleri



Şekil 65. Ag (Gümüş) elementine ait verim oranlarının fraksiyonlara göre dağılımı



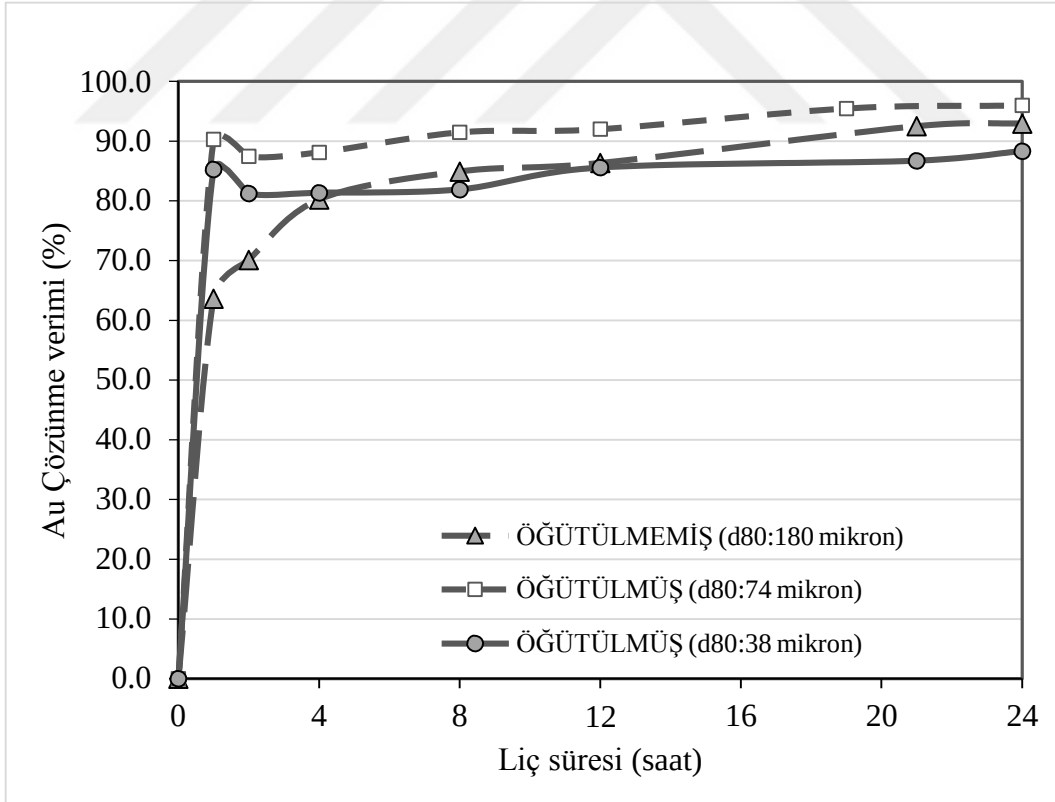
Şekil 66. Tane boyutuna göre Cu (Bakır) verim oranlarının değişimi



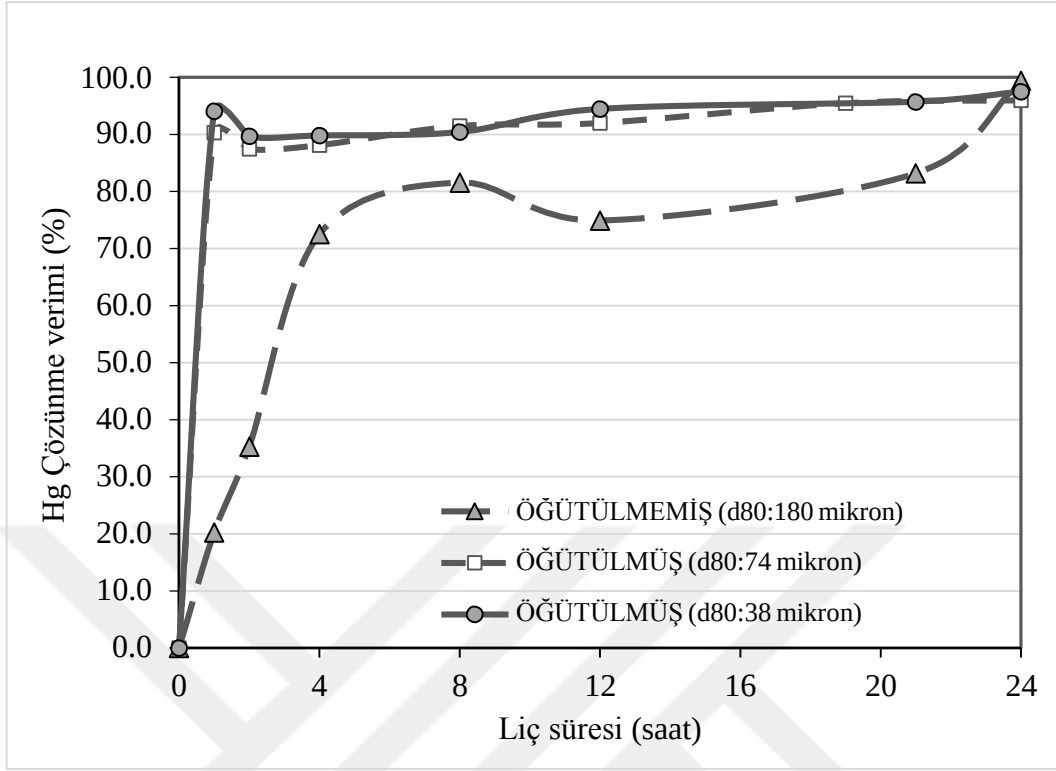
Şekil 67. Tane boyutlarına göre Hg çözünme verimlerinin değişimi

