



T.C.
KONYA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

PORT SUDAN'DAKİ ALTIN MADENCİLİĞİ
ARTIKLARINDAN ALTININ SİYANÜRLEME
İŞLEMİYLE KAZANILMASI

Babiker Ali ALKLOOS

DOKTORA TEZİ

Maden Mühendisliği Anabilim Dalı

Mart-2024
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Babiker Ali ALKLOOS tarafından hazırlanan “Port Sudan’daki Altın Madenciliği Artıklarından Altının Siyanürleme İşlemiyle Kazanılması” adlı tez çalışması 07/03/2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Maden Mühendisliği Anabilim Dalı’nda DOKTORA TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Başkan

Prof.Dr. Özcan KOÇYİĞİT

.....

Danışman

Prof.Dr. Salih AYDOĞAN

.....

Üye

Prof.Dr. Alper ÖZKAN

.....

Üye

Prof.Dr. Havvanur UÇBEYİAY

.....

Üye

Doç.Dr. Seyfettin Sinan GÜLTEKİN

.....

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Mevlüt UYAN
Enstitü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

İmza

Babiker Ali ALKLOOS

Tarih: 07/03/2024

ÖZET

DOKTORA TEZİ

PORT SUDAN'DAKİ ALTIN MADENCİLİĞİ ARTIKLARINDAN ALTININ SİYANÜRLEME İŞLEMİYLE KAZANILMASI

Babiker Ali ALKLOOS

**Konya Teknik Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Maden Mühendisliği Anabilim Dalı**

Danışman: Prof.Dr. Salih AYDOĞAN

2024, 127 Sayfa

Jüri

**Prof.Dr. Salih AYDOĞAN
Prof.Dr. Özcan KOÇYİĞİT
Prof.Dr. Alper ÖZKAN
Prof.Dr. Havvanur UÇBEYİAY
Doç.Dr. Seyfettin Sinan GÜLTEKİN**

Bu tez çalışmasında Sudan-Port Sudan bölgesinde bulunan altın madenlerinden cıva amalgamasyonu yöntemi ile altın üretimi sonrası ortaya çıkan artıklardan siyanürleme yöntemiyle altın kazanım şartları belirlenmeye çalışılmıştır. Çalışılan artık numunesi üzerinde yapılan mineralojik ve kimyasal analizlere göre, numunenin ana bileşenlerinin %77.10 SiO₂, %8.08 Al₂O₃, %5.76 Fe₂O₃, %1.67 CaO ve % 0.97 K₂O olduğu tespit edilmiştir. Artık numunesi ayrıca 16.86 g/ton Au tenörlüdür. Çalışmalarda karıştırma liçi, perkolasyon liçi ve Vat liçi yöntemleri kullanılmıştır. Karbon in pulp (CIP) yöntemi ile aktif karbona adsorpsiyon çalışmaları, Yapay Sinir Ağları (YSA) yöntemiyle karıştırma liçi çalışmalarından elde edilen veriler kullanılarak liç işleminin tahmininin modellenmesi ve ayrıca kurulması muhtemel küçük ölçekli bir siyanürleme tesisi için fizibilite çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

Karıştırma liçi çalışmalarında; karıştırma hızının, pH'ın, NaCN konsantrasyonunun, katı/sıvı oranının ve sıcaklığın altın çözündürmesine olan etkisi incelenmiştir. Deneyler çeşitli sıcaklıklara ayarlanabilen sıcak su banyosunda gerçekleştirilmiştir. Karıştırma hızı 0-600 dev/dak aralığında arttıkça Au çözünme hızı da artmıştır. pH 10-10.30 aralığında arttıkça Au çözünme hızı artmıştır. NaCN konsantrasyonu 0.05-0.5 g/L konsantrasyon aralığında arttıkça Au çözünme hızı da artmıştır. Sıcaklık çalışmaları 25-85 °C aralığında gerçekleştirilmiş olup sıcaklık arttıkça Au çözünme hızı da artmıştır. Katı/sıvı oranının etkisi çalışmaları %20-%50 katı/sıvı oranında gerçekleştirilmiştir. Katı/sıvı oranı arttıkça Au çözünme verimi doğal olarak düşmektedir. Çalışmalarda 25 °C sıcaklıkta, 0.5 g/L NaCN konsantrasyonunda, pH 10.30'da, katı/sıvı oranı %40 olduğu şartlarda 120 dakikalık liç işlemi sonucu %87.91 Au çözünme verimine ulaşılmıştır.

Perkolasyon liçi çalışmaları için karıştırma liçi deneylerinde yaşanan susuzlandırma problemi nedeniyle altın numunesi çimento kullanılarak aglomere edilmiştir. Yapılan aglomerasyon çalışmalarında 7/100 ve 9/100 çimento/artık numunesi (w/w) oranlarında en iyi sulu ortamda dayanım sonuçlarına ulaşılmıştır. Çalışmalarda, karıştırma hızı deneylerinden elde edilen NaCN konsantrasyonu, pH katı/sıvı oranı gibi optimum şartlar kullanılmış olup 25 °C sıcaklıkta gerçekleştirilmiştir. Çözelti akış debisi olarak 0.5, 1.0, 1.5 ve 2.0 L/dak debileri kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre çözelti akış debisinin Au çözünme hızına bir etkisinin olmadığı tespit edilmiştir. Çalışmalar sonucu 120 dakikalık bir liç işlemi sonrası çalışılan tüm debilerde yaklaşık %85 Au çözünme verimine ulaşılmıştır.

Vat liçi çalışmalarında perkolasyon liçi çalışmalarında olduğu gibi çimento ile gerçekleştirilen aglomeratlar kullanılmıştır. Çalışmalarda, karıştırma hızı deneylerinden elde edilen NaCN

konsantrasyonu, pH katı/sıvı oranı gibi optimum şartlar kullanılmış olup 25 °C sıcaklıkta gerçekleştirilmiştir. 2, 3 ve 5 dakika aralar ile numunenin bulunduğu hazne yukarı-aşağı hareket ettirilerek çalışmalar gerçekleştirilmiştir. 3 dakika ara ile yapılan 120 dakikalık bir liç işlemi sonucu yaklaşık %83 Au çözünme verimine ulaşılmıştır.

CIP çalışmaları karıştırma liçinden elde edilen uygun liç şartlarında 120 dakika süreyle gerçekleştirilmiştir. Çalışmalar sonucu çözünen altının yaklaşık %94'ü ve çözünen bakırın ise yaklaşık %98'i aktif karbona adsorbe edilmiştir.

YSA çalışmaları; karıştırma liçi deneylerinden elde edilen zamana karşı karıştırma hızı, pH, NaCN konsantrasyonu, katı/sıvı oranı ve sıcaklık verileri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Her bir deney sonrası elde edilen 72 adetlik 75, 90 ve 120 dakikalık Au çözünme verimi verileri diğer süreler için elde edilen veriler eğitilerek tahmin edilmiştir. 72 adet verinin eğitim sonucu elde edilen yeni verilerin gerçek verilere göre ortalama hatası 1.66 olarak bulunmuştur. Yani, tahmin sonuçları gerçek verilere göre ortalama ± 1.66 puan uzaktır.

270 Ons/ay kapasiteli küçük bir siyanürleme tesisinin kurulabilmesi için fizibilite çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Fizibilite çalışmaları için Vat liçi deneylerinden elde edilen sonuçlar baz alınmıştır. Çalışmalar sonucu yaklaşık 1 ay sonra tesis kâra geçebileceği öngörülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Altın, siyanürleme liçi, karıştırma liçi, perkolasyon liçi, Vat liçi, Yapay Sinir Ağları

ABSTRACT

PhD THESIS RECOVERY OF GOLD FROM GOLD MINING TAILINGS IN PORT SUDAN BY CYANIDIZATION PROCESS

Babiker Ali ALKLOOS

**Konya Technical University
Institute of Graduate Studies
Department of Mining Engineering**

Advisor: Prof.Dr. Salih AYDOĞAN

2024, 127 Pages

**Jury
Prof.Dr. Salih AYDOĞAN
Prof.Dr. Özcan KOÇYİĞİT
Prof.Dr. Alper ÖZKAN
Prof.Dr. Havvanur UÇBEYİAY
Assoc. Prof.Dr. Seyfettin Sinan GÜLTEKİN**

In this thesis study, it was tried to determine the gold recovery conditions by cyanidation method from the tailing resulting from gold production by mercury amalgamation method from the gold mines in the Sudan-Port Sudan region. According to the mineralogical and chemical analyzes performed on the studied residue sample, the main components of the sample were determined to be 77.10% SiO₂, 8.08% Al₂O₃, 5.76% Fe₂O₃, 1.67% CaO and 0.97% K₂O. The tailings sample also has a grade of 16.86 g/ton Au. Mixing leaching, percolation leaching and Vat leaching methods were used in the studies. Adsorption studies on activated carbon with the Carbon in Pulp (CIP) method, modeling of the prediction of the leaching process using the data obtained from mixing leaching studies with the Artificial Neural Networks (Kroeker, Wasylishen, & Hanna) method, and feasibility studies for a possible small-scale cyanidation plant were carried out.

In agitation leaching studies; The effects of stirring speed, pH, NaCN concentration, solid/liquid ratio and temperature on gold dissolution were examined. Experiments were carried out in a hot water bath that could be adjusted to various temperatures. As the stirring speed increased in the range of 0-600 rpm, the Au dissolution rate also increased. As the pH increased in the range of 10-10.30, the Au dissolution rate increased. As the NaCN concentration increased in the concentration range of 0.05-0.5 g/L, the Au dissolution rate also increased. Temperature studies were carried out in the range of 25-85 °C, and as the temperature increased, the Au dissolution rate also increased. Studies on the effect of solid/liquid ratio were carried out at 20%-50% solid/liquid ratio. As the solid/liquid ratio increases, the Au dissolution efficiency naturally decreases. In the studies, 87.91% Au dissolution efficiency was achieved as a result of a 120-minute leaching process at 25 °C, 0.5 g/L NaCN concentration, pH 10.30, and solid/liquid ratio of 40%.

For percolation leaching studies, the tailing sample was agglomerated using cement due to the dewatering problem experienced in the agitation leaching experiments. In the agglomeration studies, the best strength results in aqueous environment were achieved at 7/100 and 9/100 cement/tailing sample (w/w) ratios. In the studies, optimum conditions such as NaCN concentration and pH solid/liquid ratio obtained from agitation leaching experiments were used and it carried out at 25 °C. Flow rates of 0.5, 1.0, 1.5 and 2.0 L/min were used as solution flow rates. According to the results obtained, it was determined that the solution flow rate had no effect on the Au dissolution rate. As a result of the studies,

approximately 85% Au dissolution efficiency was achieved at all flow rates studied after a 120-minute leaching process.

In Vat leaching studies, agglomerates made with cement were used, as in percolation leaching studies. In the studies, optimum conditions such as NaCN concentration, pH and solid/liquid ratio obtained from agitation leaching experiments were used and were carried out at 25 °C. Studies were carried out by moving the chamber containing the sample up and down at intervals of 2, 3 and 5 minutes. Approximately 83% Au dissolution efficiency was achieved as a result of a 120-minute leaching process performed with 3-minute intervals.

CIP studies were carried out for 120 minutes under appropriate leaching conditions obtained from agitation leaching. As a result of the studies, approximately 94% of the dissolved gold and approximately 98% of the dissolved copper were adsorbed to activated carbon.

ANN studies; it was carried out using obtained from agitation leaching experiments data against time, pH, NaCN concentration, solid/liquid ratio and temperature. The 72 Au dissolution efficiency data obtained after each experiment for 75, 90 and 120 minutes were estimated by training the data obtained for other periods. As a result of the training of 72 pieces of data, the average error of the new data obtained compared to the real data was found to be 1.66. That is, the prediction results are on average ± 1.66 points away from the actual data.

Feasibility studies were carried out to establish a small cyanidation plant with a capacity of 270 Ounces/month. The results obtained from Vat leaching experiments were taken as basis for feasibility studies. As a result of the studies, it is predicted that the facility will be able to turn a profit after approximately 1 month.

Keywords: Gold, cyanidation leaching, agitation leaching, percolation leaching, Vat leaching, Artificial Neural Networks

ÖNSÖZ

Her konuda bana destek olan sayın danışmanım Prof.Dr. Salih AYDOĞAN’a, Doç.Dr. Seyfettin Sinan GÜLTEKİN’e, Dr.Öğr. Üyesi Ali ARAS’a, Prof.Dr. Alper ÖZKAN’a, Dr.Mahmoud Motasim’e, Dr. Mohamed Taha’ya, Tekniker İbrahim Küçük ve hoşgörüsü için kıymetli aileme teşekkür eder ve saygılarımı sunarım.

Ayrıca bana doktora öğrencisi olma fırsatını veren Türkiye Cumhuriyeti’ne, Selçuk Üniversitesi’ne ve Konya Teknik Üniversitesi’ne de sonsuz teşekkürler.

Sevgilerle

Babiker Ali ALKLOOS
KONYA- 2024

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	vi
ÖNSÖZ	viii
İÇİNDEKİLER	ix
1.GİRİŞ	1
1.1. Tez amacı ve Önemi	2
1.2. Altının Tarihçesi	3
1.3. Altın Mineralleri	4
1.4. Altının Kullanım Alanları	6
2. ÖNEMLİ ALTIN YATAK TİPLERİ VE OLUŞUM SÜREÇLERİ.....	8
2.1. Epitermal Altın Yatakları.....	9
2.2. Hidrotermal Altın Yatakları.....	9
2.3. Silikat Karbonat Kayaçlarıyla (Listvenit Kayaçları)İlişkili Altın Yatakları.....	10
2.3. Alüvyal ve Fosil Alüvyal Tip Altın Yatakları	10
2.4. Metamorfik Kayaçlardaki Altın Yatakları	10
2.5. Mesotermal Altın Yatakları	11
2.5.1. Porfiri Altın Yatakları	11
2.5.2. Damar Tipi Altın Yatakları.....	11
2.5.3. Altın Skarnları.....	11
2.6. Hipotermal Altın Yatakları	11
3. DÜNYA ALTIN REZERVLERİ VE ÜRETİMİ	13
3.1. Dünyada Altın Rezervleri	13
3.2. Sudan'daki Altın Rezervleri	14
3.3. Sudan'daki Altın Alanları	15
3.4. Dünyada Altın Üretimi	16
3.5. Sudan'da Altın Üretimi.....	19
4. ALTIN ZENGİNLEŞTİRME YÖNTEMLERİ	24
4.1. Gravite Yöntemleri	25
4.1.1. Falcon konsantratörü.....	25
4.1.2. Knelson konsantratörü	26
4.1.3. Multy Gravity Seperator (MGS) (Çoklu Gravite Ayırıcısı)	28
4.1.4. Sarsıntılı masa.....	28
4.2. Flotasyon.....	29
4.3. Cıva İle Amalgamasyon.....	31
4.4. Kimyasal Yöntemler	32

4.4.1. Siyanürleme liçi	33
4.4.2. Tiyosülfat liçi	42
4.4.3. Tiyöüre liçi	43
4.4.4. Tiyosiyanat liçi	43
4.5. Liç Prosesleri	44
4.5.1. Yığın liçi	45
4.5.2. Karıştırma liçi	46
4.5.3. Perkolasyon liçi	47
4.5.4. Basınç liçi	47
4.6. Altının Siyanürlü Çözeltiden Kazanılması	48
4.6.1. Aktif karbona adsorpsiyon	49
4.6.2. Merrill Crowe prosesi	52
4.6.3. Elektrolitik (Elektroliz) kazanım	53
5. MATERYAL ve METOD	54
5.1. Materyal	54
5.2. Metod	59
5.3. Yapay Sinir Ağları (YSA)	61
6. ARAŞTIRMA BULGULARI	65
6.1. Karıştırma liçi	65
6.1.1. Karıştırma hızının altın çözünmesine etkisi çalışmaları	65
6.1. 2. pH'ın Altın Çözünmesine Etkisi Çalışmaları	67
6.1.3. NaCN konsantrasyonunun altın çözünmesine etkisi çalışmaları	68
6.1.4. Katı/Sıvı oranının altın çözünmesine etkisi çalışmaları	70
6.1.5. Sıcaklığın altın çözünmesine etkisi çalışmaları	72
6.2. Perkolasyon Liçi	73
6.2.1. Aglomerasyon	74
6.2.2. Perkolasyon liçi deney sonuçları	76
6.3. Vat Liçi Çalışmaları	81
6.4. Aktif Karbona Adsorplama Çalışmaları	86
6.4.1. Karıştırma liçi CIP çalışmaları	86
6.4.2. Perkolasyon-Vat liçi CIP çalışmaları	88
6.5. Çalışmalardan Elde Edilen Sonuçların YSA İle Tahmininin Modellenmesi	90
7.1. İlk Yatırım Giderleri	97
7.2. İşletme Giderleri	101
7.3. Gelirler ve Başa Baş Noktasının Tespiti	104
8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	106
KAYNAKLAR	109

Şekil 1. 1. Lidya Aslanı Figürlü Elektron Para.....	4
Şekil 1. 2. Altın kristal yapısına sahip görüntü.....	6
Şekil 1. 3. Altınla birlikte bulunan bazı önemli elementler.	6
Şekil 1. 4. Altının kullanım alanlarının dağılımı.	7
Şekil 2. 1. Yüksek ve düşük sülfidasyon yatakların karakteristikleri.....	8
Şekil 2. 2. Epitermal altın yataklarını oluşturan jeotermal sistemin şematik kesiti.....	9
Şekil 3. 1. Dünya altın rezervlerinin 2007-2015 yıllar arasındaki durum grafiği	14
Şekil 3. 2. Dünya altın rezervlerinin ülkelere göre % dağılım oranları	14
Şekil 3. 3. Sudan'daki altın rezervlerinin bölgelere göre dağılım oranları.....	15
Şekil 3. 4. Sudan'daki altın alanları	16
Şekil 3. 5. Dünyada üretilen altın miktarları (2007-2015) (ton).....	18
Şekil 3. 6. 2015 yılında dünya altın üretim değerlendirilmesi	19
Şekil 3. 7. Dünya altın üretiminin ülkelere göre dağılım oranları.....	19
Şekil 3. 8. Sudan'da tarihi altın altınmadenciliği kalıntıları	20
Şekil 3. 9. Sudan'de yıllara göre altın üretim miktarları	21
Şekil 3. 10. port Sudan'daki işletmenin Google Earth konumu	22
Şekil 4. 1. Falcon Konsantratörü'nün şematik görünümü	26
Şekil 4. 2. Knelson konsantratörü'nün şematik görünümü	27
Şekil 4. 3. Multy Gravity Seperator görünümü.	28
Şekil 4. 4. Altın zenginleştirme için kullanılan bir sarsıntılı masa	29
Şekil 4. 5. Flotasyon işleminin şematik gösterimi	30
Şekil 4. 6. Sudan'da küçük ölçekli altın amalgamasyon işletmesi.	31
Şekil 4. 7. Altın çözündürülmesinde kullanılan çözücüler ve çalışma aralıklarının etkili oldukları redoks potansiyeli ve asitlik derecesi üzerinden karşılaştırılması	33
Şekil 4. 8. pH'a bağlı olarak CN ⁻ /HCN konsantrasyon dengesi	35
Şekil 4. 9 Siyanür konsantrasyonunun altın ve gümüş özünmesine olan etkisi (Üstteki eğri Au çözünmesi, alttaki eğri Ag çözünmesi)	36
Şekil 4. 10. Oksijen basıncına bağlı çözünme hızlarının değişimi: Gümüş örneği (24 °C)	37
Şekil 4. 11. Altın çözünme hızına sıcaklığın etkisi	39
Şekil 4. 12. Yığın liçi uygulaması.....	45
Şekil 4. 13. Aktif karbon kolonları	46
Şekil 4. 14. Karıştırma liçi tank sisteminin şematik görünümü.....	47
Şekil 4. 15. Endüstriyel proseslerin dünya altın üretimindeki payı	48
Şekil 5. 1. Çalışmalar için numune alınan artık yığını.....	54
Şekil 5. 2. Laboratuvar ölçekli çubuklu değirmen.....	55
Şekil 5. 3. Izgaralı numune bölücü	55
Şekil 5. 4. Olympus marka cevher mikroskobu (Model: SZ61).....	56
Şekil 5. 5 .Çalışmalarda kullanılan numunenin XRD analizi sonuçları	57
Şekil 5. 6. Çalışmalarda kullanılan numunenin elek analizi sonuçları	57
Şekil 5. 7 . Numuneden elde edilen gravite konsantrasyonunun cevher mikroskobunda çekilmiş görüntüleri. (60x) (C: bakır oksit, Q: kuvars, M: manyetit, P: pirit, Au: altın)	58

Şekil 5. 8. Karıştırma liçi çalışmalarında kullanılan deney düzeneği	59
Şekil 5. 9. Çözeltinin kimyasal analizleri için kullanılan Atomik Absorpsiyon Spektrofotometre.	60
Şekil 5. 10. Genel çok katmanlı YSA yapısı	62
Şekil 5. 11. Yapay sinir hücresi	63
Şekil 6. 1. Karıştırma hızının altın çözünmesine olan etkisi	66
Şekil 6. 2. pH'ın Au çözünmesine olan etkisi.....	68
Şekil 6. 3. NaCN konsantrasyonunun Au çözünmesine olan etkisi.....	69
Şekil 6. 4. Katı/sıvı oranının Au çözünmesine olan etkisi.....	71
Şekil 6. 5. Sıcaklığın Au çözünmesine olan etkisi.....	72
Şekil 6. 6. Perkolasyon çalışmalarında kullanılan deney düzeneği.	74
Şekil 6. 7. Peletleme deneylerinde kullanılan hazne ve bilyalı değirmen ünitesi.....	75
Şekil 6. 8. 7 g çimento 100 g numune üzerinde gerçekleştirilen aglomerasyon sonuçları.	76
Şekil 6. 9. 10 mL/dak çözelti akışı için elde edilen Au çözünme verimleri.	77
Şekil 6. 10. Perkolasyon liçi çalışmalarında kullanılan liç düzeneği.....	78
Şekil 6. 11. Çeşitli çözelti debilerinde 7/100 (w/w) çimento/numune oranında yapılan deney sonuçları.	79
Şekil 6. 12. Çeşitli çözelti debilerinde 9/100 (w/w) çimento/numune oranında yapılan deney sonuçları.	80
Şekil 6. 13. Vat liçi deney düzeneği.	82
Şekil 6. 14. Vat liçi deney sonuçları	83
Şekil 6. 15. Çeşitli süreler için perkolasyon-Vat liçi sonuçları	84
Şekil 6. 16. Adsorpsiyon çalışmalarında kullanılan granül aktif karbon.....	86
Şekil 6. 17. Karıştırma liçinde CIP deneyleri için hazırlanan numuneler.	87
Şekil 6. 18. Karıştırma liçi CIP sonuçları.	88
Şekil 6. 19. Perkolasyon-vat liçi CIP sonuçları.	89
Şekil 6. 20. 96 adet eğitim deneysel verinin YSA ile elde edilen 96 verinin karşılaştırılması.....	93
Şekil 6. 21. 72 adet test deneysel verinin YSA ile tahmin edilen 72 verinin karşılaştırılması.....	93
Şekil 6. 22. 96 adet eğitim deneysel verinin YSA ile elde edilen 96 veri ile korelasyonu.	94
Şekil 6. 23. 72 adet test deneysel verinin YSA ile elde edilen 72 veri ile korelasyonu .	94
Şekil 7. 1. Yıllara göre altın Ons fiyatındaki değişim (haftalık grafik).....	104
Şekil 7. 2. Kurulması planlanan tesisin aya bağlı gelir-gider grafiği.....	105

Çizelge 1. 1. Tabiatta altın içeren bazı mineraller	5
Çizelge 3. 1. Dünya altın rezervlerinin ülkelere göre dağılım durumu	13
Çizelge 3. 2. 2007-2015 yıllar arası altın üretim miktarı ton/yıl	18
Çizelge 3. 3. Sudan’da altın üretimi yapan şirketler ve yatak tipleri.	23
Çizelge 5. 1. Çalışmalarda kullanılan numunenin XRF analiz sonuçları.....	56
Çizelge 5. 2. Elek analizi sonucu elde edilen her bir fraksiyonun altın analizi sonuçları.	58
Çizelge 5. 3. Aktivasyon fonksiyonları	64
Çizelge 6. 1. Karıştırma hızının Au çözünmesine olan etkisi.....	65
Çizelge 6. 2. pH’ın Au çözünmesine olan etkisi.....	67
Çizelge 6. 3. NaCN konsantrasyonunun Au çözünmesine olan etkisi.....	69
Çizelge 6. 4. Katı/sıvı oranının Au çözünmesine olan etkisi.....	71
Çizelge 6. 5. Sıcaklığın Au çözünmesine olan etkisi.....	72
Çizelge 6. 6. 10 mL/dak çözelti akışı için elde edilen Au çözünme verimleri.	77
Çizelge 6. 7. Çeşitli çözelti debilerinde 7/100 (w/w) çimento/numune oranında yapılan deney sonuçları.	79
Çizelge 6. 8. Çeşitli çözelti debilerinde 9/100 (w/w) çimento/numune oranında yapılan deney sonuçları.	80
Çizelge 6. 9. Vat liçi deney sonuçları.	82
Çizelge 6. 10. Çeşitli süreler için perkolasyon-Vat liçi sonuçları.	84
Çizelge 6. 11. Karıştırma liçi CIP sonuçları.	87
Çizelge 6. 12. Perkolasyon-vat liçi CIP sonuçları.	89
Çizelge 6. 13. 15, 30, 45 ve 60 dakikalık liç süreleri için eğitmek amaçlı verilen 96 adet veri.	91
Çizelge 6. 14. 75, 90 ve 120 dakikalık liç süreleri için test ve tahmin amaçlı verilen ...72 adet veri.....	92
Çizelge 7. 1. Kurulması planlanan tesisin ilk yatırım giderleri.....	101
Çizelge 7. 2. Kurulması planlanan tesisin tahmini giderleri.	104

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

g: Gram
µm: Mikrometre
t: Ton
mL: Mililitre
mol: Maddenin mol miktarı
M: Molar
Dev/dak: dakikada devir sayısı
Dak.: dakika
YSA: Yapay sinir ağıları
AAS: Atomik Absorpsiyon Spektrometresi

1.GİRİŞ

Altın, Latince parlak/parlayan anlamına gelen "aurum" kelimesinden türetilen ve periyodik cetvelde "Au" sembolü ile temsil edilen parlak sarı ve yumuşak bir metaldir. Altın, tabiatta serbest olarak bulunması, yumuşaklığından dolayı kolay işlenebilmesi, korozitif kimyasal maddelere karşı dayanıklılık göstermesi ve insanların ilgisini çeken parlak sarı renge sahip olması nedeniyle uzun zamandır insanların aradığı önemli ve değerli bir metal olmuştur(Aslan, 1999). Özgül ağırlığı 19.3 g/cm^3 gibi oldukça yüksek bir değere sahip olan altın periyodik cetvelde 1b alt grubunda yer almaktadır. Ergime sıcaklığı yaklaşık $1064 \text{ }^\circ\text{C}$ olup $2856 \text{ }^\circ\text{C}$ sıcaklığında kaynamaktadır. 197 g/mol atom ağırlığına sahip olan altının atom numarası ise 79'dur. 1 gram altından 1 m^2 alanında levha üretilebilecek kadar yumuşaktır. Atom yarıçapı altın ile $\pm\%15$ yakın olan metaller ile kolayca alaşım meydana getirebilme özelliğine sahiptir. Alaşımlama altının değerini düşürürken ona bazı özellikler katabilmektedir (Greenwood ve Earnshaw, 2012). Altın-bakır alaşımları kırmızı renkte altın, alüminyum alaşımı mor, demir eklenmesi mavi, platin veya gümüş alaşımı beyaz/yeşilimsi beyaz ve bizmut alaşımları siyah renkte altın üretimine neden olmaktadır (Erdem, 2006).

Ülkemizde bir alaşımdaki altın nispeti/oranını göstermek amacıyla "ayar" terimi kullanılmaktadır. 24 ayar piyasada saf ($\%99.999 \text{ Au}$) altın olarak bilinir. Ayarlar piyasa şartlarında genellikle 22 ($\%91.667 \text{ Au}$), 18 ($\%75 \text{ Au}$), 14 ($\%58.333 \text{ Au}$) ve 8 ($\%33.333 \text{ Au}$) ayar altınlar satılmaktadır. Ayrıca altın ticaretinde altının ağırlığı "Ons" terimi ile ifade edilir. Ons terimi aynı zamanda "Troy" olarak da ifade edilmektedir. 1 Troy/Ons altının ağırlığı yaklaşık olarak 31.1035 g 'dır. Dünyada altının alım ve satış işlemlerinde fiyatlarının değerlendirilmesinde Troy yerine daha çok Ons terimi kullanılmaktadır (Yurtoğlu, 2019).

Bunun yanı sıra, gümüş ile beraber bulunabilmesi nedeniyle gümüş alaşımlı altın paralarda ortaya çıkmaya başlamıştır. Altının ticarete kullanılan bir değer olması aynı zamanda gücün ve statünün bir sembolü olarak kullanılması sonucunu ortaya çıkarmış, zenginliğin, refahın ve iç huzurun bir göstergesi haline gelmiştir. Bununla birlikte süs eşyası olarak kullanımı ve aynı zamanda ülke yöneticilerinin iktidarının bir sembolü haline gelmiş eşyalar olarak da tarihte yerini almıştır. Altın, ülke zenginliklerine sahip olmanın o ülkenin değerli metal ve taşlarını ele geçirmek anlamına geldiği o dönemlerde savaşların bir nedeni olarak sorumlu tutulmuştur. Çünkü altının ticarete bir değer olarak kullanılması bir ülke için geniş-zengin altın yataklarına sahip olmak çok

miktarda hazinede altın stoğuna sahip olmak anlamına gelmekte ve diğer ülkelere karşı ekonomik, siyasi ve askeri anlamda üstün olması anlamı taşımaktaydı (Aslan, 1999).

Zamanla ekonomik şartların değişerek gelişim göstermesi altının ekonomi ve siyasetteki rolünü azaltmış daha çok süs eşyası, gelişmemiş toplumlar için yatırım aracı ve endüstriyel amaçlarla kullanımı artmıştır. Bu durum ABD Merkez Bankası'nın rezerv para olarak altını çıkartması ve Petro-Dolar olarak kendi para rezervini ilan etmesi ile hız kazanmıştır. Birçok ülkede ABD doları rezerv para olarak kabul edilmesine karşın yine de ülke merkez bankaları altın rezervi tutmaya devam etmektedir. Çünkü ekonomik buhranlarda ve savaş hallerine altın sığınılacak bir liman olarak hala kabul görülmektedir. Çünkü gerçek para altın ve gümüş dahil diğer değerli metallerden oluşmaktadır (Aslan, 1999; Seyidoğlu, 2003).

Günümüzde altın değerini birçok anlamda korumaktadır. Dünya ekonomisinde bir mal veya ürünün değeri onun arzı ve ona olan talep ile ölçülür. Atının arzı dünyada oldukça sınırlıdır. Gümüşün altın karşısındaki değer oranı Amerika kıtasının keşfinden önce ağırlıkça 1/7 (Au/Ag, w/w) iken gümüş arzının bollaşması nedeniyle günümüzde (2023) bu değer 1/81'e kadar düşmüştür. Sınırlı bir rezerve sahip olan altın dünyada yapılan altın üretiminden çok sınırlı olarak etkilenmektedir. Çünkü arz-talep ilişkisi altının değerini korumaya pozitif anlamda yardımcı olmaktadır.

1.1. Tez amacı ve Önemi

Dünyanın birçok yerinde toksit etkisine rağmen cıva amalgamasyonu yöntemiyle altın üretimi devam etmektedir. Bu tür işletmelerde kullanılan cevherin mineralojik yapısı başta olmak üzere birçok nedenden dolayı altının tamamı cıva içerisine alınamamaktadır. Cıva ile yapılan işlemler sonucu geriye kalan posalar atıl bir şekilde beklemektedir. Bu tür artıkların değerlendirilmesi ve içerisindeki altının ekonomiye kazandırılması önem arz etmektedir. Üretim sonrası geriye kalan posa işletmelerin bulunduğu alanın dışına atılmaktadır. Posada yapılan kimyasal analizler sonucu ortalama 3 g/ton Au bulunduğu tespit edilmiştir. Altın madenciliğinde 1 g/ton Au tenörlü yataklar ekonomik olarak işletilebilmektedir. Bu işletmelerde altının maden ocağından çıkarılması, nakliyesi, boyut küçültme işlemleri vb. maliyetli işlemler de dikkate alındığında 3 g/ton Au içeren ve siyanürleme işlemlerine hazır halde bekleyen bu artıkların önemi artmaktadır.

Bu tez önerisi kapsamında; Port Sudan bölgesinde bulunan posalar içerisindeki altının siyanürleme yöntemiyle kazanım şartlarının belirlenmesi, elde edilen çözeltiden altının aktif karbona adsorbsiyonu ve metalik altın üretim şartlarının belirlenmesi amaçlanmaktadır. Ayrıca çalışmaların olumlu sonuçlar vermesi halinde; ilgili posa yığınlarının siyanürleme yöntemiyle işletilmesi durumu için işletmenin fizibilitesi ile ilgili çalışmalarda yapılmıştır.

1.2. Altının Tarihçesi

Dünya üzerindeki madenler, insanlar tarafından 10.000-12.000 yıl önce keşfedildiği ileri sürülmektedir. Altından yapılmış süs eşyaları, Neolitik döneme (MÖ 5000-4000) ait kültürel katmanlarda arkeolojik kazılar neticesinde bulunmuştur. Afrika, Asya ve Güney Avrupa'da M.Ö. 3.000-2.000 yılları arasında ihtiyaç duyulan altın, plaser yataklardan sistematik olarak çıkarıldığı düşünülmektedir. Madencilik tarihine ilişkin ilk belge M.Ö. 3500 yıllarına dayanan antik Mısır'da bulunmuştur (Oygür, 1990). Altın madenciliğinin antik Mısır'lıların saf altın üretimi ile başladığı, buradan Mezapotamya, Anadolu ve Arap yarımadasına kadar yayıldığı sanılmaktadır. İleriki yıllarda altın madenciliğinin Etiyopya üzerinden Afrika'nın iç kesimlerine yayıldığı tahmin edilmektedir. Bilinen kayıtlara göre altın M.Ö. 3200'lü yıllarda antik Mısır'lılar para olarak basmışlardır. Parlaklığı ve uzun yıllar okside olmaması nedeniyle MÖ 550 yıllarında Lidya hükümdarı Krezos'un para olarak bastırması ile ticari işlemlerde bir değer olarak kabul edildiği ileri sürülmektedir (Türe ve Yılmaz, 2000).



Şekil 1. 1. Lidya Aslanı Figürlü Elektron Para

Aynı yıllarda Mısırlıların ticaretin gelişimine paralel olarak altın alaşımlama ve döküm teknikleri geliştirerek paranın değeri konusunda geliştirmeler yaptığı ileri sürülmektedir. O dönemde Roma imparatorluğu kayda değer altın üretimi ile zirveye taşınmıştır ki; o dönem için dünya altın üretiminin 2/3'ünü Roma imparatorluğu tek başına gerçekleştirmektedir. Roma imparatorluğunun dağılması ile üretimin gerçekleştiği bölgeler çeşitli devletlerin egemenliğine girmiş ve altın üretimi aksamıştır (Pekcan, 1998). İstanbul'un fethinden sonra baharat yollarının Müslümanların eline geçmesi sonrası Avrupalılar yeni ticaret yolları arayışına girmişlerdir. Bunun neticesi olarak Amerika kıtası keşfedilmiştir. Bu keşif sonrası 1511'de İspanyol kaşifler altın aramak için bu kıtanın çeşitli yerlerine gönderilmiştir. Bulunan madenlerde irili ufaklı altın ve gümüş madenlerinde üretim başlatılmıştır. Üretim daha çok gümüş olarak gerçekleştiği için altın/gümüş rasyosu dünya genelinde bozularak büyümesine neden oldu. Daha sonraki yıllarda Kuzey Amerika'da "altına hücum" furyası döneminde altın üretimi artmaya başlamıştır (Van Hinsberg, 2008).

1.3. Altın Mineralleri

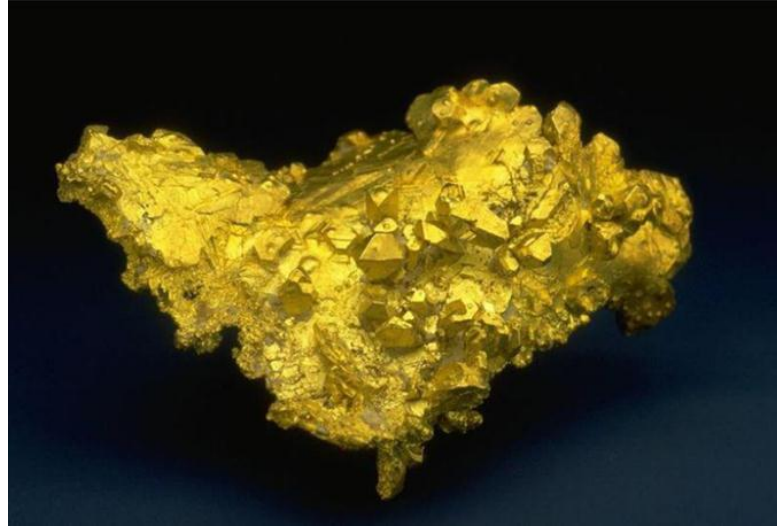
Cevher mikroskobu ve fiziksel olarak yapılan bir analizde altın, düşük sertlik, parlak renk ve yüksek yansıtma gibi çeşitli özelliklerden dolayı kolayca tanımlanabilir. Altın çoğunlukla doğal (nabit) olarak bulunur. Bunun yanı sıra çeşitli mineraller ile beraber bizmut, bakır, cıva, gümüş, tellür bileşikler veya refrakter minerallerle de (sülfürlü mineraller) oluşabilir (Yücel, 1995). Aslında yeraltından çıkarılan altın saf

değildir. İçerisinde birçok elementi bulundurduğu dünyanın farklı bölgelerinden çıkarılan altın cevherlerinin mineralojik çalışmaları ve analizleri ile ısıtlanmıştır. Bu mineralojik çalışmalar ve analizler altın içerisinde 30 civarında elementin altına eşlik ettiğini göstermiştir. Yapılan çalışmalar sonucu altına en çok eşlik eden elementlerin gümüş, bakır ve demir olduğu bildirilmiştir. Çizelge 1.1’de bazı altın mineralleri ve içerdiği altın oranları verilmiştir. Altınla birlikte bulunan bazı önemli elementler Şekil 1.3’de verilmiştir.

Çizelge 1. 1. Tabiatta altın içeren bazı mineraller (Yıldız ve ark., 2010).

Adı	Kimyasal Formülü
Nabit Altın	Au(± diğer metaller)
Petzit	Ag ₃ AuTe ₂
Kennerit	(Au,Ag)Te ₂
Tetsit	(Au, Ag)Te
Silvanit	(AuAg)Te ₄
Kalaverit	Au(Ag)Te ₂
Rodit	Au(Pt, Rh, Fr, Pd)
Aurostibit	AuSb ₂
Aurokuprit	Au ₂ Cu ₃
Elektrum	Au-Ag alaşımı

Altın, doğada bazen muntazam olmasa da kristalli yapıda bulunabilir (Şekil 1.2). Kristaller çoğunlukla tel, külçe, pul ve levha biçimindedirler. Altın kübik, dodekahedral ve oktahedral gibi kristal yapısına sahip olabilmekte ve altın yüzeylerinin görünen kısımlarında yaprağımsı, ipliğimsi ve küresel şekiller de gözlemlenmektedir (Çelik, 2005) .