Kinetik veriler (Şekil 68–71), özellikle Au ve Ag'nin siyanür liçi sırasında hızlı çözünme davranışı sergilediğini ve ilk 8 saat içerisinde %90'a yakın bir çözünme verimine ulaşıldığını göstermektedir. Buna karşılık, Cu ve Hg elementlerinin çözünme eğilimleri daha yavaş ve sınırlı kalmış, bu da onların liç sürecinde farklı bir davranış mekanizmasına sahip olduğunu ortaya koymuştur.

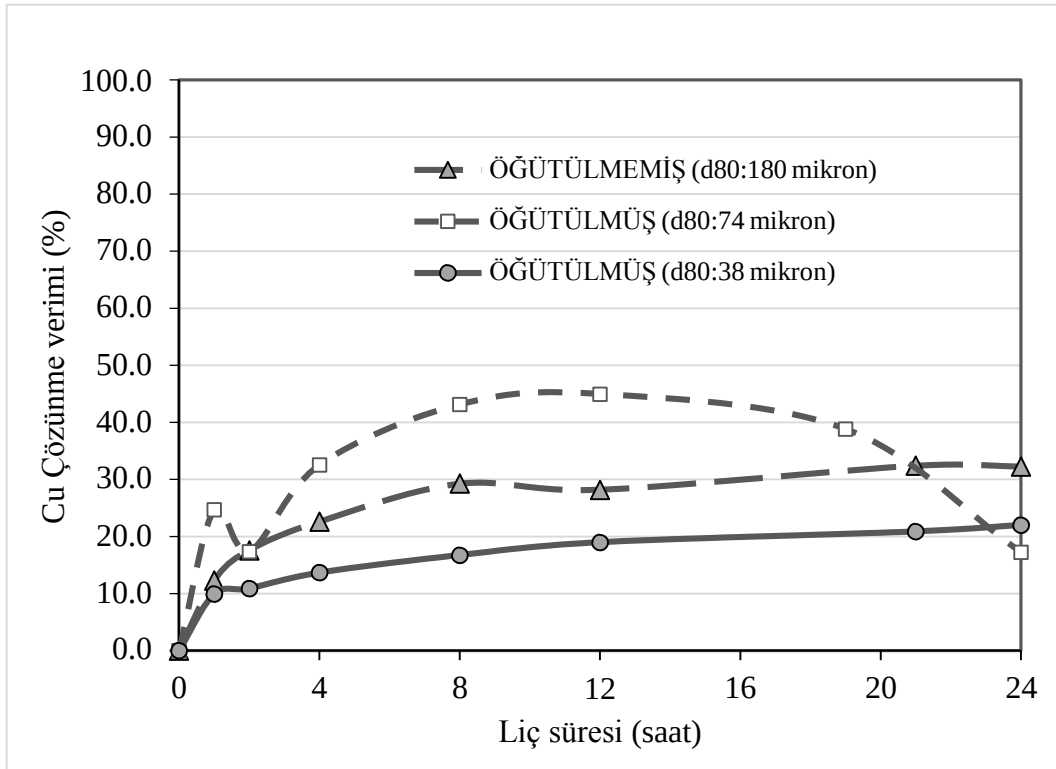
Elde edilen bu sonuçlar, özellikle ince fraksiyonlarda altının geri kazanımının yüksek verimlilikle optimize edilebileceğini ortaya koymaktadır. Ancak aynı zamanda, cıva ve bakırın çözünme eğilimlerinin süreç içerisinde dikkatle kontrol edilmesi gerektiğini göstermektedir. Çünkü bakır, siyanür tüketimini artırarak liç verimini düşürebilirken; cıva ise hem amalgam fazlarının bozunması hem de çevresel açıdan toksik etkiler nedeniyle ayrı bir risk oluşturmaktadır. Bu nedenle, liç optimizasyon çalışmalarında altın ve gümüşün hızlı çözünmesinden faydalanılırken, bakır ve cıvanın etkilerini sınırlamaya yönelik proses kontrol stratejilerinin geliştirilmesi önem arz etmektedir.