Şekil 1. 2. Altın kristal yapısına sahip görüntü (MTA, 2016)

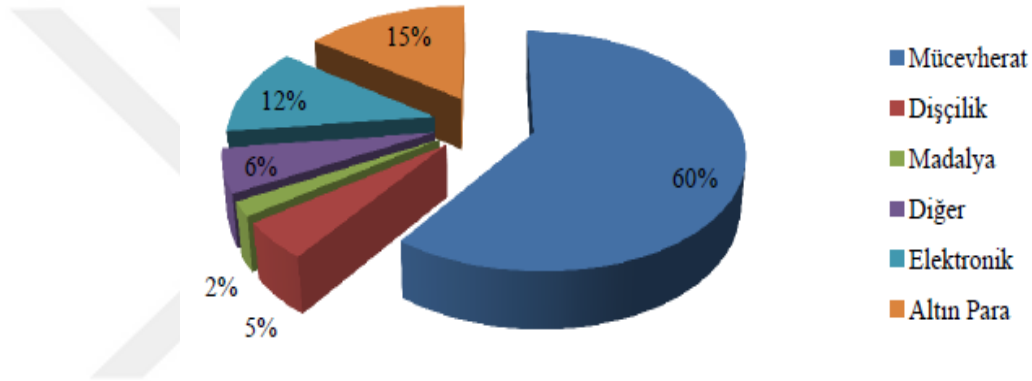
1	2	13	14	15	16	17	18
H 1.01	He 4.00	B 10.81	C 12.01	N 14.01	O 16.00	F 19.00	Ne 20.18
Li 6.94	Be 9.01	Al 26.98	Si 28.09	P 30.97	S 32.07	Cl 35.45	Ar 39.95
Na 22.99	Mg 24.31	K 39.10	Ca 40.08	Sc 44.96	Ti 47.88	V 50.94	Cr 52.00
Fe 55.85	Cu 63.55	Zn 65.39	Ga 69.72	Ge 72.61	As 74.92	Se 78.96	Br 79.90
Kr 83.80	Rb 85.47	Sr 87.62	Y 88.91	Zr 91.22	Nb 92.91	Mo 95.94	Tc (98)
Ru 101.07	Rh 102.91	Pd 106.42	Ag 107.87	Cd 112.41	In 114.82	Sn 118.71	Sb 121.76
Te 127.60	I 126.90	Xe 131.29	Ba 137.33	La 138.91	Ce 140.12	Pr 140.91	Nd 144.24
Pm (145)	Sm 150.36	Eu 151.96	Gd 157.25	Tb 158.93	Dy 162.50	Ho 164.93	Er 167.26
Tm 168.93	Yb 173.05	Lu 174.97	Hf 178.49	Ta 180.95	W 183.84	Re 186.21	Os 190.23
Ir 192.22	Pt 195.08	Au 196.97	Hg 200.59	Tl 204.38	Pb 207.2	Bi 208.98	Po (209)
At (210)	Rn (222)	Fr (223)	Ra (226)	Ac (227)	Th (232)	Pa (231)	U (238)
Np (237)	Pu (244)	Am (243)	Cm (247)	Bk (247)	Cf (251)	Es (252)	Fm (257)
Md (258)	No (259)	Lr (262)	Rf (261)	Db (262)	Sg (266)	Bh (264)	Hs (265)
Mt (268)	Ds (271)	Rg (272)	Cn (276)	Nh (277)	Fl (282)	Mc (288)	Lv (293)
Ts (294)	Og (294)						

Şekil 1. 3. Altınla birlikte bulunan bazı önemli elementler.

1.4. Altının Kullanım Alanları

Altının ekonomik ve ticari değerinden dolayı günümüze kadar üretilmiş altının önemli bir bölümü ülkelerin merkez bankalarının rezervlerinde saklanmaktadır. Altın, parlak sarı ve çekici görünümü nedeniyle her zaman ilgi çeken bir metal olmuştur. Bu nedenlerden dolayı tarihsel süreçler boyunca altın takı olarak kullanılmıştır. Kalıplanma/şekillendirme kolaylığı, elektrik iletkenliği ve oksidasyona karşı dayanıklılığı nedeniyle endüstriyel, elektronik, havacılık, medikal, dişçilik, dekoratif ve mühendislik alanlarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Altının endüstriyel kullanımının önemli bir nedeni de diğer element ve bileşiklere karşı reaksiyon verme

eğiliminin düşük olmasıdır ki; en az reaktif olan metallerin başını çekmektedir. Altın, organik veya biyolojik reaksiyonlara neden olmadığı için diş hekimliğinde ve tıpta geniş uygulama alanı bulmuştur. Altın dövülebilir yumuşak bir metal olması nedeniyle ince teller halinde çekilebilir veya çok ince plakalar halinde şekillendirilebilir. Altının bu eşsiz özelliği nedeniyle altına elektriksel bağlantılar, bilgisayar malzemeleri ve iletişim cihazları için çok değerli bir kullanım alanı sunmaktadır. İletkenliği en yüksek metal olması nedeniyle özellikle bilgisayar devrelerinde kullanımı tercih edilir (Atay, 2013). Altın metalinin kullanım alanının dağılımı Şekil 1.4'te verilmiştir.

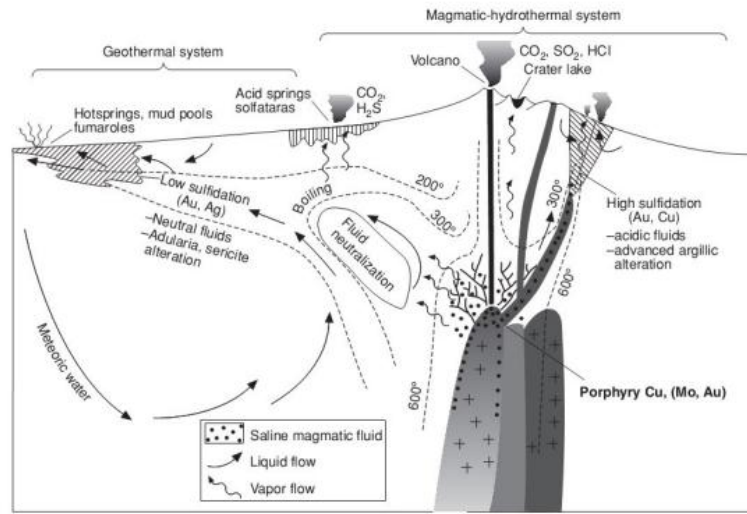


Şekil 1. 4. Altının kullanım alanlarının dağılımı (MTA, 2016).

2. ÖNEMLİ ALTIN YATAK TIPLERİ VE OLUŞUM SÜREÇLERİ

Altın yataklarının meydana gelmesi bir çok faktöre bağlıdır. Bunlar; cevherin mineralojik yapısı, yatağın oluşum sıcaklığı, altınla birlikte bulunan diğer elementler, altının içinde yer aldığı kayalar ve yatakların oluştuğu jeodinamik ortama bağlı farklı şekillerde sınıflandırılabilir. Altın yataklarına birincil ve ikincil yataklar olarak bakılabilir. Jeodinamik ortamlar dikkate alınarak, birincil altın yatakları için yapılan bir sınıflandırma:

- Orojenik yataklar,
- Sedimanter yan kayaçlı yataklar
- Epitermal altın-gümüş yatakları
 - a) Düşük sülfürlü (Adularia-serisit tip) yataklar
 - b) Yüksek sülfürlü (Asit sülfat tip) yataklar



Şekil 2. 1. Yüksek ve düşük sülfidasyon yataklarının karakteristikleri (Hedenquist ve ark., 2000)

- Porfiri bakır-altın yatakları
- Anorojenik demir oksit-bakır-altın yatakları
- VMS ve Sedex (Ekzalatif-sedimanter)

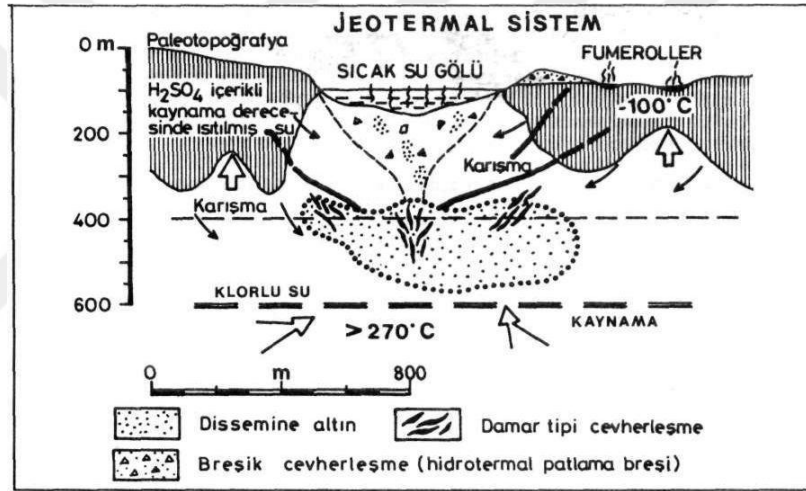
yataklarıdır. Oluşan birincil yataklardan altının taşınmasıyla ikincil tip yataklar oluşmaktadır ki buna “plaser ve karstik” altın yatakları adı da verilir. Güney Afrika Cumhuriyeti’nde bulunan yüksek rezervli ve büyük altın üretiminin yapıldığı

Witwaterstrand altın yatakları da plaser ve karstik yataklardandır. Denizel şartlarda da ikincil altın yatakları oluşabilmektedir (Yıldız, 2007).

Altın yataklarını genel olarak 7 ana grupta sınıflandırmak mümkündür.

2.1. Epitermal Altın Yatakları

300 °C'dan daha düşük sıcaklıklarda yeryüzüne yakın yerlerde oluşmuş hidrotermal cevherleşmelerdir. Bu yataklar genellikle Tersiyer yaşlı dasitikandezitik volkanik kayalarla alakalı oluşmuşlardır. Kayalar içinde çatlaklarda, ezik zonlarda veya çevredeki poroz kayalar içinde silikatlı damarlar, ağsı damarcıklar ve/veya saçınımlar şeklinde bulunabilirler (Şekil 2.1).



Şekil 2. 2. Epitermal altın yataklarını oluşturan jeotermal sistemin şematik kesiti (Kırıkoğlu, 1990)

2. 2. Hidrotermal Altın Yatakları

Hidrotermal altın yatakları epitermal yataklara göre daha düşük sıcaklıklarda ($T < 200$ °C) oluşmaktadır. Bu yataklar epitermal yataklarda olduğu gibi yüzeye yakın bölgelerde travertenimsi kayalar içinde özellikle karbonatlı kayaların taban seviyelerinde oluşan yataklardır. Bu tip altın yataklar bileşimleri açısından altınlı-sülfürlü-kuvarslı, altınlı-kuvarslı, altınlı-gümüşlü-kuvarslı-aduleryalı oluşumlar gibi değişik isimler altında gruplanabilmektedir. Ayrıca bu yataklar içinde altın ya tellüridli bileşikler halinde veya sülfürlü mineraller içinde bakırın yerini alarak zenginleşmekte olsa da nadiren nabit altın oluşumları da gözlenebilmektedir (Gökçe, 1995).

2.3. Silikat Karbonat Kayaçlarıyla (Listvenit Kayaçları)İlişkili Altın Yatakları

Ultrabazik kayaçların yoğun olduğu bölgelerde meydana gelen yatak tipidir. Bu yataklar içinde altın çoğunlukla ultrabazik kayaçlar arasında şekil değiştirmiş bantlar ve mercekler şeklinde meydana gelmiş silikatlı-karbonatlı kayaçlar arasında gözlenmektedir. Fiziksel olarak sert, sarı renkli (limonitik) ve toprağımsı bir görünüme sahiptirler (Gökçe, 1995).

2.3. Alüvyal ve Fosil Alüvyal Tip Altın Yatakları

Yeryüzündeki görünen altın içeren kuvarslı yapı çeşitli şekillerde aşınmaya maruz kalarak zaman içinde fiziksel yapılarını kaybedebilmektedir. Kuvars içerisindeki altın bu şekilde serbest hale gelmektedir. Bu kayaçların düşüş, yuvarlanma, rüzgar, yağmur suyu yıkaması gibi nedenlerle akarsuya veya nehir içine taşınan altın parçacıkları, gravitenin etkisiyle dibe çökerek plaser yatakları oluşturmaktadır. Cevherleşme içerisinde diğer yoğunluğu yüksek mineraller de bulunabilmektedir. Bunlar; monozit, kasiderit, zirkon, safir, topaz, beril, spinel, gümüş, korund, elmas, platinyum, ilmenit, rutil, ve barittir (Kiriş, 1994). Altın kimyasal bozunmaya ve fiziksel parçalanmaya karşı dayanıklı bir metal olması ve özgül ağırlığının yüksekliği nedeniyle plaser yataklarının önemli bileşenlerindendir. Bu tür altın yataklarının zenginleştirilmeleri kolay olduğundan konvansiyonel altın üretiminde önemli paya sahiptirler (Gökçe, 1995).

2.4. Metamorfik Kayaçlardaki Altın Yatakları

Metamorfik kayaçlar içinde zamanla farklı süreçlerle meydana gelmiş altın yataklarıdır. Bunların içinde önemlilik arz eden yataklar ise metamorfizmaya uğramış altın içeren konglomeralar ve siyah şeyller bünyesindeki yataklardır (Kiriş, 1994). Metamorfik kayaçlar içinde bulunabilen arsenopirit oluşumlarına bağlı hidrotermal kökenli altın yatakları ise metamorfizma esnasında meydana gelen hidrotermal çözeltiler vasıtasıyla veya postmetamorfik hidrotermal faaliyetler ile oluşturulmuş küçük taneli ve düşük tenörlü altın yatakları şeklindedirler. Bu yatakların işletilmesinden ziyade plaser yataklarının kaynağını oluşturmaları bakımından önem arz etmektedir. (Gökçe, 1995).

2.5. Mesotermal Altın Yatakları

Çok derin olmayan yer kabuğu seviyelerinde, 200-300 °C sıcaklıkta, yüksek basınçla meydana gelmiş hidrotermal altın yataklarıdır. Porfiri sistemlerde mesotermal sistemin bir oluşum şekli olduğu bilinmektedir (Kiriş, 1994).

2.5.1. Porfiri Altın Yatakları

Porfiri tipi altın yatakları ana mineral altın değildir. Bu mineraller genellikle bakır ve/veya molibdenidir. Bu yatakların altın yatağı olarak değerlendirilmesi için içindeki altın oranının 0.4 ppm'den büyük olması şartı vardır. Yataklanmanın, magmadan sızmış volkanik kayalar ve dik silindirik şeklindeki porfiritik stoklara bağlı geliştiği tahmin edilmektedir. Bozunma sırasında bakır ve altının çoğu yatak kayasına sızar. Altın, sülfürlü mineraller içerisinde ve damar, damarcık ve saçınımlar şeklinde kayaç içinde dağılır (Kiriş, 1994).

2.5.2. Damar Tipi Altın Yatakları

Altın oluşumu, metalik altın ve tellüridler (özellikle petzit) şeklindedir. Yatakların kükürt içeriği düşük olmakla birlikte genel mineraller pirit başta olmak üzere sfalerit, kalkopirit, arsenopirit, galen, ve tetrahedrittir. Gang mineralleri silikatlı kayaçlar, ferrodolomit, serizit ve diğer karbonatlardır (Kiriş, 1994).

2.5.3. Altın Skarnları

Skarnlar, yer kabuğunun derindeki oluşumdan çıkan metalce zengin sıvı ve gazların, karbonatlı bir yatak kayasına denk gelerek saçılmasıyla altın yatakları oluşturmaktadır (Kiriş, 1994).

2.6. Hipotermal Altın Yatakları

Bu yataklar, 300-500 °C gibi yüksek sıcaklık ve basınç ortamında hidrotermal sıvıların alt seviyelerinde oluşurlar. Yatakların genel, oluşum şekilleri; derin deniz

buhar boşalımını, breş bacaları ve ofiyolit ilişkilidir. Breş bacası tipi altın mineralleşmesi, nabit altın veya tellüridler şeklindedir, diğer cevher mineralleri florit, sfalerit, kalkopirit, bornit ve pirittir. Ofiyolitlerle ilişkili Au yataklar sıkça görülebilir yataklar olmayıp, genellikle ofiyolit dizilerinin ultramafik kısımlarında faylanmalara bağlı olarak gelişirler (Kiriş, 1994).



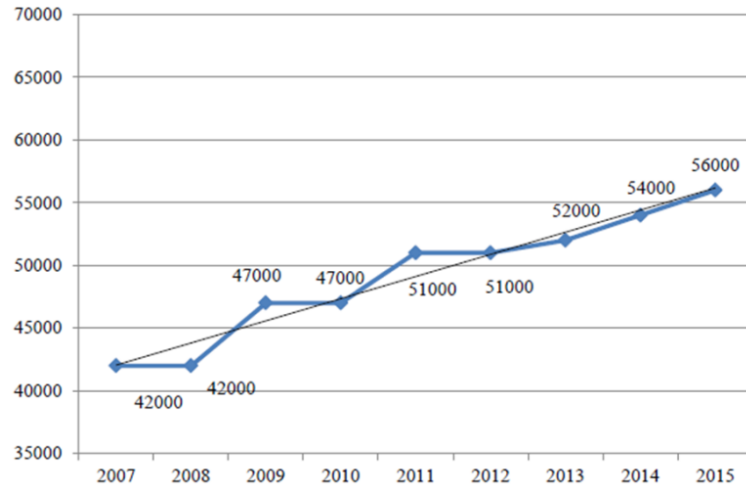
3. DÜNYA ALTIN REZERVLERİ VE ÜRETİMİ

3.1. Dünyada Altın Rezervleri

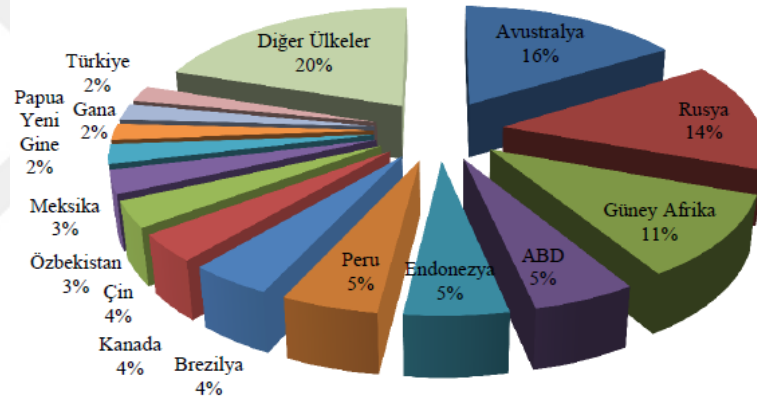
Altın için dünyada bilinen/görünür rezerv olarak muhtelif çalışmalar yapılmıştır. En kapsamlı çalışma 2007 yılında tamamlanmıştır. Bu çalışmaya göre; Amerika Birleşik Devletleri, Peru, Avustralya, ve Güney Afrika Cumhuriyeti'nde toplamda 42.000 ton altın rezervi olduğu tahmin edilmektedir. 2015 yılı için yapılan çalışmada ise bilinen altın rezervlerinin 57.000 ton olduğu hesaplanmıştır. 2007 yılı ile 2015 yılları arası yapılan araştırmalara göre hesaplanan altın rezervleri Şekil 3.1'de verilmiştir. Rezerv olarak en büyük paya sahip ülkeler (Çizelge 3.1) sıralamasında %16'lık payla Avustralya birinci, %14'lük payla Rusya ikinci, %11'lik payla Güney Afrika Cumhuriyeti üçüncü sırayı alırken Amerika Birleşik Devletleri ise dördüncü sırayı almaktadır. Endonezya, Peru, Kanada, Çin ve Brezilya gibi ülkeler de önemli altın rezervlerine sahip olduğu yine bu araştırmalar ile ortaya konmuştur (Şekil 3.2).

Çizelge 3. 1. Dünya altın rezervlerinin ülkelere göre dağılım durumu (MTA, 2016).

Ülke	Rezerv (ton)	Ülke	Rezerv (ton)
Avustralya	9500	Çin	2000
Rusya	8000	Özbekistan	1700
G.Afrika	6000	Papua Yeni Gine	1500
ABD	3000	Meksika	1400
Endonezya	3000	Türkiye	1000
Peru	2400	Gana	990
Brezilya	2400	Diğerleri	12000
Kanada	2400	Toplam	57000



Şekil 3. 1. Dünya altın rezervlerinin 2007-2015 yılları arasındaki durum grafiği (MTA, 2016)



Şekil 3. 2. Dünya altın rezervlerinin ülkelere göre % dağılım oranları

3.2. Sudan'daki Altın Rezervleri

Sudan, Sahra Altı Afrika'da büyük altın rezervlerine sahip olmasına rağmen dünya sıralamasında yeri gösterilmemektedir. Bunun ana nedeni; yapılmış arazi ve rezerv çalışmalarının dünya envanterine yansımamış olmasıdır. Ayrıca bu ülkede üretim yapan yabancı şirketlerin üretimi ve çalıştığı sahalar için yaptıkları rezerv çalışmaları hakkında kamuoyunu yeteri kadar bilgilendirmedikleri bilinmektedir. Siyasi nedenlerden dolayı rezerv ve üretim konusunda bilgi almak neredeyse imkânsız haldedir. Ancak, yerel bazı grupların altın üretimi konusunda yaptığı çalışmalar ile rezevin ne denli çok olduğu anlaşılmaktadır. Öyle ki yerel halk geleneksel yöntemler ile sezonsal altın üretimi yapıp geçimlerini sağlayabilmektedir. Bu nedenle Sudan, geniş geleneksel altın madenciliği

(Senanayake, 2005), alanlarına sahip bir Sahra altı Afrika ülkesi olarak sınıflandırılmaktadır (West ve ark., 2015). 2016 yıllarına doğru altın üretmeye hevesli firmaları Sudan'a çekmek için çeşitli rezerv çalışmaları yapılmıştır. Yeterli olmayan bu çalışma Sudan'a ait altın rezervlerinin miktarından çok bölgelere göre oransal dağılımı konusunda yapılan bir çalışmadır. Bu oransal değerler Şekil 3.3'de verilmiştir.

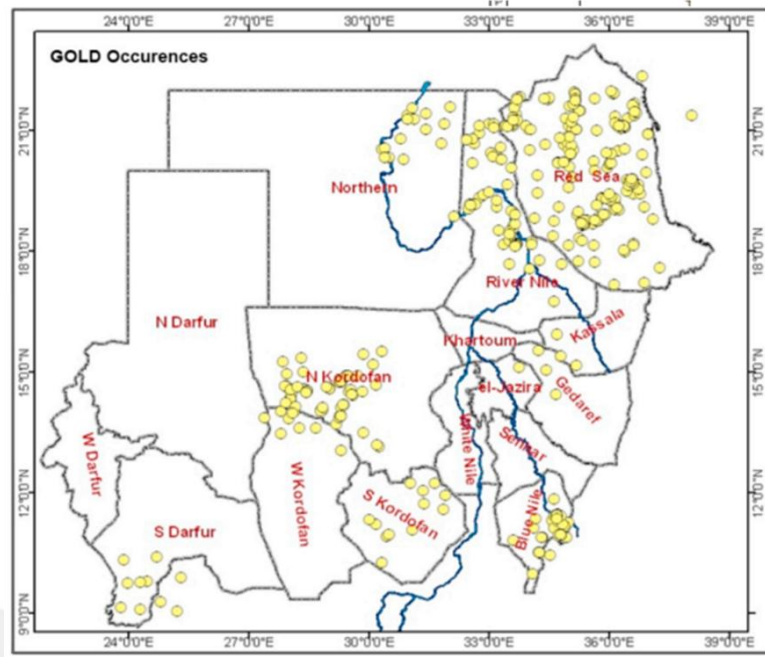


Şekil 3. 3. Sudan'daki altın rezervlerinin bölgelere göre dağılım oranları (Kumar ve Wang, 2016).

Sağlıklı olmayan bu verilere göre bu tez çalışmasına konu olan Port Sudan bölgesinde bulunan altın rezervleri toplam altın rezervinin %9'unu oluşturmaktadır.

3.3. Sudan'daki Altın Alanları

1. Eriab belt –arbaat belt .
2. Dordab belt - Sinkat .
3. Qarura belt
4. Blue Nile : Benishangul - Ingasna – Belkoy
5. Jebal Nuba : Termani , Balula , Um Tkack , Petara



Şekil 3. 4. Sudan'daki altın alanları (Kumar ve Wang, 2016).

3.4. Dünyada Altın Üretimi

Dünyada üretimi yapılmış olan altının %40 gibi bir bölümü yatırım amaçlı kullanılırken %10'u teknolojik cihazlar ve sanayinin birçok dalında kullanılmaktadır. Sadece %50'lik bir kısmı takı ve süs eşyası olarak piyasada yerini almıştır. Altın üretimi eski çağlarda gravite yöntemlerine göre yapılırken günümüzde gravite yöntemleri ile altın üretimi toplam üretimin sadece %10'unu teşkil etmektedir. Günümüz için vazgeçilmez gibi görünen siyanürleme yöntemi ile yapılan altın üretimi toplam üretimin %84'ünü kapsarken %4 gibi küçük bir bölümü flotasyon yöntemi ile üretilmektedir (Bhagat ve ark., 1990). Gravite yöntemleri genellikle iri taneli altın cevherleri için kullanılırken, Falcon Konsantratörü gibi santrifüj kuvvetlerine dayalı gravite ayırıcılar ise biraz daha küçük boyutlu serbest altın taneli cevherler için kullanılabilir. Ayrıca çeşitli gravite kuvvetleri ile çalışan konsantratörler de bu amaçla kullanılmaktadır (Derneği, 2011). Gravite yöntemleri dışında ince taneli serbest altın için flotasyon yöntemleri kullanılabilir. Bu yöntem etkili olmakla beraber altının yoğunluğunun yan kayacına göre yüksek olması bazı yüzdürme problemlerine neden olabilmektedir. Serbestleşmenin çok ince tane boyutunda gerçekleşmesi durumunda siyanürleme yöntemleri kullanmak çok daha etkili olabilmektedir (Linge ve Welham, 1997). Düşük tenörlü (1-20 g/ton Au) cevherler içerisindeki altının çıplak gözle görülmesi mümkün olamamakta ve bu tür cevherlerin gravite yöntemleri ile

zenginleştirilmesi zor ve zaman alan bir proses olduğu için bu cevherlerden altının kazanılması için genellikle kimyasal prosesler uygulanmaktadır. Dünyada ekonomik olarak uygulanan kimyasal proseslerin başlıcaları civa ile amalgamasyon, siyanürleme ve tiyoüre prosesleridir. Bu yöntemlerin kimyasal bir proses olması nedeniyle çevresel kötü sonuçları olabilmektedir. Ancak günümüzde geçerliliğini koruyan ve altın üretiminde yaygın olarak tercih edilen siyanürleme prosesidir.

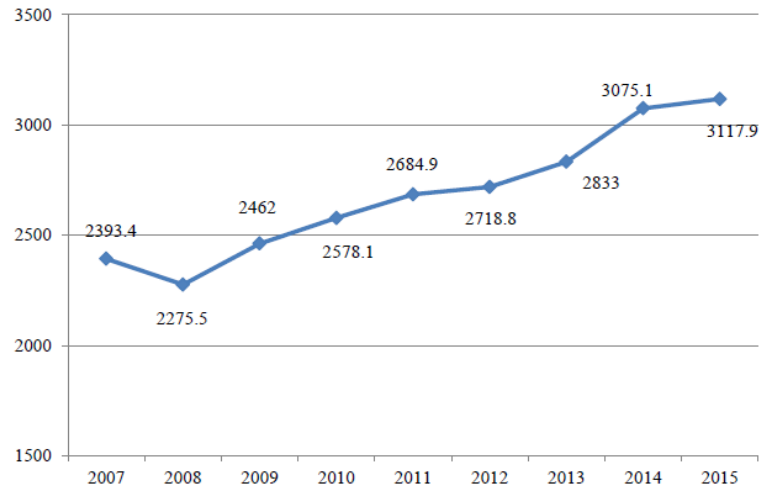
Dünya genelinde siyanür üretimi sodyum siyanür (NaCN) ve potasyum siyanür (KCN) olarak yapılmakta olup toplam siyanür üretimi 1 milyon tondan fazladır. Üretilen siyanürün tamamı altın üretiminde kullanılmamaktadır. Üretimin %80 gibi büyük bir çoğunluğu nitril, naylon ve akrilik plastik kimya endüstrisinde, %2'si ise diğer kimya dallarında ve %18'i gibi hatırı sayılır bir oran ise altın üretiminde kullanılmaktadır (Hilson, 2009).

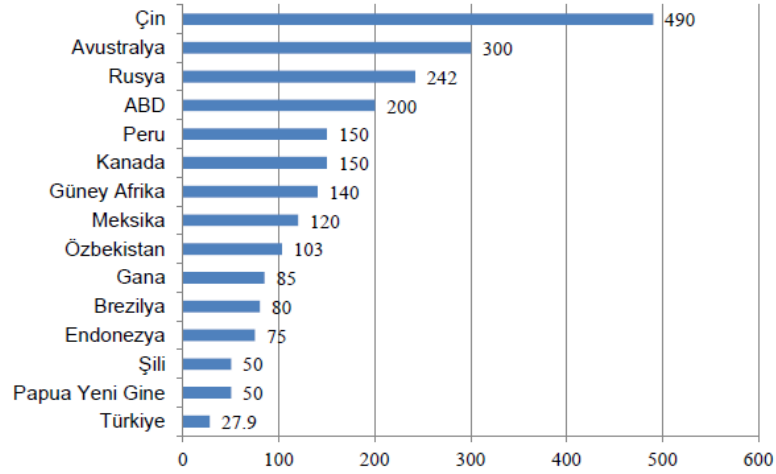
2019 verilerine göre dünyanın toplam çıkarılabilir altın rezervi 42.000 ton olarak hesaplanmaktadır. Toplam görünür rezervi 90.000 ton olduğu ve bu değer %40'ının Güney Afrika Cumhuriyeti için hesaplanan görünür rezerv olduğu bildirilmektedir. Dünya altın madenciliğinde altın üretimi çeşitli yatlardan yapılmaktadır. (Kumar ve Wang, 2016). Bunlar önceki başlıklarda bahsedilen epitermal, porfiri ve lisvenit yataklardır. Altın üretim yönteminin seçiminde yatak tipi, tenör ve mineralojik özellikler dikkate alınır. Altının çeşitli yatak türlerinden ekonomik olarak kazanılması, temel olarak epitermal altın yataklarında bulunan ve yıllardır uygulana gelen siyanür liçi ile basit bir şekilde yapılmaktadır.

Küresel altın üretimi rezevlerin izin verdiği oranda her geçen yıl artmaktadır. 2007 yılında 2.393 ton olan dünyada bilinen altın üretimi, 2015 yılında %30 artarak 3.117 tona ulaşmıştır (Çizelge 3.2). Çizelge 3.2 ve Şekil 3.5'den görüleceği üzere dünya altın üretiminde Çin, ABD, Avustralya, Rusya, Kanada, Güney Afrika ve Peru başı çekmektedir. 2001 yılında Türkiye'de toplam 1.4 ton altın üretimi yapılırken, 2013 yılında bu üretim miktarı 33,5 tona ulaşmıştır. Bu değerlere göre Türkiye'nin dünya altın üretimindeki payı %1,0 civarında olduğu görülmektedir (Şekil 3.6 ve Şekil 3.7). Anadolu coğrafyasının dünya altın üretiminde önemli bir rol oynadığı anlaşılmaktadır (MTA, 2016). Sudan için paylaşılmış bir altın üretim verisi bulunmamaktadır.

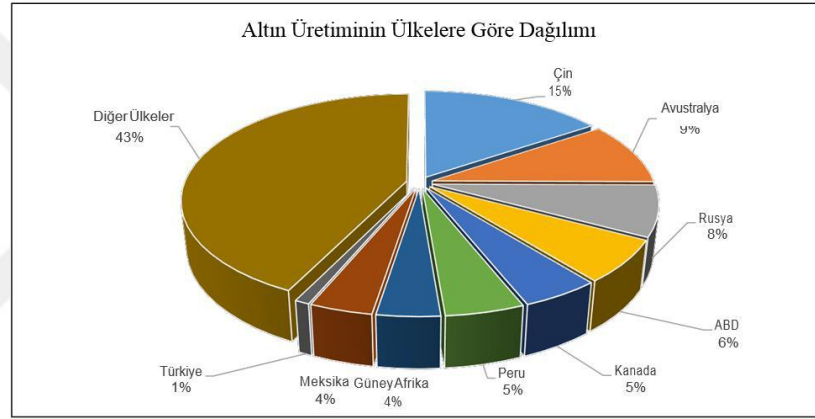
Çizelge 3. 2. 2007-2015 yıllar arası altın üretim miktarı ton/yıl (MTA, 2016)

Ülke Adı	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Avustralya	246	215	222	261	258	250	265	274	300
Rusya	157	176	191	192	200	218	230	247	242
G.Afrika	252	213	198	189	181	160	160	152	150
ABD	238	233	223	231	234	235	230	210	200
Endonezya	118	60	130	120	96	59	61	69	75
Peru	170	180	182	164	164	161	151	140	150
Brezilya	40	50	60	58	62	65	71	80	80
Kanada	101	95	97	91	97	104	124	152	140
Çin	275	285	320	345	362	403	430	450	490
Özbekistan	85	85	90	90	91	93	98	100	103
Papua	65	62	66	68	66	53	57	53	50
Meksika	39	50	51	73	84	97	98	118	120
Türkiye	10.4	11.5	15	17.1	24.9	28.8	33	33.1	27.9
Gana	84	75	86	82	80	87	90	91	85
Şili	42	39	41	38	45	50	51	50	50
Diğer	471	446	490	559	640	655	684	858	855
Dünya Toplamı	2393.4	2275.5	2462	2578.1	2684.9	2718.8	2833	3075.1	3117.1

**Şekil 3. 5.** Dünyada üretilen altın miktarları (2007-2015) (ton)



Şekil 3. 6. 2015 yılında dünya altın üretim değerlendirilmesi (MTA, 2016).



Şekil 3. 7. Dünya altın üretiminin ülkelere göre dağılım oranları (Kumar ve Wang, 2016).

3.5. Sudan'da Altın Üretimi

Genel olarak, Sudan'daki altın madenciliği bilimsel literatürde çok az ilgi görmüştür (West ve ark., 2015). Geleneksel altın madenciliği, Sudan'da MÖ 3. yüzyıldan itibaren Merowe ve Nubian krallıklarında uygulandığı çeşitli arkeolojik kazılardan anlaşılmaktadır. İlerleyen yıllarda ülkeye gelen göçmen Arap'lar ve yöre halkı olan Bijah'lar tarafından Doğu Sudan'da ve Kızıldeniz Dağları'nda ve yakın bölgelerde altın üretimi yaptıkları bilinmektedir (Ahmed ve ark., 2019). Bunun dışında Kuzey Sudan, Kızıldeniz Dağları ve Mavi Nil bölgelerinde Antik Mısır döneminde altın madenciliği yapıldığı yine tarihi kaynaklardan anlaşılmaktadır (İbrahim, 2015).

Sudan, tarihi boyunca üç önemli altın madenciliği aşaması yaşamıştır. Bunlar; antik dönem, erken İslam dönemi ve koloniyal dönemlerdir. Bağımsızlık sonrası ise

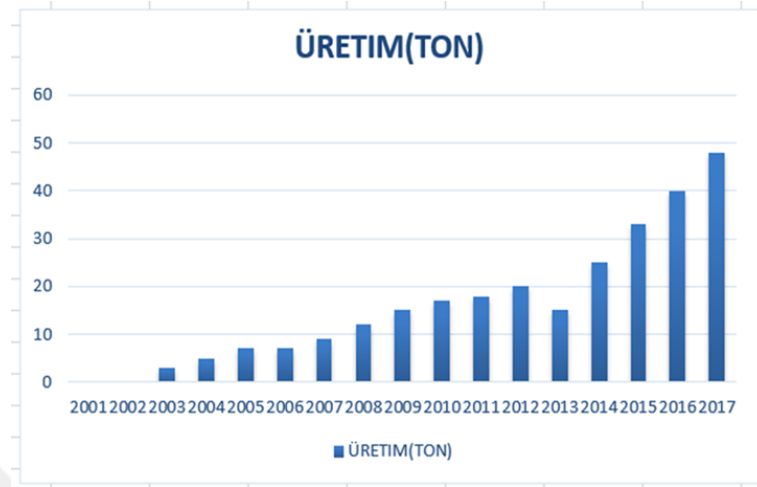
düzensiz madencilik dönemi olarak adlandırılabilcek bir dönem yaşamıştır. Araştırmalara göre Antik Mısır'ın Nubian Çölü ve Karma bölgelerinde altın madenciliği faaliyetlerinin olduğu bilinmektedir.



Şekil 3. 8. Sudan'da tarihi altın madenciliği kalıntıları (Ahmed, 1998)

Antik Mısır altın madenciliği faaliyetlerine M.Ö. 3. yüzyıldan önce başladıkları ve bölgeden çekilmelerinden sonra Nubian Çölü'ndeki Napata Krallığı ile Mavi Nil bölgesindeki Benishangul Dağları'ndaki Kushite Krallığı bu üretimi devam ettirdikleri tarihi kayıtlar ile ortaya konmuştur. Buna ek olarak, Meroe medeniyeti döneminde Sudan Osmanlı İmparatorluğu'nun etkisine girdi. Bu dönemde Sudan'da Osmanlı ordusuna bağlı Muhammed Ali Paşa altın madenciliğine devam etti. Yirminci yüzyılın başına kadar, altın çıkarma işlemleri o dönemin dünyasında olduğu gibi geleneksel yöntemler ile yapılmaktaydı (Ahmed ve ark., 2020) . Dünyada altın üretimi konusunda meydana gelen yeni gelişmelere rağmen Sudan'da geleneksel yöntemler ile altın üretimi halen devam etmektedir. Normalde altın üretimi yapan büyük şirketler siyanürleme yöntemleri ile üretim yaparken, halkın kendi başına yaptığı üretimlerden kaynaklı

geleneksel altın üretiminden bahsedilebilir. Bunun dışında Sudan'da cıva ile amalgamlama yöntemi yine en çok tercih edilen altın üretim yöntemleri arasındadır.



Şekil 3. 9. Sudan'de yıllara göre altın üretim miktarları (Kumar ve Wang, 2016).

Sudan'da altın madenciliği ülkenin güney bölgelerinden kuzeye doğru genişlemiştir. 2008 yıllarında küresel altın fiyatlarının zirve yapması ve yükselişin 2011 yılının Eylül ayına kadar sürmesi yerel halkın altına ulaşma konusundaki faaliyetlerinin artması ile sonuçlanmıştır. Bu dönemde bazı yerel halkların vadiler ve dağlardaki arazi yüzeylerinde adeta bir ordu gibi altın aramaya başlaması kimi bölgelerde bazı altın birikintilerinin keşfedilmesine neden olmuştur (Hussien ve Mohamed, 2020). Gerçekte bu amatör arama çalışmaları eski dönemlerdeki yapılmış olan altın üretim tesislerinin kalıntıları etrafında gerçekleşmiştir. Sudan'da bu kalıntılara yer yer rastlamak mümkündür. Bu terk edilmiş altın ocaklarının etraflarında bol miktarda posa yığınları da rastlanmaktadır (Ahmed ve ark., 2020). Bu eski altın üretim bölgeleri Sudan'ın neredeyse tamamına yayılmıştır. Bu bölgelerden bazıları; Abu Hamad-Seddon, Ubaydia, Wadi Alhimar, Wadi Alsnkir, Wadi Ala'esahr, Um Eltrabeesh, Elshereik, Alnejeem, Al-Kru'nun ve Berberi bölgeleridir. Bunların dışında; Kızıldeniz eyaletleri Haya, Gunneb, Alaoulb, Mavi Nil eyaletinde Jam, Pau, Deir, Kurmuk, Bunni dağları, Benishangul, Karaba tepesi ve Belqoah'da 1 milyondan fazla altın üretimi yapan kişi/aile bulunmaktadır (İbrahim, 2015). Üretim yapanlar arasında hatırı sayılır oranda kadın madenciler de bulunmaktadır.

Teze konu olan Doğu Sudan'daki Kızıldeniz'e kıyılı Port Sudan bölgesinde oldukça büyük altın rezervine sahip altın sahaları bulunmaktadır. Bu sahalardan yabancı

firmaların yanı sıra yöre halkı da altın üretimi yapmaktadır. Yabancı firmalar siyanürleme prosesi ile altın üretimi yaparken (Çizelge 3.3) yöre halkı ise çıkarttıkları cevher içerisindeki altını civa ile amalgam oluşturarak kazanmaya çalışmaktadır. Sudan hükümeti bu tür işletmelerin dağınık ve kontrolsüz bir şekilde çalışmalarını önlemek amacıyla işletmelere sınırları belirlenmiş bir alan tahsis ederek kontrol altına almayı sağlamaya çalışmaktadır. Bu alanlarda 30-35 tane küçük işletme “civa amalgamasyonu yöntemi” ile altın üretimi yapabilmektedir. Bunlardan biri de Port Sudan’ın kuş uçuşu 25 km kuzeyinde bulunmaktadır. Bu bölgelerde amalgamasyon sonrası geriye kalan posa işletmelerin bulunduğu alanın dışına atılmaktadır (Şekil 3.10).