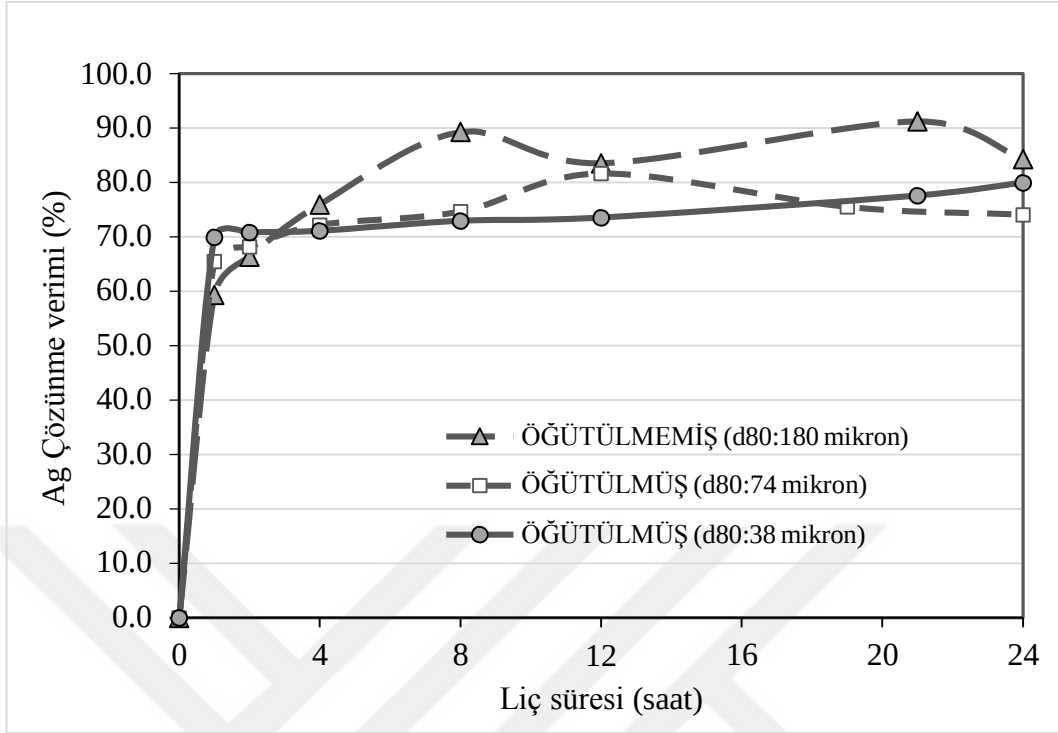
Şekil 68. Öğütülmüş örneğin (d₈₀: 38 mikron) CN liçi Au çözünme kinetiği



Şekil 69. Öğütülmüş örneğin (d_{80} : 38 mikron) CN liçi Hg çözünme kinetiği



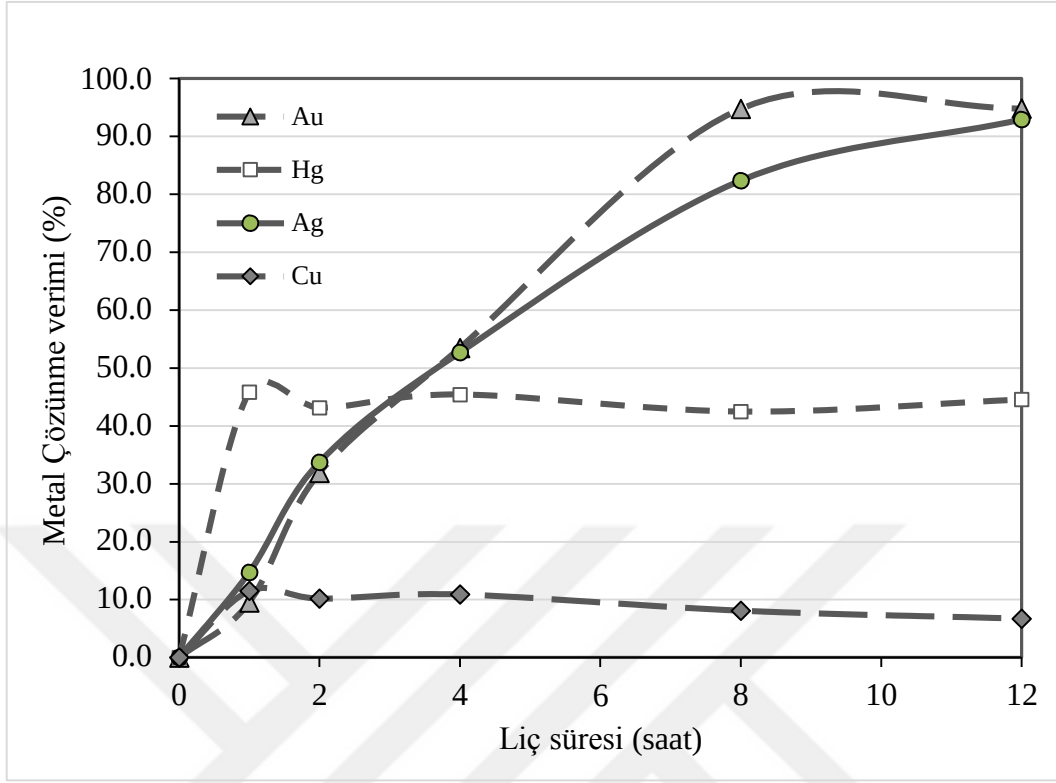
Şekil 70. Öğütülmüş örneğin (d_{80} : 38 mikron) CN liçi Cu çözünme kinetiği