Şekil 3. 10. Port Sudan’daki işletmenin Google Earth konumu

2019 yılı mart ayı verilerine göre bölgede yaklaşık 900 bin ton posa birikimi olmuştur. Posanın tane boyutu 1 mm’nin altındadır. Posanın çeşitli yerlerinden alınan numuneler üzerinde birçok şirketin yaptığı kimyasal analizler sonucu ortalama 3 g/ton Au bulunduğu tespit edilmiştir. Altın madenciliğinde altının piyasa değerine göre 0.5-1g/ton Au tenörlü yataklar ekonomik olarak işletilebilmektedir. Normal bir işletme için maliyet arzeden; cevherin maden ocağından çıkarılması, nakliyesi, boyut küçültme vb. işleri dikkate alındığında ortalama 3 g/ton Au içeren ve siyanürleme işlemlerine hazır halde bekleyen bu artıkların önemi artmaktadır. Yukarıda belirtilen alanda küçük işletmeler tüm gün (24 saat) süreyle üretime devam edilmektedir. Gün geçtikçe artık alanında biriken posa miktarı artmaktadır. Yukarıda ifade edilen 900 000 ton posa içerisinde yaklaşık 165 000 000 USD değerinde altının bulunduğu hesaplanmaktadır. Bu tez önerisi kapsamında; Port Sudan bölgesinde bulunan posalar içerisindeki altının siyanürleme yöntemiyle kazanım şartlarının belirlenmesi, elde edilen çözeltiden altının

aktif karbona adsorbsiyonu ve metalik altın üretim şartlarının belirlenmesi amaçlanmaktadır. Ayrıca çalışmaların olumlu sonuçlar vermesi halinde; ilgili posa yığınlarının siyanürleme yöntemiyle işletilmesi durumu için işletmenin fizibilitesi ile ilgili çalışmalarda yapılmıştır.

Çizelge 3. 3. Sudan’da altın üretimi yapan şirketler ve yatak tipleri.

Şirketler	İller	Yatak tipi
Aryab Madencilik	Port sudan	VMS
Read Madencilik	Abidiya	Epitermal
Ikser Madencilik	Abidiya	Porfiri
Katar Madencilik	Port sudan	Epitermal
Amal Madencilik	Durdeeb	Porfiri
Rus Madencilik	Dongola	Epitermal
Sudan Madencilik	Kurdufan	VMS
Zawaya Madencilik	Almahas	VMS

4. ALTIN ZENGİNLEŞTİRME YÖNTEMLERİ

Altın doğada çeşitli şekillerde bulunabilmektedir. İri parçalar halinde bulunabilmesi durumunda onu insan gözünde görünür yaptığı için kolayca seçilerek alınabilmesine imkan tanır. Cevherleşme/yataklaşma içerisinde altının tane boyutu küçüldükçe insan gözüyle ayırt edilebilmesi zorlaşmaktadır. Bu durumda gravite yöntemleri devreye girerek geleneksel altın üretimi gerçekleştirilebilir. Ancak çok küçük taneli/minerali altın yataklarında altını çıplak gözle görmek imkansız hale geldiği için çeşitli yöntemler ile altının varlığı ortaya konulabilir. Bunun dışında altının/altın içeren mineralin serbest taneler halinde veya nabit halde olup olmadığı, kimi mineraller ile beraber minerallerin kristal yapısında bulunup bulunmadığı konusunda detaylı araştırmalar yapılması bu için doğasında vardır. Çıplak göz ile yapılan analizler, mineralojik analizler ve kimyasal analizler sonucu elde edilen veriler ışığında altın için uygun zenginleştirme/kazanım yöntemleri belirlenip ortaya konulabilir. Kabaca özetlenir ise; gravite ve flotasyon gibi tane serbestleşmesi gerektiren yöntemlerin uygulanabilirliği, yan kayaç özelliklerine bağlı kimyasal yöntemlerin seçimi, ortamda sülfürlü minerallerin varlığı, altının yüzey verebilirliği, oksidasyon şartları ve en önemlisi altın tenörünün işletmeye elverişli olup olmadığı gibi konuların bütünü zenginleştirme yönteminin seçimini etkilemektedir.

İri taneli yüksek rezervli altın yataklaşmasına nadiren rastlanmaktadır. Yüksek rezervli altın yataklarınının genel özelliklerden bir tanesi onun çok ince tane boyutunda serbestleşmesi ile sonuçlanan yataklanmalardır. Bu gibi durumlarda seçilen yöntem/yöntemlere göre altının veya altın içeren minerallerin serbestleşme tane boyutuna kadar öğütülmesi gerekebilir. Öğütme masraflarının ve ilk yatırım maliyetlerinin göz önüne alındığında ekonomik olmasına bağlı olarak ya gravite yöntemleri veya yüzey özelliklerine bağlı fizikokimyasal yöntemler tercih edilebilir. Kimyasal yöntemlerde altının serbestleşmesine ihtiyaç duyulmaz. Altının çözelti ile temas edebileceği bir yüzey vermesi veya altının bulunduğu kayacın gerçirgenlik özellikleri bu yöntemin/yöntemlerin seçimi için yeterlidir (Bhappu, 1990). Bu bağlamda altın için dünyada geçerli olan zenginleştirme/kazanım tercihleri olarak gravite zenginleştirme, flotasyon yöntemleri, civa ile amalgamasyon ve siyanürleme yöntemleri kullanılmaktadır.

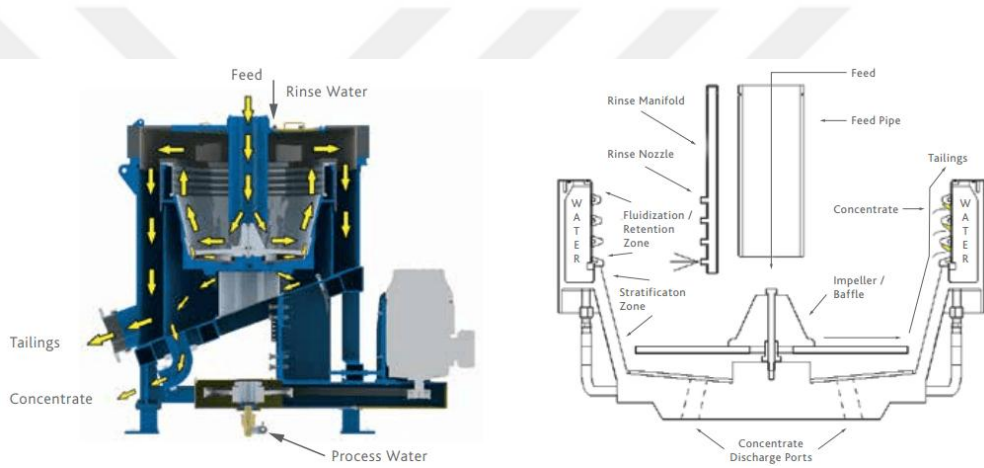
4.1. Gravite Yöntemleri

Gravite yöntemlerinin uygulanabilirliği zenginleştirilecek olan materyalin serbest halde bulunabilirliğine bağlıdır. Bu nedenle plaser altın cevherleşmesi bu işlem adeta biçilmiş kaftan özelliğindedir. Bu amaçla çeşitli zenginleştirme cihazları kullanılmaktadır ve zenginleştirme bir akışkan içerisinde gerçekleştirilir ki bu genellikle sudur. Zenginleştirme işlemleri için geliştirilmiş özel taşınabilir cihazlarına mevcut olmasının yanı sıra en çok bilinen klasik cihazların başında jigler, sarsıntılı masalar, spiral veya düz oluklar gelmektedir. Gravite zenginleştirmesinde iri sayılabilecek boyutlarda serbestleşen altının kazanım verimi %40-70 aralığında olabilirken ince taneler halinde serbestleşen altın için aynı şeyi söylemek mümkün olamamaktadır. Çünkü sistemin işleyişinden dolayı artığa giden altın oranı yüksek olabilmektedir. Bu gibi nedenlerle, farklı tipte ve çalışma prensiblerinde birçok çeşitli gravite ayırıcısı olmasına rağmen, zenginleştirme birimlerinin etkinlikleri ve cevher içindeki altının serbestleşme tane boyutu ile kullanımları sınırlı olmaktadır. Bu bir problem olup, bu problemin çözümüne yönelik çeşitli gravite esasına dayalı bir çok cihaz geliştirilmiştir. Bunlardan en çok tercih edilen cihazların başında Falcon konsantratörü, Knelson konsantratörü ve Multy Gravity Seperator (MGS) gelmektedir. Bu cihazlar, merkezkaç kuvvetinin yanı sıra jigleme hareketinin de etkisi altında tane özgül ağırlığı ile ilgili özelliklerin artırılması prensibine göre çalışmaktadırlar. Bu cihazlar 5 µm tane boyutundaki altın tanelerinin ayrılmasında/kazanılmasında dahi etkileri kanıtlanmıştır. Ancak gravite yöntemlerinde zenginleştirilecek cevherin tane boyutu küçüldükçe tesisin kapasitesi çok azalmaktadır. Bu nedenle, iri boyutlarda serbestleşen altın tanelerinin kazanımında önce gravite yöntemleri ardından işlem/işlemler sonucu elde edilen diğer ürün için flotasyon ve/veya siyanürleme işlemleri uygulanarak zenginleştirme sonucu elde edilen toplam altın kazanım verimi artırılabilir. Çözünme olayı yüzey alanı ile ilişkili olduğundan iri altın tanelerinin siyanürlü çözeltilerde tamamen çözünmesi uzun zaman olduğu için ön zenginleştirme olarak gravite yöntemleri kullanılarak iri tanelerin önceden ayrılması liç süresini azalttığından tesisin toplam çalışma süresi de göreceli olarak azaltılmaktadır. (Feather ve Koen, 1973).

4.1.1. Falcon konsantratörü

Falcon Konsantratörü (Şekil 4.1) 1980 yılının başında Falcon tarafından geliştirilmiştir. Bir çok deneme ve geliştirme sonucu 1986 yılında ilk ticari uygulaması

gerçekleştirilmiştir. Bu cihaz yüksek merkezkaç kuvvetinin etkisi ile aralarında çok az da olsa yoğunluk farkı olan mineralleri birbirinden ayırabilmektedir. Falcon Konsantratörü ince tane boyutlarında bulunabilen aralarında yoğunluk farkı olan her türlü minerallerin ayrılmasında başarılı bir şekilde kullanıldığı için diğer klasik gravite yöntemlerinin artıklarındaki altının geri kazanımında oldukça etkili olabilmektedirler. Uygulanan santrifüj kuvvetinin meydana getirdiği “G” kuvvetinin büyüklüğü dönüş hızının değiştirilebilmesi ile kontrol edilebildiğinden pulp içerisindeki küçük boyutlu ağır minerallerinin konsantrasyonu sağlanabilmektedir. Dönüş hızına bağlı merkezkaç kuvvetinin büyüklüğü 400g ye kadar çıkarılabilmektedir. Bu cihazın en iyi özelliklerinden bir tanesi de -1 mm tane boyutundaki cevherin beslenebilir olmasıdır(Yıldız ve ark., 2010) .

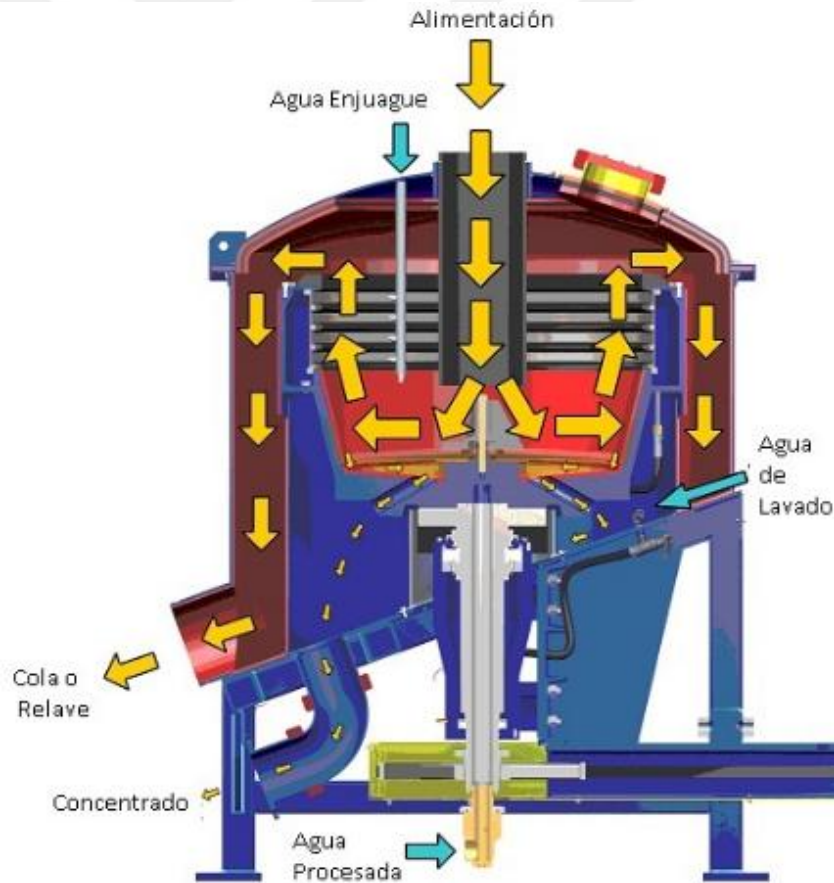


Şekil 4. 1. Falcon Konsantratörü'nün şematik görünümü (Yıldız ve ark., 2010).

4.1.2. Knelson konsantratörü

İnce taneli cevherlerin gravite zenginleştirmesinin düşük altın kazanım verimli ve güç olduğu bilinmektedir. Klasik gravite zenginleştirme aygıtları olan jigler, masalar ve spiraller/oluklar 100 µm tane boyutuna kadar etkin olarak kullanılabilirken bu boyut altındaki tane boyutlarında etkin bir zenginleştirme yapamamaktadırlar. Bu duruma alternatif olarak Falcon Konsantratörü gibi yeni sayılabilecek santrifüj kuvvetlerin etkinliklerine dayalı gravite ayırıcıları geliştirilmiştir. Standart Knelson Konsantratörü tıpkı Falcon Konsantratörü'nde olduğu gibi 1980'li yılların başında Byron Knelson tarafından geliştirilmiştir. Bu konsantratöre beslenen tane boyutu -6 mm olabilmektedir ve genellikle ön konsantre üretimi amaçlı kullanılmaktadır. İnce boyutlu altının zenginleştirilmesinde Knelson Konsantratör diğer klasik (konvansiyonel) gravite

yöntemlere göre oldukça etkin olmaktadır. Knelson Konsantratör merkezkaç kuvvetinin etkili olduğu çanak tipli bir cihaz olup, yüksek hızda dönen oluklu bir konik bölmeden meydana gelmektedir (Şekil 4.2). Bu konsantratör çok geniş bir katı oranında çalışabilmektedir. Konsantre temizleme işlemine kadar konik kısımda birikirken, düşük özgül ağırlıktaki malzeme (artık) cihazın çıkış kısmından suyla birlikte sürekli olarak atılmaktadır. Bu nedenle bu konsantratör konsantrenin alınması için belirli süreler ile durdurulmasından dolayı kesikli çalıştırılmaktadır (Marsden ve House, 2006). Bu konsantratörlerde bir merkezkaç kuvvet alanı içinde engelli çökme sınıflandırması/klasifikasyonu meydana gelmektedir. Merkezkaç kuvvetinin etkisiyle cihazın iç çeperi boyunca uzanan yatay olukların içindeki delikli konik kısım döndüğünde yerçekimi kuvvetinin 50-60 katı kadar bir kuvvet meydana gelmektedir . Bu konsantratörün ana çalışma parametreleri besleme pülp yoğunluğu, konsantrasyon süresi ve yıkama suyu akış hızıdır (Adams, 1990)



Şekil 4. 2. Knelson konsantratörü'nün şematik görünümü (Ferdana ve ark., 2018) .

4.1.3. Multy Gravity Seperator (MGS) (Çoklu Gravite Ayırıcısı)

Bu aygıt İngiliz Teknoloji Grubu desteğinde Richart Mozley tarafından geliştirilerek Multy Gravity Seperator adı altında piyasaya sunulmuştur (Şekil 4.3). Zenginleştirme tesislerinde $-100\ \mu\text{m}$ tane boyutundaki ince ve nisbeten yüksek yoğunluktaki minerallerin kazanılması için klasik gravite yöntemlerine alternatif olarak geliştirilmiştir. Bu konsantratör Falcon ve Knelson Konsantratörü'nde olduğu gibi merkezkaç kuvvetlerini kullanarak zenginleştirme yapmaktadır. Zenginleştirme işlemi zenginleştirilmesi düşünülen materyalin/mineralin yoğunluğuna bağlı olarak $2\ \mu\text{m}$ tane boyutuna kadar gerçekleştirilebilmektedir. Çalışma parametreleri arasında tambur dönüş hızı, tambur eğimi, yıkama suyu miktarı % hızı ve genişliği sayılabilir. Bu nedenle hem sarsıntılı masa hem de jigleme işlemini aynı anda yapabilmektedir (Yıldız ve ark., 2010).



Şekil 4. 3. Multy Gravity Seperator görünümü.

4.1.4. Sarsıntılı masa

Sarsıntılı masalar (Şekil 4.4) gravite zenginleştirme işlemlerinin vaz geçilmezleri arasında bulunan bir aygıttır. Üzerine beslenen pulpün içerisindeki minerallerin yoğunluk farkına göre ayrılmasında yıkama suyu ve masaya verilen eğim etkili iken masa üzerinde bulunan eşiklerin dibinde toplanan nisbeten yüksek yoğunluklu mineraller masanın uç tarafına ileri doğru düşük ileri doğru hareket ve nisbeten daha

çok ivmeli geri doğru hareketin etkisiyle toplanırlar. Zenginleştirilen cevherin tane boyutu masanın eğimini ve üzerinde bulunan eşiğin yüksekliğini belirleyen en önemli unsurlardandır. Tane boyutu küçüldükçe masa eğimi yataya yakın bir eğimle çalışırken eşik yüksekliği de azalır. İnce taneli altın cevherlerinin zenginleştirilmesinde neredeyse yatay sayılabilecek bir eğimde ve eşik yüksekliği yine neredeyse hiç yok denecek kadar kısadır. Tane boyutu küçüldükçe kapasitenin azalması yine bu cihaz için önemli bir handikap olarak önümüze çıkar. Ancak çok etkili bir ayırma yapabilmektedir. Altın zenginleştirmesine uygun olarak çeşitli şekillerde üretimi yapılmaktadır. Bir birine seri halde veya paralel olarak çalıştırılabilmektedir. 40 μm tane boyutuna kadar zenginleştirme yapabilmektedir. Ancak diğer klasik gravite cihazlarında olduğu gibi ince taneli cevherlerde metal kazanım verimi düşük kalmaktadır (Yıldız ve ark., 2010).



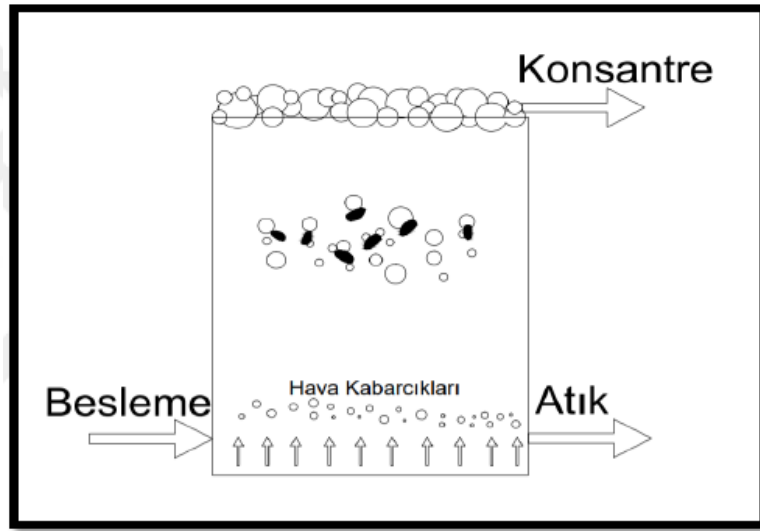
Şekil 4. 4. Altın zenginleştirme için kullanılan bir sarsıntılı masa (Yıldız ve ark., 2010) .

4.2. Flotasyon

Minerallerin fizikokimyasal, diğer bir tabirle yüzey ve arayüzey özellik farkından yararlanılarak gerçekleştirilen bir zenginleştirme/ayırma yöntemidir (Taggart, 1945). İlk defa 1906 yılında düşük tenörlü ve kompleks cevherler içindeki ekonomik değer taşıyan mineralleri kazanmak için kullanılmıştır (Wills ve Finch, 2015). Yine ilk

yıllarda kimi metal ve doğal olarak hidrofob özellik gösteren kömür ve talk gibi mineraller için kullanımı genişlemiş ve madencilik dışında diğer sektörlerde de kullanım alanı bulmuştur. İlk dönemlerde basit yağlar ile gerçekleştirilen bu zenginleştirme yöntemi 1930'lu yıllarda ksantat ve diofosfatlar gibi sulu ortamda etkin bir şekilde çözünebilen ve mineral yüzeyleri ile selektif olarak reaksiyona girebilen kolektörlerin (toplayıcıların) geliştirilmesiyle sülfürlü cevherlerden altın kazanımı sağlanmaya başlanmıştır (Adams, 1990).

Bu yöntemde temel prensip, yüzmesi istenen mineral/minerallerin yüzeyini çeşitli kimyasallar kullanarak hidrofobik (suyu sevmeyen/suyu iten) özellik kazandırmak ve bu yüzmesi istenen mineralleri bir hava kabarcığına bağlayarak flotasyonun gerçekleştiği tank içerisinden yüzeye çıkartarak kazanmaktır. Flotasyon işleminin şematik gösterimi Şekil 4.6.'da verilmiştir.



Şekil 4. 5. Flotasyon işleminin şematik gösterimi (Adams, 1990).

Yüzmesi istenen mineralin yüzeyini hidrofob özellik kazandırmak için kullanılan kimyasallara kolektör (toplayıcı) adı verilmektedir. Toplayıcı reaktifler polar ve nonpolar olmak üzere iki bölümden oluşur. Polar kısım mineral ile etkileşim kurarken nonpolar kısım suyu iten bölümdür. Flotasyonda sadece toplayıcı reaktifler kullanılmaz. Sistemin işleyişinde pH, bastırıcı reaktifler, köpürtücü reaktif ve işlemin pH'ı önemlidir.

Serbest altının flotasyonundan ziyade sülfürlü minerallerin içerisinde bulunan (refrakter altın) altının kazanılması için flotasyon işlemi kullanılmaktadır. Bu nedenle sülfürlü minerallerin flotasyonunda kullanılan prosedür altın flotasyonu için geçerlidir (Dunne, 2005) .

4.3. Cıva İle Amalgamasyon

Plaser altın yataklarından altının kazanımına yönelik gerçekleştirilen bir yöntemdir ve bazen gravite yöntemleriyle elde edilen ön konsantre üzerine de uygulanabilmektedir. Bu işlemde, cevher içerisinde bulunan nisbeten iri taneli altınların cıva ile bir çeşit alaşım (amalgam) yapması ve elde edilen amalgamın distilasyonu ile cıvanın buharlaştırılarak geriye altının kalması prosedürü uygulanır. İşlem sulu ortamda gerçekleştirilmektedir.

Bu işlemde bir hazne içerisine bir miktar cıva eklenir, üzerine ocaktan çıkarılmış cevher veya ön konsantre ürünü beslenir (Şekil 4.7). Sisteme sürekli olarak su verilerek tekerlek şeklindeki değirmen taşıyı andıran bir kütle ile cevher üzerinde dönerek öğütülür. Bu esnada serbest yüzey veren nisbeten iri taneli altın ile cıva temas ettiğinde cıva altını bünyesine alarak jelimsi bir hale dönüşür (Au_xHg_y , Au-Hg amalgamı). İşlem sırasında tane boyutu küçülmüş cevher ise sürekli verilen soyun etkisiyle dışarı alınır. Haznenin dibinden amalgam alınarak gerekli distilasyon işlemleri uygulanır ve altın kazanılmış olur. Cıva sadece altın ile amalgam oluşturmaz. Cevher içerisinde bulunan gümüş gibi diğer metaller de amalgam bünyesine girerek bir kontaminasyon oluşturabilir.

Bu yöntem endüstriyel olarak 50 yıl öncesine kadar plaser yataklardan altının kazanımında düşük altın kazanım verimine rağmen kullanılıyordu. Ancak cıvanın insan ve çevre sağlığına olan negatif etkisi (şapkacı hastalığı) ortaya çıkınca kullanımı yasaklandı. Düşük gelir seviyesine sahip ülkelerde bu yöntem ile altın üretimi resmi/gayri resmi olarak devam etmektedir (Rusanen ve ark., 2013). Şekil 4.7’de Sudan’da küçük ölçekli bir işletmenin resmi verilmiştir.



Şekil 4. 6. Sudan’da küçük ölçekli altın amalgamasyon işletmesi.

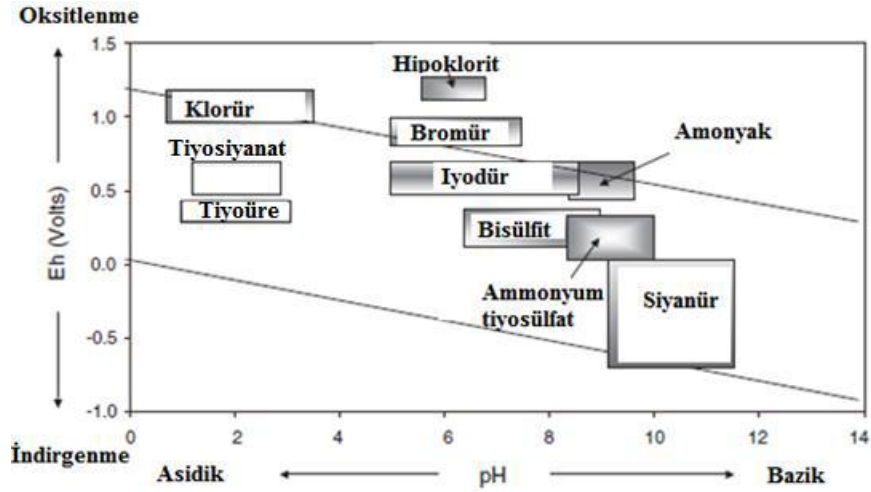
4.4. Kimyasal Yöntemler

Fizikokimyasal yöntemler ile zenginleştirilemeyen, tatmin edici bir kazanım verimine ulaşılamayan veya zenginleştirilmesi ekonomik olmayan durumlarda kimyasal yöntemlere başvurulmaktadır. Kimyasal olarak altının cevher içerisinde çözündürülmesi konusunda sayısız çalışmalar yapılmış ancak siyanürleme dışında bir endüstriyel uygulama alanı bulamamıştır.

Klor (Cl), bromür ve iyodür (I) gibi halojenler üzerinde yoğun çalışmalar yapılmıştır ve bunlar endüstriyel uygulama şansı bulan reaktiflerdir. Klorür ile liç prosesi ilk kez 1800'lü yıllarda siyanürlemeye uygun olmayan altın içeren ince boyutlu sülfürlü cevherlerden altının liçi amacıyla siyanürleme öncesi kullanılmıştır. Altın cevherlerinde bir miktar gümüşün bulunması ve gümüşün klor ile çözünmeyen bileşikler oluşturması klor içeren çözeltilerin kullanımını sınırlamaktadır. Altının elektrokimyasal olarak çözünmesini pH'a bağlı olarak gösterir durum Şekil 4.8'de verilmiştir. Şekil 4.8'den görüleceği üzere çeşitli kimyasal maddeler kullanılarak altın geniş bir pH aralığında çözünmektedir.

Altın cevherlerinin hümik asit ve karbon içermesi durumunda siyanürleme işlemleri sonucu elde edilen altın çözünme verimi %30'u geçmemektedir. Çünkü çözünen altın altın-siyanür kompleksi şeklinde çözülmeye geçmekte ve cevher içerisinde bulunan bu karbonlu parçalar tarafından soğurulmaktadır (adsorplanmaktadır). Cevher içerisindeki karbonun oksitlenerek adsorplama yeteneğini minimuma indirmek için H_2O_2 , O_3 , permanganat gibi birçok oksitleyici maddeler kullanılabilir. Hipoklorit (ClO^-) bileşikler karbonlu yapıyı oksitleyerek etkisiz hale getirebilmektedir. Bu durumda altın kazanım verimi %30'dan %85'e ulaşabilmektedir. Bazı durumlarda karbonlu yapının yüzeyi gazyağı, mazot ve fueloil gibi reaktifler ile kaplanarak siyanürleme işlemlerine cevher hazırlanmaktadır (Çilingir, 1996).

Siyanürleme, tiyosülfat, tiyoüre ve tiyosiyanat gibi kimyasal yöntemler ile altın liçi ile ilgili kısa bilgiler aşağıdaki bir dizi başlık altında verilmiştir.



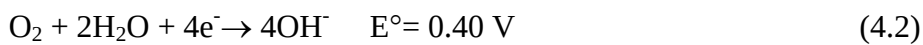
Şekil 4. 7. Altın çözündürülmesinde kullanılan çözücüler ve çalışma aralıklarının etkili oldukları redoks potansiyeli ve asitlik derecesi üzerinden karşılaştırılması (Aylmore ve Muir, 2001) .

4.4.1. Siyanürleme liçi

Altın ve gümüşün siyanür iyonları içeren çözeltilerde çözünabilirliği ilk defa 1783 yılında Scheele tarafından fark edilmiştir. Daha sonraki yıllarda Elkington, Elsner, Faraday ve Bagration tarafından 1840-1850 yılları arasında bu konu çalışılmıştır (John Marsden, 1992). Altın ve gümüş madenciliğinde bir liç unsuru olarak kullanımı liç sonrası elde edilen çözeltilerin altın ve gümüş konsantrasyonlarının düşük kalması nedeniyle sınırlı kalmıştır. 1950 yılından sonraki süreçte yapılan araştırmalar sonucu siyanür içeren çözeltilerden altın ve gümüşün aktif karbona adsorplanabildiği fark edilince siyanürleme yöntemi düşük tenörlü altın madenciliği açısından bir devrim niteliğine dönüşmüştür (Habashi, 1997) .

Siyanürleme işlemi yaklaşık 0.5 g/L siyanür iyonu (CN^-) konsantrasyonda, atmosferik şartlarda, CN^- iyonu kaynağı olarak sodyum siyanür (NaCN) veya potasyum siyanür (KCN) ve havanın oksijeni kullanılarak gerçekleştirilir. Çözünme reaksiyonu Eşitlik 4.1, 4.2, 4.3 ve 4.4, 4.5 ve 4.6'da verilmiştir.

Oksijenin indirgenmesi,



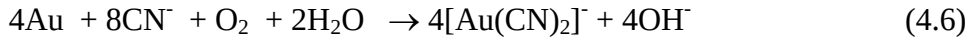
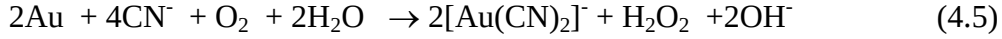
Altının yükseltgenmesi oksitlenmesi,



Kompleks oluşumu,

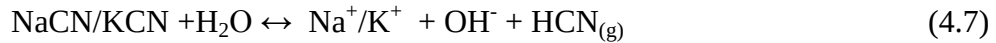


Toplam reaksiyon:

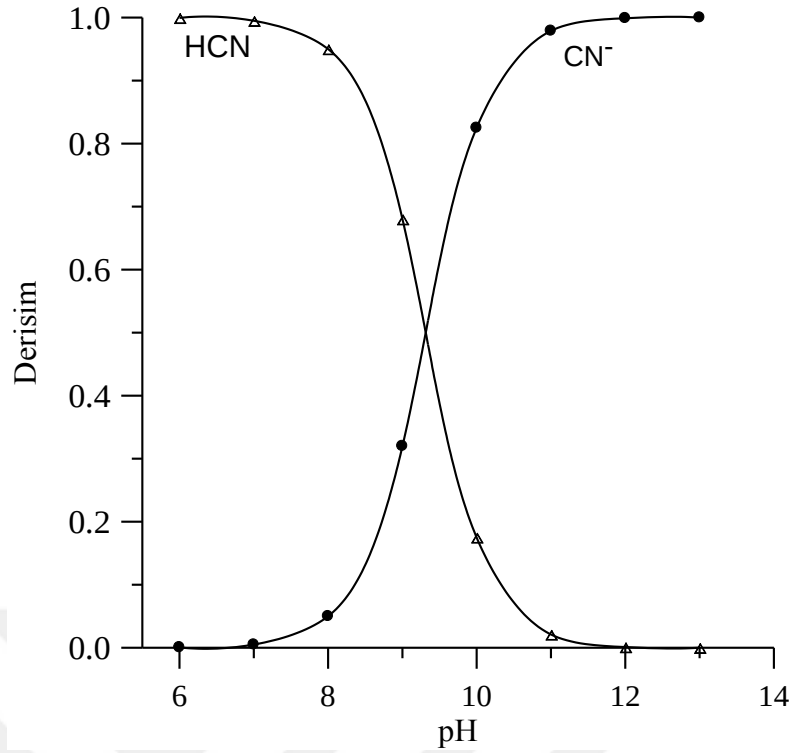


Benzer eşitlikler gümüşün siyanürlü ortamda çözünmesi için de geçerlidir. Eşitlik (4.5) ve (4.6) aynı anda meydana geldiği deneysel olarak kanıtlanmıştır (Habashi, 1997) . Eşitlik (4.2) ve (4.3)'de verilen standart indirgeme yarı tepkimesine denk gelen potansiyeller (0.40 V ve -1.69 V) altının termodinamik olarak yükseltgenmesine yeterli bir potansiyel içermemektedir. Yani normalde oksijenin su ile verdiği indirgenme reaksiyonundan elde edilen E° değeri altından elektron alacak kadar güçlü değildir. Ancak siyanür iyonlarının da olduğu bir çözeltide reaksiyonun gerçekleşmesi mümkün olmaktadır ve bunun termodinamik açıdan bilimsel bir izahı yoktur. Bu çözünme olayı bir fenomen (olgu) olarak karşımıza çıkmaktadır (Habashi, 1997) .

Siyanür liçinde CN^- iyonu kaynağı olarak NaCN ve KCN kullanılmaktadır. Bu kimyasal bileşikler bazik karakterlidir. Sulu ortamdaki çözünmelerinde suyu parçalayarak OH^- iyonları verirler (Eşitlik 4.7).



Eşitlik (4.7)'de görüleceği üzere reaksiyon denge halindedir ve reaksiyon ürünü olarak HCN gazı çıkmaktadır ki bu gaz oldukça zehirlidir. Buna “hidrosiyanik asit” veya “prusik asit” adı verilmektedir. Bu durum aynı zamanda ortama verilen CN^- iyonlarının tüketimine neden olmaktadır. Başka bir deyişle, HCN gazının oluşumunu engellemek için ortama OH^- iyonlarının eklenmesi gerekir (Habashi, 1997). Yani HCN gazının oluşumu ve çözeltideki serbest CN^- iyonu konsantrasyonu çözelti pH'ı ile doğrudan ilişkilidir (Şekil 4.8) (Logsdon v. ark., 1999).



Şekil 4.8 .pH'a bağlı olarak CN⁻/HCN konsantrasyon dengesi (Logsdon ve ark., 1999).

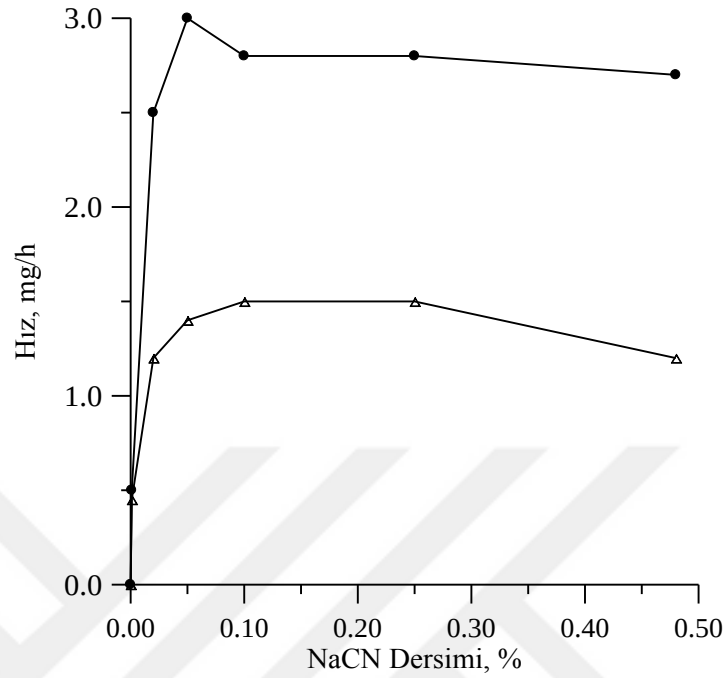
Şekil 4.8'den görüleceği üzere pH 9.3 değerinde çözeltideki CN⁻ iyonları konsantrasyonu çözeltiliye başlangıçta eklenen CN⁻ iyonu konsantrasyonunun yarısı kadardır. pH 8.4'de ise CN⁻ iyonlarının %90'dan fazlası hidrosiyanik asit olarak çözeltide bulunur. Bu nedenle, çözeltinin pH'ı işlem sırasında çok iyi kontrol edilmelidir. Bunun için sönmüş kireç (Ca(OH)₂) veya NaOH gibi pH'ı yükselten kimyasal maddeler kullanılabilir. Uygulamalar pH 10-11 aralığında gerçekleştirilerek serbest CN⁻ iyonlarının çözelti içinde maksimum düzeyde kalması sağlanmaktadır (Logsdon ve ark., 1999).

Altının siyanür liçi ile çözündürülmesi ile ilgili sayısız araştırma yapılmıştır. Bu çalışmalar sonucu oksijen konsantrasyonunun, hidrojen iyonu konsantrasyonunun sıcaklığın ve yabancı iyon etkisinin altın çözünmesine olan etkileri incelenmiştir.

4.4.1.1. Oksijen ve siyanür iyonu konsantrasyonunun etkisi

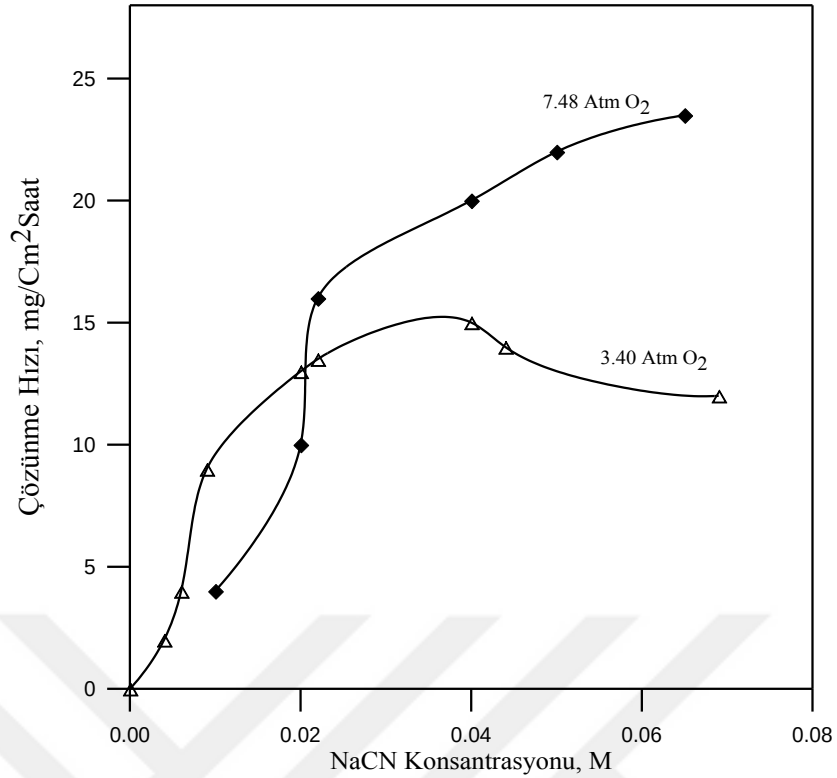
Eşitlik (4.5) ve (4.6)'dan görüleceği üzere hem oksijen hem de siyanür altının liçinde gereklidir. Dolayısıyla çözünme reaksiyonlarında çözünme hızı reaksiyona girenlerin derişimlerine bağlıdır. Gerçekte deneysel çalışmalar; siyanür konsantrasyonunun artışıyla bir yere kadar çözünme hızının arttığı (maksimuma

ulaştığı) bu değerin üzerinde ise siyanür derişiminin çözünme hızını azalttığı belirlenmiştir (Şekil 4.9).