Şekil 71. Öğütülmüş örneğin (d_{80} : 38 mikron) CN liçi Ag çözünme kinetiği

3.5.2. Glisin Liç ve Çözündürme Testleri

Glisin liçi deneyi kapsamında ($d_{80} = 38 \mu\text{m}$), pH 10.5, 20°C sıcaklık, 20% katı oranı, glisin ile 12 saat süreyle yapılan liç işlemi sonucunda, değerli metallerin çözünme verimleri değerlendirilmiştir. Altın (Au) için elde edilen %94.78'lik çözünme verimi, Şekil 72'de glisin bazlı liçin oldukça etkin olduğunu göstermektedir. Gümüş (Ag) için verim %92.90 olarak hesaplanmış ve glisin ortamında başarılı bir çözünürlük sağlandığı gözlenmiştir. Cıva (Hg) çözünme verimi %49.26 ile daha düşük kalmış olup, bu durum muhtemelen cıvanın mineralojiye bağlı bağlanma fazları (örneğin cinnabar) ve sınırlı çözünürlüğünden kaynaklanmaktadır (Şekil 72). Bakır (Cu) için ise çözünme verimi %6.12 gibi oldukça düşük bir seviyede kalmış, bu da glisin ortamının bakır çözünürlüğü açısından yeterince etkili olmadığını göstermiştir. Elde edilen sonuçlar, glisin liç yönteminin özellikle altın (Au) ve gümüşün (Ag) çözünmesi açısından yüksek etkinlik gösterdiğini ortaya koymaktadır. Bu durum, siyanür gibi çevresel açıdan riskli reaktiflere alternatif olarak glisinin kullanılabileceğini ve sürecin daha çevre dostu, sürdürülebilir bir yöntem olarak değerlendirilebileceğini göstermektedir.



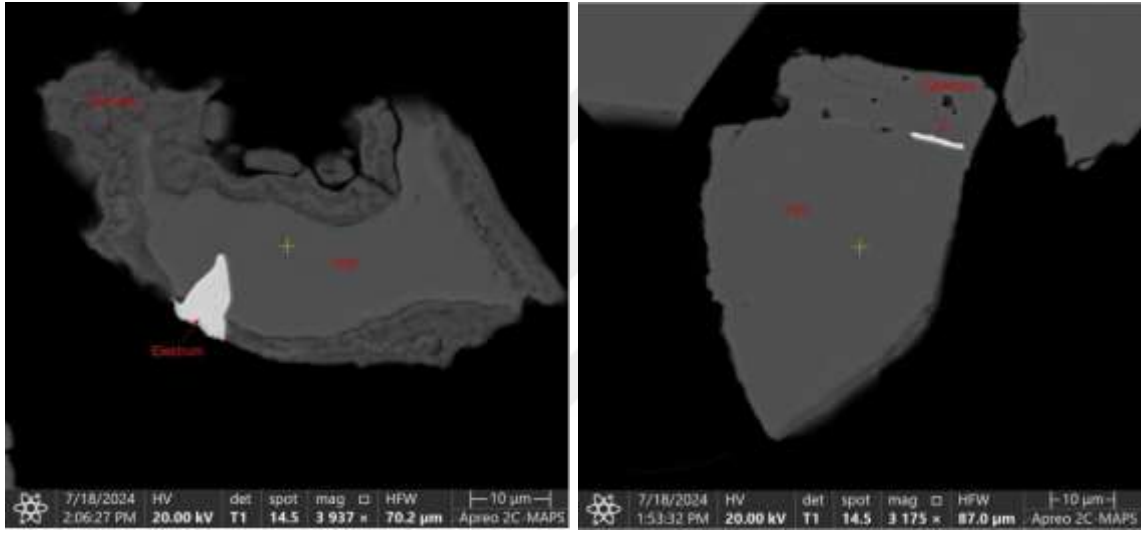
Şekil 72. Glisin ortamında (Au, Ag, Cu ve Hg) liç veriminin zamana bağlı değişimi

Özellikle bakırın düşük çözünürlüğü, liç sürecinde reaktif tüketimi ve metalürjik verimlilik açısından sınırlayıcı bir faktör olarak öne çıkarken; cıvanın düşük çözünme eğilimi ise çevresel açıdan olumlu bir durum olmakla birlikte, sistemde amalgam veya kararlı bileşik fazları hâlinde kalması nedeniyle potansiyel risk oluşturmaya devam etmektedir.