Şekil 4. 9 Siyanür konsantrasyonunun altın ve gümüş çözünmesine olan etkisi (Üstteki eğri Au çözünmesi, alttaki eğri Ag çözünmesi) (Maclaurin, 1893).

Yapılan çalışmalarda düşük siyanür konsantrasyonlarında çözünme hızı siyanür konsantrasyonuna bağlıdır. Altın çözünmesinin maksimum olduğu siyanür konsantrasyonlarının üzerindeki konsantrasyonlarda altın çözünme hızı oksijenin kısmi basıncına bağlıdır. Yani altının çözünme hızı düşük siyanür konsantrasyonlarında CN^- iyonu konsantrasyonu arttıkça artarken yüksek siyanür derişimlerinde oksijen basıncı arttıkça altın çözünmesi artmaktadır (Şekil 4.10).



Şekil 4. 10. Oksijen basıncına bağlı çözünme hızlarının değişimi: Gümüş örneği (24 °C) (Sun ve ark., 1996).

4.4.1.2. Hidrojen iyonunun etkisi

Hazırlanan siyanür çözeltisindeki CN^- iyonu HCN olarak tüketildiği yukarıda ifade edilmiştir (Şekil 4.8). Bunun yanında havada bulunabilen karbondioksit gazı (CO_2) CN^- iyonu tüketimine neden olabilmektedir. Çünkü CO_2 gazı sulu ortamda çok kolay çözünerek karbonik asit oluşumuna neden olur (Eşitlik 4.9). Oluşan karbonik asit ise HCN oluşumuna neden olarak CN^- iyonları konsantrasyonunu azaltır (Eşitlik 4.10).



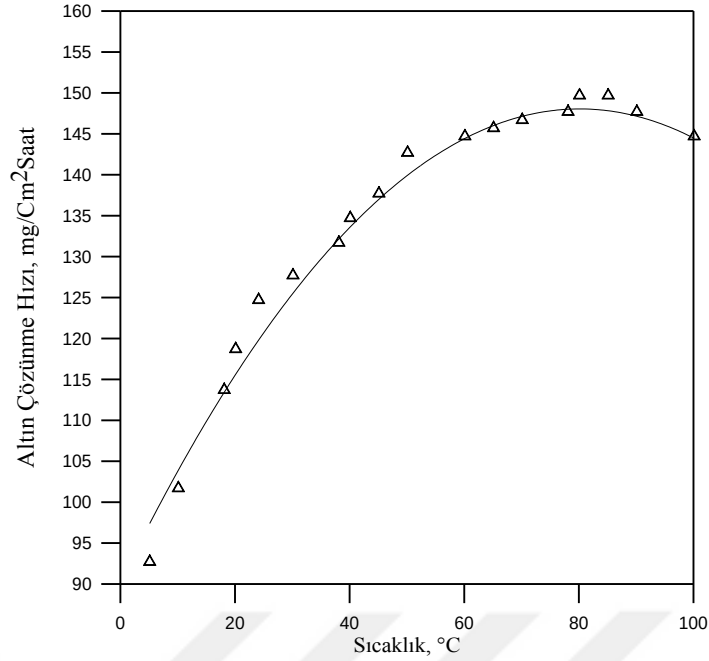
Pratikte, çözeltinin pH'ı ne kadar yüksekse o kadar siyanür iyonu çözeltide vardır. Ama kireçle ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) (sönmüş kireç) elde edilen yüksek pH'larda pH arttıkça altın ve gümüş için çözünme hızı hızla azalır. Buna karşılık kireç yerine NaOH kullanılması durumunda çözünme hızı altın için yaklaşık pH 12.7 değerine kadar sabit ve bu değerden sonra hızla azalır. Kireç ile hazırlanmış çözelti ve NaOH ile hazırlanmış çözeltiler için altın çözünme hızı pH 10.2 değerinde aynıdır. Kireç ucuzdur ve

susuzlandırma işlemleri için de önemli görevler üstlenir. Bu nedenle kullanılması işlemin ekonomikliği bakımından önemlidir. Kireç kullanıldığında yüksek pH larda çözünme hızının hızla düşmesinin nedeni reaksiyon ürünü olarak oluşan H_2O_2 'nin (Eşitlik 4.5) Ca iyonları ile altın yüzeyinde reaksiyona girerek kalsiyum peroksit (CaO_2) oluşturmastır ve bu bileşik altın yüzeyini kaplayarak çözünmenin yavaşlamasına neden olabilmektedir (Eşitlik 4.11) (Habashi, 1997) .



4.4.1.3. Sıcaklığın etkisi

Genel olarak çözünme reaksiyonlarında sıcaklık arttıkça çözünme hızı artar. Diğer taraftan, su içerisinde sıcaklık artışına bağlı olarak gazların çözünürlüğü azaldığından çözünmüş oksijen konsantrasyonu da artan sıcaklıkla azalır. Bu nedenle maksimum çözünme hızına ulaşıldığı optimum bir sıcaklık bulunmalıdır. Bu sıcaklığın yapılan çalışmalarda yaklaşık 85 °C olduğu bildirilmiştir (Habashi, 1997) . Yine aynı çalışmada 85 °C'ın üzerindeki sıcaklıklarda altın için çözünme hızının azaldığı gösterilmiştir (Şekil 4.11). Kinetik çalışmalarda NaCN çözeltisinde altının çözünmesi için hesaplanan aktivasyon enerjisinin 2-5 kJ/mol aralığında olduğu bildirilmiştir ve bu değer çözünmeyi difüzyonun kontrol ettiğini gösterir.



Şekil 4. 11. Altın çözünme hızına sıcaklığın etkisi (Sun ve ark., 1996)

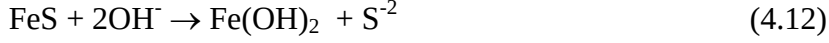
4.4.1.4. Karıştırma hızının etkisi

Yapılan çalışmalarda siyanürlü ortamda altının çözünme hızının karıştırma hızı arttıkça kayda değer bir şekilde arttığını göstermiştir. Bu tipik bir difüzyon kontrollü prosesin özelliğidir (Habashi, 1997) .

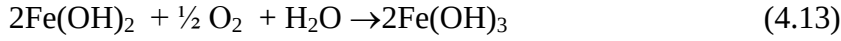
4.4.1.5. Yabancı iyon etkisi

Siyanürlü ortamda çözeltide bulunabilecek Na^+ , K^+ , Cl^- , NO_3^- ve SO_4^{2-} iyonlarının Au ve Ag çözünmesine etkisinin olmadığı bildirilmiştir. Ancak, kurşun iyonlarının (Pb^{+2}) Au ve Ag çözünmesine etkisi vardır. Düşük konsantrasyondaki kurşun iyonları çözünmeyi hızlandırırken, yüksek konsantrasyonlarda çözünme hızı yavaşlamaktadır. Çözeltide bulunabilecek çok az miktardaki kurşun, bizmut, talyum ve cıva çözünmeyi hızlandırıcı etkisinin olduğu yapılan çalışmalarda ortaya konmuştur (Habashi, 1997). Çözünme hızının artmasının nedeni olarak altının bu 4 metalle yer değiştirme karakterine sahip olması yani bu iyonların altının yüzey karakteristiklerini değiştirmeleri ve bu da ilgili metallerin altınla altın yüzeyinde alaşım yapmalarıyla açıklanabilir. Bu olay normal şartlarda gerçekleşmez. Altın yüzeyinde meydana gelen bu alaşımın hızla çözünmesiyle altının çözünme hızının hızla arttığı düşünülmektedir.

Çözelti içerisinde bulunabilecek Fe^{+2} , Cu^{+2} , Zn^{+2} , Ni^{+2} , Mg^{+2} , Ca^{+2} , Ba^{+2} , ksantatlar ve fazla miktarda Pb^{+2} altın çözünme hızını yavaşlatır. Yavaşlama etkilerinin nedenleri aşağıdaki gibi sıralanabilir; Çözeltideki çözünmüş oksijeni tüketmeleri:



Oksijen varlığında,

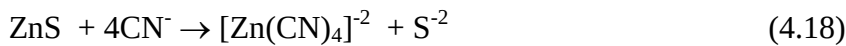


Sülfür iyonu aynı zamanda kısmen tiyosülfat ve polisülfatlara oksitlenir;



Çözeltideki serbest siyanürün tüketilmesi:

Bazı mineraller özellikle Cu, Zn, Ni, As ve Fe içeren mineraller siyanürlü ortamda çözünerek CN^- iyonu tüketimine neden olabilmektedir. Eşitlik (4.18)'de çinko örneği verilmiştir.



Tiyosiyanat oluşumu:

Sülfür minerallerinden sülfür iyonu ayrıldığında oksijen ve CN^- ile reaksiyona girerek tiyosiyanat iyonu oluşturur. Bu iyonun altın üzerinde etkisi hemen hemen yoktur.



Gang minerallerinin adsorpsiyonu:

Altın içeren cevherler ve konsantreler kuvars, alumina silikatlar ve diğer silikatlar içerebilir. Bu silikatlar ince dağılmış halde bulunabilir ve silanol yapısı oluştururlar. Alkali ortamda ince dağılmış silikatların yüzeyinde oluşan silanolun CN^- iyonlarını adsorplama kabiliyeti çok güçlüdür.

Metal Yüzeyinde Film Oluşumu:

Sülfür iyonlarının bir başka etkisi de altın yüzeyinde altın sülfür filmini oluşturmaktır. Bu film bir resistans tabakası gibi davranarak altının çözelti ile temas etmesini engellediği için çözünme hızının oldukça yavaşlamasına neden olabilmektedir. Yüksek pH'da ($\text{pH} > 11$) kalsiyum iyonları altın ve gümüş yüzeyinde CaO_2 oluşturur ve altın ve gümüşün çözünmesini engeller. Ba(OH)_2 de benzer bir şekilde davranarak Ag ve Au yüzeyini kaplar.

Güçlü Oksitler:

Ozon (O_3) siyanürü parçalayarak siyanür tüketimine neden olabilmektedir (Eşitlik 4.20).

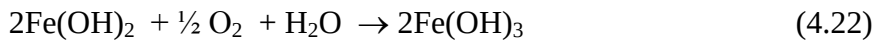


Yine ozon altın yüzeyinde kırmızı altın oksit tabakasının oluşmasına neden olarak çözünmeyi engeller.

KEX, KAX Gibi Flotasyon Reaktifleri:

Kasnatlar altın yüzeyinde altın ksantat oluşturduğu için altın yüzeyini kaplarlar. Ksantatların hidrofob ucu çözeltiye doğru yöneldiğinden altının çözücü ile temasını keser ve altın çözünmesini engellemiş olur.

Altın çözünmesini yavaşlatan veya ortadan kaldıran safsızlıklar çözüldükten bir şekilde uzaklaştırılmalıdır. Örneğin, ortama eklenecek az miktardaki kurşun oksit, nitrat veya asetat ortamdaki kükürtü alarak PbS oluşturması sağlanabilir. Çok az miktarda eklenecek KMnO_4 S^{-2} iyonlarını kolayca sülfata dönüştürebilir. Siyanür eklenmeden önce Ca(OH)_2 ile yapılacak bir karıştırma işleminden sonra sülfürlü mineraller bozundurulabilir (Eşitlik 4.21-4.24).

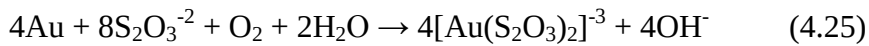


4.4.2. Tiyosülfat liçi

Dünyada altın üretiminde kullanılan liç yöntemlerinin başında yukarıda da ifade edildiği üzere siyanürleme yöntemi gelmektedir (Aylmore ve Muir, 2001). Altın cevherlerinin oluşumu sırasında altın arsenopirit ve pirit gibi minerallerin bünyesinde kristal yapı içerisinde kapanım halinde bulunabilmektedir. Bu tür cevherleşme içerisinde bakır ve diğer sülfürlü mineraller beraber bulunabildiği için siyanür iyonlarının ve bunun yanı sıra çözelti içerisinde çözünmüş oksijenin tüketimine neden olabilmektedir. Ayrıca cevher içerisinde organik veya inorganik karbonun varlığı ve siyanür tüketimine bağlı çevresel etkiler nedeniyle meydana gelen problemlerin çözümü amacıyla birçok liç yöntemleri araştırılıp geliştirilmeye çalışılmıştır. Bunlardan bir tanesi de Tiyosülfat ($S_2O_3^{2-}$) liçi yöntemidir (Abbruzzese ve ark., 1995). Siyanürleme liçine Macaristan ve Çekya gibi Avrupa ülkeleri tamamen yasaklama getirirken Almanya sıkı denetimlerle kısıtlama yoluna gitmiştir. ABD, Arjantin ve Meksika gibi ülkelerin bazı eyaletlerinde ve Kosta Rika'da siyanürün çevresel etkilerinden dolayı kullanımı yasaklanmıştır (Ahlatcı ve ark., 2017)

Siyanür liçine alternatif olan daha çevreci ve kısmen ekonomik bir yöntem olarak tiyosülfat liçi yöntemi geliştirilmiştir (Aylmore ve Muir, 2001). Tiyosülfat, zehirli etkisi siyanüre göre çok düşük bir kimyasal ajan olarak kabul edilmektedir . Bu nedenle dünyada hemen hemen her ülkede tiyosülfat tuzlarının kullanımı serbest haldedir. Bakır içeren altın cevherlerinden siyanür liçi ile altın çözündürülmesi siyanür tüketimini olumsuz yönde etkilerken tiyosülfat liçinde bakır katalizör olarak görev yapması refrakter altın cevherleri için bir avantaj olarak görülmektedir (Senanayake, 2005) .

Tiyosülfat liçi siyanürleme uygulamasında olduğu gibi bir elektrokimyasal reaksiyon ile ilerlemektedir ve oluşan altın tiyosülfat kompleksi uzun süre stabil kalabilmektedir. Reaksiyon aşağıdaki gibi verilebilir (Eşitlik 4.25);



Eşitlik (4.25)'de verilen reaksiyon ortamda çözünmüş oksijen varlığında gerçekleşmektedir ve yavaş bir reaksiyondur. Yukarıda ifade edildiği gibi ortamda bulunabilecek bakır II iyonları (Cu^{+2}) reaksiyonun hızını pozitif yönde etkilemektedir (Marsden ve House, 2006) .

Siyanürleme yöntemine göre birçok avantaj barındırmasına rağmen tiyosülfat liçinin dünyada resmi olarak bir uygulamasına rastlanmamıştır. Bununla birlikte Sudan'ın Port Sudan şehrine yakın bir işletme bakır içeren oksitli altın cevherinden resmi olmayan bir şekilde tiyosülfat liçi ile altın üretimi yapmaktadır (Bakr, 2018) .

4.4.3. Tiyoüre liçi

Tiyoüre ($\text{CS}(\text{NH}_2)_2$) tiyosülfat gibi siyanüre göre daha az zehirli özellik göstermesi nedeniyle yine sülfürlü mineraller içerisindeki altının kazanılmasında etkili bir yöntem olarak karşımıza çıkmaktadır (Marsden, 1992) . Tiyoüre ile ilgili ilk detaylı çalışmalar Sovyetler Birliği döneminde Kozhuova ve Plaksin (1941) tarafından gerçekleştirilmiştir . Bu çalışmalarda önemli sonuçlara ulaşılmıştır. Avantaj olarak siyanürlü ortama nisbeten daha çok altın çözünme oranları elde edilebilmektedir. Dezavantaj olarak ise altın ile oluşturduğu kompleks yapının stabil olmaması yani hızlı bir şekilde tiyoürenin bozulması ve ayrıca liçing esnasında cevher içerisinde bulunan diğer metalleri de bünyesinde toplaması büyük miktarda tiyoüre sarfına neden olmaktadır. Tiyoüre çevresel açıdan zararsız görünse de son yıllarda yapılan araştırmalarda kanserojen olduğu konusunda önemli kanıtlara ulaşılmıştır (Marsden ve House, 2006) . Tiyoürenin altın ile verdiği çözünme reaksiyonu şu şekilde verilebilir (Eşitlik 4.26)

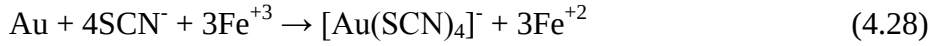
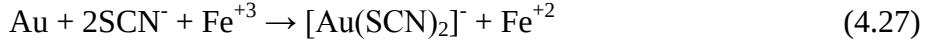


Eşitlik (4.26)'dan anlaşılabacağı üzere yükseltgen olarak Fe^{+3} iyonları kullanılmaktadır. Fe^{+3} iyonlarının stabilizasyonu ancak düşük pH'larda ($\text{pH} < 3$) sağlanmaktadır. Dolayısıyla işlemler asidik ortamda gerçekleştirildiği için birçok element de asitten etkilenecek çözeltiye geçebilmektedir. Tiyoüre liçi antimonu zengin altın cevheri üzerinde Avusturalya'da tesis bazında denemeleri gerçekleştirilmiş ama yukarıda bahsedilen olumsuz nedenlerden dolayı işletme fazına geçilememiştir (Yüce, 1995) .

4.4.4. Tiyosiyanat liçi

Altın liçinde siyanüre alternatif olarak tiyosiyanat (SCN^-) kullanımı birçok çalışmaya konu olmuştur (Yoon, 2014). Tiyoüre gibi tiyosiyanat da asidik ortamda

çözelti olarak kullanılmakta ve refrakter altın cevherlerinin liçinde etkili olabilmektedir. Reaksiyon ortamına yine tiyoüre de olduğu gibi bir yükseltgen ajanın eklenmesi gerekmektedir. Bu iyon Fe^{+3} iyonudur. Fe^{+3} iyonu etkisinde altın Au^+ ve Au^{+3} iyonları formunda yükseltgenerek çözeltiye alınabilmekte ve elde edilen bu iyonlar tiyosiyanat ile kompleks oluşumu gerçekleştirmektedir. Fe^{+3} iyonlarının çalışabilmesi için pH değerinin 2-3 arasında tutulması tiyoüre liçinde uygulanan bir zorunluluktur. Çözünme reaksiyonları Eşitlik (4.27) ve (4.28)'de verilmiştir.



Çalışmalar sadece araştırma niteliğinde kalmış olup dünyada tiyosiyanat kullanılarak altın liçi yapan bir tesis bulunmamaktadır.

4.5. Liç Prosesleri

Liç prosesleri ile altının kazanılması birçok aşamayı içermektedir. Bu bağlamda liç yöntemiyle cevher içerisindeki kıymetli metal/metallerin kazanılması 3 ana aşamada gerçekleştirilmektedir (Acarkan ve ark., 1994).