Dolayısıyla, glisin liç yöntemi değerli metallerin geri kazanımı için çevreye duyarlı bir alternatif sunarken, baz metallerin çözünmesi konusundaki sınırlamaları nedeniyle tek başına yeterli olmayabilir. Bu durum, yöntemin özellikle altın ve gümüş geri kazanımında uygulanabilirliğini, ancak bakır ve cıva gibi elementlerin süreçteki davranışlarının kontrol edilmesi için ek işlem adımlarıyla desteklenmesi gerektiğini ortaya koymaktadır.

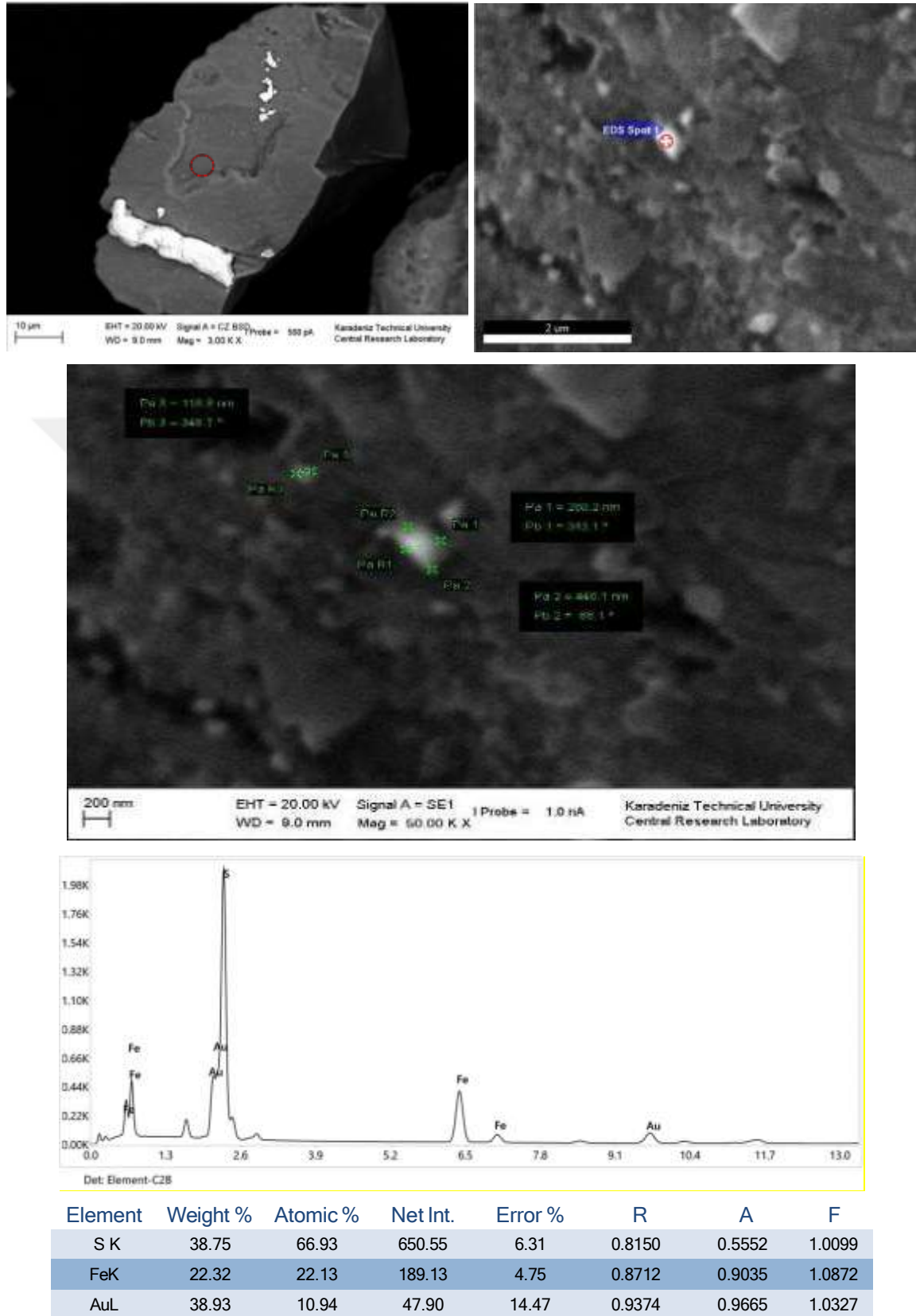
3.5.3. Liç Atıklarının Karakterizasyonu

Şekil 73'te sunulan SEM-BSE görüntülerinde, elektrom mineralinin (Au-Ag alaşımı) Fe-oksit (A) ve pirit (B) mineralleriyle yakın kenetlenmiş halde bulunduğu gözlenmektedir. Bu durum, değerli metallerin serbestleşmesinin sınırlı olduğunu ve liç işlemlerinde çözünmenin zorlaşabileceğini göstermektedir. Dolayısıyla, bu tür mineralojik ilişkiler, ön zenginleştirme veya daha ince öğütme gibi ek işlemler gerekliliğini ortaya koymaktadır.



Şekil 73. Fe-Oksit (A) ve Pirit (B) ile kenetli elektrom mineraline ait SEM-BSE görüntüsü.

Şekil 74'de sunulan SEM-EDS görüntüsünde, pirit (FeS_2) minerali içinde 350 nm boyutunda altın (Au) tanesi gözlemlenmiştir. Bu durum, altının yalnızca serbest fazda değil, aynı zamanda sülfürlü mineraller içinde ince taneler (submikron) halinde de dağılmış olduğunu göstermektedir. Bu tür ince taneler, özellikle siyanür liçinde çözünme verimini sınırlayabilir ve altının kazanımında ileri öğütme veya oksidatif ön işlemlerin gerekliliğini işaret eder. Ayrıca, bu taneciklerin pirit ile sıkı bağlanması, çözündürme işlemlerinde kinetik bariyer oluşturabilir.



Şekil 74. Pirit içerisindeki 350 nm Au tanesinin görünümü EDS analiz

4. SONUÇLAR

Moritanya'nın endüstriyel madencilik faaliyetleri, özellikle batı bölgesine odaklanmış durumdadır ve ASGM sektörü, ülkenin ekonomik yapısında önemli bir rol oynamaktadır. 2016'dan sonra hızla gelişen bu sektör, Moritanya'nın Batı Afrika'daki diğer ülkelerle karşılaştırıldığında genç bir madencilik sektörü olmasına rağmen oldukça hızlı bir büyüme göstermiştir. Özellikle altın yataklarının keşfi ve madencilik koridorlarının aktif olarak desteklenmesiyle, ülke büyük ilerlemeler kaydetmiştir.

Bu çalışmada, Moritanya'da üretilen amalgamlama atıklarının mineralojik yapısının belirlenmesi ve cıvanın çevreye yayılma potansiyeli değerlendirilmiştir. Zouérate Bölgesi amalgamlama atıkları üzerine yapılan çalışmalar kapsamında yapılan kimyasal analizlerde, cıva içeriğinin 179,4 g/t olduğu ve altın içeriğinin 14,41 g/t seviyelerinde bulunduğu belirlenmiştir. Bu, cıvanın büyük oranda kayba uğramadığını ancak buharlaşarak çevreye yayılma riski taşıdığını göstermektedir. Atıkların %89,57 oranında SiO_2 içerdiğini ve bunun kuvarsça zengin, silisik bir matris yapısına işaret ettiğini göstermiştir. Bunun yanında Al_2O_3 (%2,60) ve Fe_2O_3 (%2,46) gibi ikincil bileşenler de önemli düzeyde bulunmuştur. Bu değerler, ASGM atıklarında yüksek ekonomik potansiyelin halen mevcut olduğunu ve çevresel açıdan önemli düzeyde cıva içerdiğini ortaya koymaktadır.

Karşılaştırmalı literatür incelemeleri sonucunda, benzer nitelikteki atıklarda farklı ülkelerde (Peru, Sudan, Mali, Senegal) cıva değerlerinin 150–350 g/t arasında değiştiği, bazı çalışmalarda 500 g/t'a kadar çıktığı, altın tenörünün ise 5–25 g/t aralığında olduğu görülmüştür. Bu bağlamda Moritanya'daki örneğin cıva seviyesi, küresel ortalamaların altında olmakla birlikte çevresel açıdan dikkate alınması gereken bir düzeydedir. Ayrıca yüksek Cu içeriği, bu atıkların ikincil metal geri kazanımı açısından değerlendirilmesini de mümkün kılmaktadır.

Tane boyutu analizinde, ortalama boyutun (d_{80}) yaklaşık 100 μm olduğu belirlenmiş ve bu durum, örneğin öğütülme açısından göreceli olarak verimli bir işlemden geçtiğini, ancak altının matriks içinde mikroskobik kapanımlar şeklinde bulunduğunu göstermektedir. Bu da altın kaybının fiziksel işlem yetersizliğinden ziyade, mineralojik kapanımlar nedeniyle olduğunu düşündürmektedir.

Siyanür ile çözündürme çalışmaları altının %98 verimle çözündürmesinin yanında cıvanın da %95 üzerinde çözünmesine sebep olduğunu göstermektedir. Bu durum metal

kazanım proseslerindeki maliyet arttırıcı etkisinin yanında ve belkide daha önemlisi cıvanın çevre açısından daha tehlikeli cıva-siyanür komplekslerinin oluşumu açısında da önemli bir dezavantaj oluşturmaktadır. Diğer taraftan çevreci ve toksik özelliği bulunmayan bir reaktif sistemi olan amino asit liçi ile altın ve cıvanın %95 üzerindeki verimlerle kazanılabildiğinin belirlenmesi oldukça önemlidir. Uygulanan çözündürme sistemlerinde gümüş ve bakır da belirli oranlarda kazanılabilmektedir. Bu yeni liç alternatifinin gerek maliyet ve gerekse çevresel açıdan önemli avantajları bulunmaktadır. Bu yönü ile amalgamlama atıklarının değerlendirilmesinde önemli bir alternatif yöntem olarak değerlendirilebileceği görülmektedir.

Yapılan çalışmalar, hem ASGM faaliyetlerinin çevresel etkilerini hem de potansiyel ekonomik geri kazanım fırsatlarını ortaya koyması bakımından önemlidir. Bulgular, Moritanya'daki ASGM sektörünün resmileştirilmesi ve atık yönetimi politikalarının bilimsel temellere dayandırılması adına veri sağlamaktadır. Ayrıca bu tür atıkların yalnızca çevre kirliliği kaynağı değil, aynı zamanda uygun teknolojilerle geri kazanım açısından değerli rezervler olduğu ortaya konmuştur.

5. ÖNERİLER

Bu yüksek lisans tezi kapsamında, Moritanya'nın kuzeybatısındaki Bir Moghreïn-Zouérate bölgesinden alınan amalgam atıklarının mineralojik karakterizasyonu yapılmıştır. Elde edilen bulgular doğrultusunda, bu çalışma alanında ilerlemek isteyen araştırmacılar ve uygulayıcılar için aşağıdaki öneriler sunulmaktadır:

- Ağır ortam ayırması ve elek analizleriyle elde edilen boyut fraksiyonlarına yönelik çalışmalar farklı saha örnekleriyle tekrarlanarak genelleştirilebilir.
- Cıva içeren taneciklerin daha hassas bir şekilde tanımlanabilmesi için SEM-EDS analizlerinin daha geniş örneklem grupları üzerinde yapılması önerilmektedir.
- XRD analizleri sonrasında yapılan Ritveld hesaplamalarının daha kesin sonuçlar verebilmesi için cevher mikroskopisi çalışmalarının tamamlanması gereklidir.
- Atık içindeki potansiyel ekonomik minerallerin daha iyi ayrıştırılabilmesi amacıyla ek jeokimyasal analiz yöntemlerinin (örneğin, LA-ICP-MS) kullanılması önerilir.
- Çevresel etkilerin daha iyi anlaşılması için cıva buharlaşması ve sızıntı potansiyeline ilişkin ek çevresel risk değerlendirme çalışmaları yapılmalıdır.

6. KAYNAKLAR

- Beaudoin, G. (2015). Second projet de renforcement institutionnel du secteur minier de la République Islamique de Mauritanie (PRISM-II): Mineral potential tracts for orogenic, Carlin-like, and epithermal gold deposits in the Islamic Republic of Mauritania.
- Chanda-Kapata, P. (2020). Public health and mining in East and Southern Africa: A desk review of the evidence. *Zambia Ministry of Health with Training and Research Support Centre in the Regional Network for Equity in Health in East and Southern Africa (EQUINET)*.
- Cordy, P., Veiga, M. M., Salih, I., Al-Saadi, S., Console, S., Garcia, O., Roeser, M. (2011). Mercury contamination from artisanal gold mining in Antioquia, Colombia: The world's highest per capita mercury pollution. *Science of the Total Environment*, 410, 154-160.
- Davis, G. (2011). Geology and discovery history of the Tasiast gold deposit, Mauritania [abs.]. *British Columbia Chamber of Mines, Mineral Exploration 2011 Roundup*, 77-79.
- Dietz, R., Wilson, S., Loseto, L. L., Dommergue, A., Xie, Z., Sonne, C., & Chételat, J. (2022). Special issue on the AMAP 2021 assessment of mercury in the Arctic (Vol. 843, pp. 157020): Elsevier.
- Eboigbe, E. O., Veerasamy, N., Odukoya, A. M., Anene, N. C., Sonke, J. E., Sakisaka Méndez, S., & McLagan, D. S. (2025). Mercury contamination in staple crops impacted by Artisanal Small-scale Gold Mining (ASGM): Stable Hg isotopes demonstrate dominance of atmospheric uptake pathway for Hg in crops. *EGUsphere*, 2025, 1-33.
- Elwaleed, A., Jeong, H., Abdelbagi, A. H., Thi Quynh, N., Nugraha, W. C., Agusa, T., . . . Arizono, K. (2024). Assessment of Mercury Contamination in Water and Soil from Informal Artisanal Gold Mining: Implications for Environmental and Human Health in Darmali Area, Sudan. *Sustainability*, 16(10), 3931.
- Gerson, J. R., Driscoll, C. T., Hsu-Kim, H., & Bernhardt, E. S. (2018). Senegalese artisanal gold mining leads to elevated total mercury and methylmercury concentrations in soils, sediments, and rivers. *Elem Sci Anth*, 6, 11.
- Goldfarb, R. J., Marsh, E. E., Anderson, E. D., Horton, J. D., Finn, C. A., & Beaudoin, G. (2015). *Mineral potential tracts for orogenic, Carlin-like, and epithermal gold deposits in the Islamic Republic of Mauritania,(phase V, deliverable 69)* (2331-1258). Retrieved from
- Heidi, M. T. (2022). Artisanal gold mining in Mauritania. *State, Society and Islam in the Western Regions of the Sahara*, 107.

- Henderson, R. (2010). Tasiast project, Mauritania. *Kinross Gold Corp., NI 43-101 Technical report*, 127.
- Hilson, G., & Pardie, S. (2006). Mercury: an agent of poverty in Ghana's small-scale gold-mining sector? *Resources policy*, 31(2), 106-116.
- Key, R., Loughlin, S., Gillespie, M., Del Rio, M., Horstwood, M., Crowley, Q. G., . . . Henney, P. (2008). *Two Mesoarchaeoan terranes in the Reguibat shield of NW Mauritania* (Vol. 297): The Geological Society of London London.
- Kippenberg, J. (2011). *A poisonous mix: Child labor, mercury, and artisanal gold mining in Mali*: Human Rights Watch.
- Marutani, M., Higashihara, M., Watanabe, Y., Murakami, H., Kojima, G., & Dioumassi, B. (2005). Metallic ore deposits in the Islamic Republic of Mauritania. *Shigen-Chishitsu*, 55(1), 59-70.
- Maurin, G., Bronner, G., Le Goff, E., & Chardon, D. (1997). Notice explicative de la carte géologique à 1/200 000 de la feuille Chami (Mauritanie)-Prospection aurifère dans le Tasiast-Tijirit. *BRGM Rept*, 2459, 32.
- Schofield, D., Horstwood, M., Pitfield, P., Crowley, Q., Wilkinson, A., & Sidaty, H. C. O. (2006). Timing and kinematics of Eburnean tectonics in the central Reguibat Shield, Mauritania. *Journal of the Geological Society*, 163(3), 549-560.
- Schofield, D., Horstwood, M., Pitfield, P., Gillespie, M., Darbyshire, F., O'connor, E., & Abdouloye, T. (2012). U–Pb dating and Sm–Nd isotopic analysis of granitic rocks from the Tiris Complex: New constraints on key events in the evolution of the Reguibat Shield, Mauritania. *Precambrian Research*, 204, 1-11.
- Sedore, M., & Masterman, G. (2012). Tasiast Mine Mauritania 43-101F1 technical report: Kinross Gold Corporation: Kinross Corp., 43-101F1 Technical Report, 162 p.
- Spiegel, S. J. (2009). Occupational health, mercury exposure, and environmental justice: learning from experiences in Tanzania. *American journal of public health*, 99(S3), S550-S558.
- Taylor, C. D. (2015). Second Projet de Renforcement Institutionnel du Secteur Minier de la République Islamique de Mauritanie (PRISM-II) Phase V. *USGS Report*, 20.
- Taylor, C. D., Anderson, E., Bradley, D., Beaudoin, G., Cosca, M. A., Eppinger, R. G., Giles, S. A. (2012). Mauritania: a Greenfields Exploration Opportunity in Northwestern Africa. *SEG Newsletter*(91), 1-17.
- Taylor, C. D., Finn, C. A., Anderson, E. D., Bradley, D. C., Joud, M., Taleb Mohamed, A., & Horton, J. D. (2016). The F'derik-Zouérate iron district: Mesoarchean and Paleoproterozoic iron formation of the Tiris Complex, Islamic Republic of Mauritania. *Mineral Deposits of North Africa*, 529-573.

- Veiga, M. M., & Hinton, J. J. (2002). *Abandoned artisanal gold mines in the Brazilian Amazon: a legacy of mercury pollution*. Paper presented at the Natural resources forum.
- Velásquez-López, P. C., Veiga, M. M., & Hall, K. (2010). Mercury balance in amalgamation in artisanal and small-scale gold mining: identifying strategies for reducing environmental pollution in Portovelo-Zaruma, Ecuador. *Journal of Cleaner Production*, 18(3), 226-232.
- Yoshimura, A., Suemasu, K., & Veiga, M. M. (2021). Estimation of mercury losses and gold production by artisanal and small-scale gold mining (ASGM). *Journal of Sustainable Metallurgy*, 7, 1045-1059.



ÖZGEÇMİŞ

Mouhamed Vadel ETHMANE, ilk öğrenimini 2010 yılında Sebil Okulu'nda tamamladıktan sonra, 2017 yılında Islah Raid Lisesi'nden mezun oldu. 2017-2020 yılları arasında l'Université de Nouakchott, Faculté des Sciences et Techniques, Jeoloji Bölümü'nde lisans eğitimini tamamladı. Moritanya'da demir cevheri üretimi üzerine faaliyet gösteren Société Nationale Industrielle et Minière (SNIM) şirketinde mesleki eğitim stajını tamamladı. 2023 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Maden Mühendisliği Anabilim Dalı'nda tezli yüksek lisans programına başladı. Ana dili Arapça olan araştırmacı, Fransızca, İngilizce ve Türkçe dillerini iyi derecede bilmektedir.