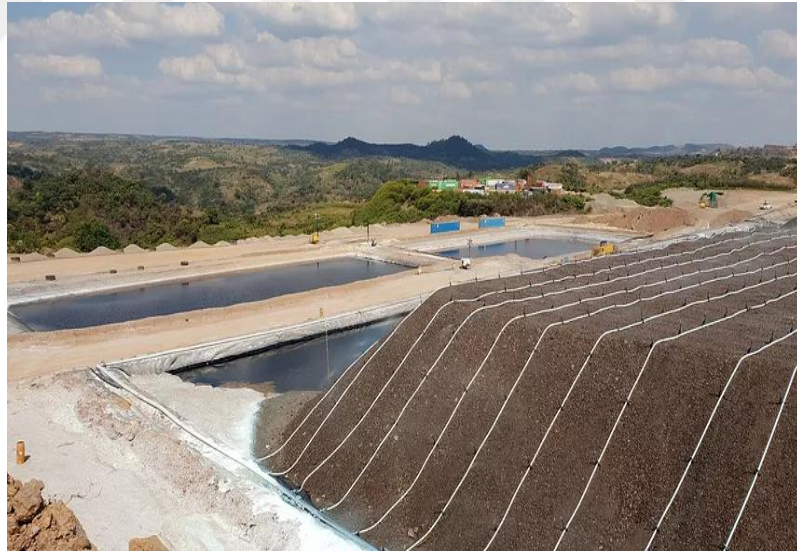
- Liç öncesi hazırlanma işlemleri,
- Cevherdeki değerli metallerin çözeltiye alınması,
- Değerli metallerin yüklü çözeltiden kazanılması.

Liç öncesi şlemlerde cevherin mineralojik ve kimyasal analizi, cevher içerisinde bulunan altının durumu ve tenörü gibi bilgiler ışığında hangi yöntem/yöntemlerle çözeltiye alınacağına karar verilir. Çözeltiye alma yöntemi seçme işlemlerinde gerekli ön denemeler yapılarak sonuçlar irdelenir. Elde edilen sonuçlara göre en uygun yöntem/yöntemlerin seçimi yapılır. Çözeltiye alma işlemleri sonucu elde edilen çözelti altın özelinde uygun bir adsorplayıcı ile ki bu altın için aktif karbondur, adsorbe edilir. Adsorpsiyon sonucu elde edilen yüklü aktif karbondan altının sıyrılması ve gerekli çöktürme metodları sonrası elde edilen altın ergitilerek kazanılır. Sonraki aşamalarda rafinasyon işlemleri ile saf altın üretimi yapılabilmektedir.

Altın liçinde en çok tercih edilen çözeltiye alma yöntemleri yığın liçi, karıştırma liçi, süzme liçi, perkolasyon liçi ve basınç liçidir.

4.5.1. Yığın liçi

Düşük tenörlü altın cevherleri için en çok tercih edilen nisbeten ucuz bir yöntemdir. Bu yöntemle genellikle cevher içerisindeki altının yaklaşık %70'i çözeltiye alınabilmektedir (Pizarro ve ark., 1974). Cevher ocaktan çıktığı halde veya kırılarak önceden hafif eğimli ve yüzeyi geçirimsiz bir tabakanın üzerine belirli bir yükseklikte yığılır (Şekil 4.12). Bu yöntemde elde edilen yığının geçirgenliği çok önemlidir. Cevher tane boyutunun küçük olması durumunda yığın çözeltinin etkisiyle akışkan hale gelebileceğinden ve geçirimsizlik özelliğinin azalacağından dolayı cevher çimento gibi bir bağlayıcı ile aglomere edilir. Yığın üzerine siyanür çözeltisi damlama, fıskiye gibi çeşitli yöntemlerle defalarca verilerek altın çözeltiye alınır. Çözelti bir havuzda toplanır. Çözelti çeşitli aralıklarla analiz edilerek siyanür tüketimi, altın konsantrasyonu ve diğer iyonların tespiti yapılır. Uygun bir süre sonra dolu çözelti elde edilir. Çözeltme işlemi günler, haftalar hatta aylar sürebilir. Daha sonraki yığın hazırlama işlemleri için yığın kaldırılarak tekrar yeni yığınlar oluşturularak işlemin devamı sağlanır.



Şekil 4. 12. Yığın liçi uygulaması

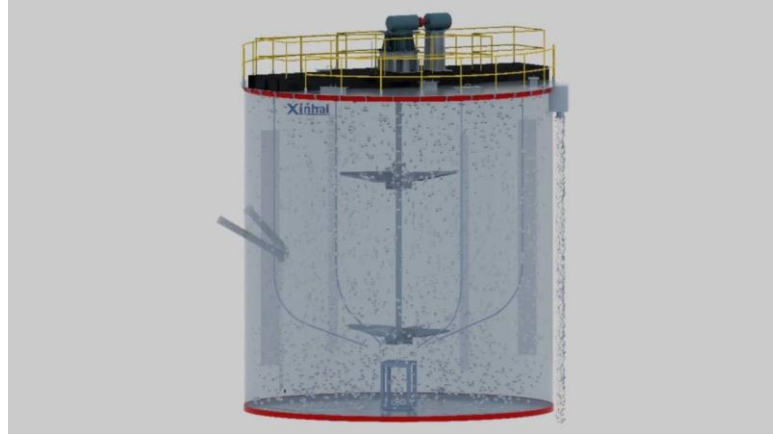
Elde edilen dolu çözelti aktif karbondan geçirilerek altın iyonlarının çözeltiden ayrılması sağlanır (Şekil 4.13).



Şekil 4. 13. Aktif karbon kolonları

4.5.2. Karıştırma liçi

İnce tane boyutundaki altın cevheri bir tank içerisinde çözücü ortam ile birlikte beslenir. Beslenen pulpun katı oranı %35-50 arasındadır. Genellikle tankın üst tarafına monte edilmiş bir karıştırıcı şaft marifetiyle karıştırma işlemi gerçekleştirilir (Şekil 4.14). Daha önceki çalışmalardan elde edilen sonuçlar karıştırma hızının artışı ile altın çözünme hızının sonuçlarından dolayı karıştırma liçinde işlemin hızı oldukça fazladır. Çözünme işlemi yığın liçinde olduğu gibi çok uzun sürmez ve cevherin durumuna göre saatler alabilir. Karıştırma liçi esnasında çözeltiye hava verilmesi liç işlemi için gerekli olan oksijenin çözelti içerisinde sabit oranda kalması açısından önemlidir. Elde edilen çözelti süzülerek ayrılır. Çözelti bir aktif karbon kolonundan geçirilerek altın çözeltiden ayrılır. Ancak, karıştırma liçi prosesinde çözündürme esnasında aktif karbon tank içerisine yerleştirilerek kullanımı yaygındır. Buna “Carbon in Pulp” (CIP) adı verilir. Aynı zamanda altını selektif olarak adsorplayabilen reçineler de aynı şekilde tank içerisine yerleştirilebilmektedir. Bu yöntemde de “Resin in Pulp” (RIP) adı verilmektedir.



Şekil 4. 14. Karıştırma liçi tank sisteminin şematik görünümü.

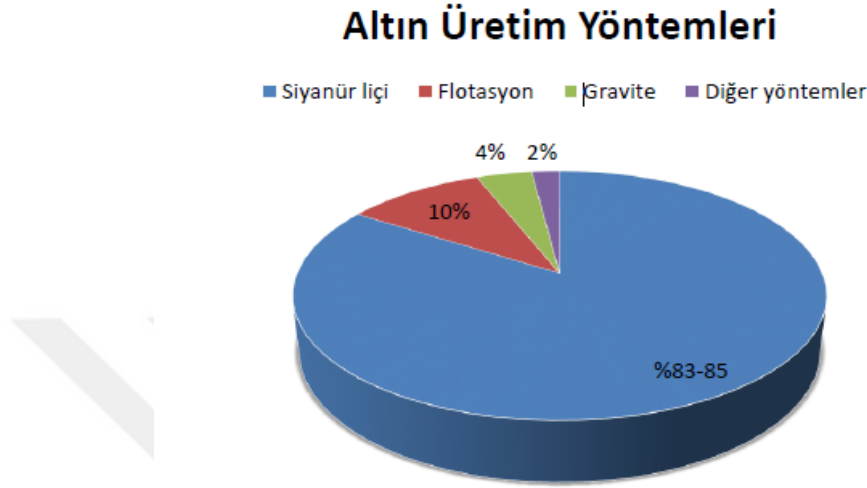
4.5.3. Perkolasyon liçi

Perkolasyon liçi yığın liçinde olduğu gibi geçirgenliği uygun düşük tenörlü altın cevherleri için geliştirilmiş bir yöntemdir. Bu yöntemde bir bir kolon kullanıldığı için aynı zamanda kolon liçi adını da almaktadır. Kolona cevher doğrudan veya aglomere yapılmış halde beslenebilir. Kolon altında (dibinde) bir süzgeç vardır ve beslenen cevherin üzerinden çözücü beslenir ve kolon altından çözelti alınır. Bazı durumlarda tıkanıklığı önlemek veya çözelti temasını uzun tutabilmek gibi amaçlarla çözücü kolon altından beslenerek çözelti üstten alınabilmektedir. Altın kazanım verimi yığın liçi ile hemen hemen aynıdır. Yığın liçine göre en önemli avantajı altın çözünme süresinin daha kısa olmasıdır (Marsden ve House, 2006).

4.5.4. Basınç liçi

Oktoklav liçi adını da alan bu proses, refrakter altın cevherinin ön oksidasyonu için asidik veya bazik ortamda saf oksijen veya hava basıncı altında yapılan bir işlemdir. Bazı durumlarda ortam sıcaklığında bazen de sülfürlü refrakter cevher olması durumunda 160 °C sıcaklığın üzerinde gerçekleştirilebilmektedir. Siyanürlü ortam için altının çözünme verimi genellikle %85'in üzerinde 15 dakika gibi kısa bir sürede gerçekleştirilebilmektedir (Habashi, 1997). Oksijen basıncı 5 MPa civarındadır ve daha yüksek basınçlar altın yüzeyinin oksidasyonuna ve sisteme eklenen Ca(OH)_2 'deki kalsiyumun CaO_2 şeklinde altın yüzeyini kaplamasına neden olabilmektedir (Eşitlik 4.11).

Şekil 4.15’de dünyada endüstriyel olarak altın üretiminde kullanılan yöntemler ile ilgili bilgiler verilmiştir. Dünyada altın rezervinin sınırlı olması, düşük tenörlü ve ince tane boyutunda serbestleşmesi nedeniyle en çok uygulanan kimyasal yöntemin siyanürleme yöntemi olduğu görülmektedir.



Şekil 4. 15. Endüstriyel proseslerin dünya altın üretimindeki payı (Bhappu, 1990) .

4.6. Altının Siyanürlü Çözeltiden Kazanılması

Altın iyonlarının siyanür ile yaptığı kompleks anyon ($[\text{Au}(\text{CN})_2]^-$) oldukça stabildir (Eşitlik 4.4) (Anderson, 2016).

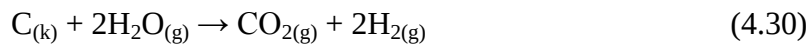


Altın kazanımı ortaya çıkan bu kompleks iyonun bir kütleye adsorpsiyonu ve sonrası bu kütleden sıyrılması, doğrudan çözeltinin/konsantre edilmiş çözeltinin elektrolizi, çinko gibi bazı metaller ile elektrokimyasal olarak çöktürülmesi (Merrill Crowe Prosesi) gibi çeşitli yöntemler içerebilmektedir. Adsorpsiyon işlemi çoğunlukla çok ucuz ve kolay bulunabilmesi nedeniyle aktif karbon üzerinde yapılmaktadır.

4.6.1. Aktif karbona adsorpsiyon

Aktif karbon ilk olarak altının klorlu liçi prosesinde uygulanmıştır. Daha sonra siyanürlü çözeltiler için de uygulama alanı bulmuştur. O dönemlerde adsorpsiyon sonucu elde edilen yüklü aktif karbon yakılarak ortaya çıkan kül içerisinde altın alınmaktaydı. Bu yöntem hem pahalı hem de çevresel olarak zararlı bir uygulama olmasına rağmen rağbet görmekteydi. 1950’li yıllarda siyanür liçinden elde edilen çözeltilere uygulama sonrası yüklü aktif karbondan altının sıyrılıp geriye kalan karbonun tekrar kullanılabilirliği keşfedildi. Bu sayede siyanürleme liçinde aktif karbonun kullanımı ekonomik hale geldiği için yaygın olarak kullanılmaya başlandı (Ghofu ve ark., 2022) .

Aktif karbon yüksek karbonlu, yüksek porozite ve buna bağlı yüksek yüzey alanına sahip materyaller için kullanılan bir terimdir. Genel olarak karbon içeren materyallerin yüksek sıcaklıklarda (800 °C’ın altında) inert bir atmosfer ortamında ısıtılmalarıyla odun kömürü benzeri bir materyal olarak elde edilmektedir. Elde edilen materyalin gözenekliliği çok önemlidir. Yeterli gözenek alanına/hacmine sahip olmaması durumunda çeşitli işlemler ile gözenek alanı arttırılabilmekte ve bilinen anlamda aktif karbon elde edilmektedir. Bu bağlamda amorf ve sabit karbon oranı yüksek olan antasit, taş kömürü, linyit, turba, petro kok gibi materyallerin aktivasyonu sağlanabilmektedir (Eşitlik 4.29 ve 4.30). Eşitliklerde verilen aktivasyon yöntemine “termal/buhar aktivasyonu” adı verilmektedir (Viswanathan ve ark., 2009).



Bunun dışında çeşitli bitki kalıntıları da aktif karbon üretiminin vazgeçilmez materyalleridir. Bu materyaller selüloz gibi karbonhidrat ($C_x(H_2O)_y$) içeren materyallerdir. Bu amaçla hindistan cevizi, ceviz, badem, kayısı vb. meyvelerin çekirdek kabukları kullanılabilmektedir. Kabukların inert ortamda yüksek sıcaklıkta ısıtılmasıyla karbonhidrat bünyesindeki su yapıdan ayrılarak geriye karbonca yüksek bir katı kalmaktadır (Eşitlik 4.31).



Eşitlik 4.31'den elde edilen karbon Eşitlik (4.29) ve (4.30)'da olduğu gibi aktive edilmektedir. Bu yöntemle hindistan cevizinden elde edilen karbonlu yapının aktifleştirilmesi sonucu önceden 10-15 m²/g arasında olan iç yüzey alanı aktivasyon sonucu 700-1200 m²/g'a çıkarılabilmektedir (McDonal ve ark., 1990).

Termal/buhar aktivasyonu dışında “kimyasal aktivasyon” yöntemleri de kullanılabilmektedir. Bu aktivasyon yönteminde karbonlu materyal termal/buhar yönteminden farklı olarak hem karbonizasyon hem de aktivasyon aynı anda gerçekleştirilmektedir. Aktifleştirici olarak nisbeten düşük sıcaklıkta (200-650 °C) fosforik asit, çinko klorür, sodyum ve magnezyum tuzları kullanılabilmektedir. Düşük sıcaklıkta işlemin gerçekleştirilmesi nedeniyle grafitte benzer yapıların oluşumu da engellenmiş olmaktadır.

Aktif karbon içerisinde boşlukların yüzeyinde sınırlı boyutlarda aromatik yapıları levhalı bölgeler bulunmaktadır. Bu bölgelerde karbon atomlarının potansiyel enerjileri oldukça yüksektir. Dolayısıyla adsorpsiyon bu bölgelerde yoğunlaşmaktadır. Sıvı fazdan aktif karbon yüzeyine metallerin adsorpsiyonu karbon yüzeyinde doymuş C=C yapıları karbon oksitleyici ajanlar ile işleme tabi tutulduğunda lakton ve karboksil (COO⁻) gibi asidik karbon-oksijen grupları oluşur ve oluşan negatif yüklü yapılar üzerine metal iyonu adsorpsiyonu gerçekleşmektedir (Sheng ve ark., 1997). Siyanürlü iç çözeltisindeki metal-siyanür kompleksleri aktif karbon üzerine selektif olarak adsorplanmaktadır. Altın ile birlikte çözelti içerisinde çeşitli metal-siyanür kompleksleri bulunabilmektedir. Metal-siyanür komplekslerinin aktif karbona adsorpsiyon afinitesi şu şekilde verilebilir (Yin ve ark., 2011); $[Zn(CN)_4]^{-2} < [Cu(CN)_3]^{-2} < [Cu(CN)_2]^{-} < [Ag(CN)_2]^{-} < [Hg(CN)_2]^{0} < [Au(CN)_2]^{-}$. Buradan da görüleceği üzere altının siyanür ile yaptığı kompleksin aktif karbona öncelikli adsorpsiyonu sözkonusudur.

4.6.1.1. Aktif karbona adsorplanmış altının sıyırılması

Siyanürlem işlemleri sırasında veya işlem sonunda çözelti içerisindeki altın aktif karbona alınabilmektedir. Büyük işletmelerde aktif karbon kolonları yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Yüklü aktif karbon içerisinde/bünyesinden altının sıyırılması gerekmektedir. Bunun için birçok yöntem geliştirilmiş ve kullanıma sunulmuştur. Kabaca ifade etmek gerekirse; yüklü aktif karbon sıyırma kolonuna/kolonlarına alınmaktadır. Adsorpsiyon işlemi ekzotermik bir mekanizma ile ilerlediğinden desorpsiyon işlemlerinde sıcaklığın artırılması işlemin hızı ve verimi açısından

önemlidir. Desorpsiyon/sıyırma işlemlerinde aktif karbondan yüksek konsantrasyonda hazırlanmış NaCN ve NaOH çözeltileri geçirilerek aktif karbondan altın sıyırılarak çözeltiliye ayrılmış olmaktadır (Ahmed ve ark., 2020). Ayırma çözeltilisinde Ca gibi pH ayarlayıcılar yerine NaOH'ın kullanılmasının nedeni aktif karbondan desorpsiyonun zorlaştırması olarak gösterilmiştir. Sıyırma sonrası elde edilen çözelti Au konsantrasyonuna bağlı olarak ya elektroliz ünitesine yada Zn ile çöktürme ünitesine gönderilmektedir (Davidson ve Duncanson, 1977) .

Aktif karbondan altının sıyırılması amacıyla geliştirilen bir çok proses vardır. Bunlardan kayda değer olanları aşağıda anlatılmıştır.

Atmosferik Zadra prosesi:

İlk sıyırma prosesi olarak ün yapmıştır. Bu prosesde sıyırma işlemi 90 °C sıcaklıkta %0.1 NaCN ve %1 NaOH konsantrasyonundaki çözelti yüklü aktif karbon içerisinden 2 saatlik periyotlarla 48-72 saat süreyle geçirilmektedir. Uzun süre alması dezavantajı olarak verilebilir.

Basınçlı Zadra Prosesi:

Atmosferik Zadra prosesindeki işlemin süresini kısaltmak amacıyla geliştirilmiştir. Sistem yüksek basınç ve sıcaklığa uygun olarak revize edilmiştir. Yine %0.1 NaCN ve %1 NaOH konsantrasyonundaki çözelti 140-150 °C aralığında yüklü aktif karbona verilmektedir. Bu işlem sonucu prosesin toplam süresi 11 saate indirilebilmektedir (Davidson ve Duncanson, 1977) .

AARL Prosesi:

Anglo American Research Laboratories (AARL) tarafından 1980'li yılların başında geliştirilmiştir. Bu proseste yüklü aktif karbon önce %3 HCl içeren çözelti ile yıkanmakta ve sonrası saf su ile durulanmaktadır. İşlem sonrası elde edilen aktif karbon %1 NaOH ve %3 NaCN konsantrasyonundaki çözelti içinde yarım saat bekletilmektedir. Daha sonra basınçlı bir sistem içerisinde sıcaklığı 110 °C olan saf su altın aktif karbondan geçirilerek sıyırılmaktadır. Toplam işlem süresi yaklaşık 8 saat sürmektedir. Elde edilen yüklü çözeltiliden altın elektroliz yöntemi ile kazanılmaktadır (Gray, 1999).

Alkollü Sıyırma:

Atmosferik Zadra Prosesi'nin işlem süresini kısaltmak amacıyla geliştirilmiştir. Sıyırma çözeltilisi içerisine %20 oranında etil veya metil alkol ilavesinin işlemin süresini yaklaşık 13 saate düşürdüğü tespit edilmiştir. Metil alkol buharının insan sağlığına zararı yüksek olduğundan metil alkol tercih edilmektedir. Sıyırma prosedürü

Atmosferik Zadra Prosesi ile aynıdır. Sıyırma sonrası elde edilen çözeltinin elektrolizi sırasında alkol buharının alev alması sözkonusu olduğundan çok dikkati olunması ve tedbir alınması gerekmektedir. Bu dezavantajdan dolayı alkol yerine glikol kullanılması durumunda işlemin toplam süresi yaklaşık 30 saate çıkmaktadır.

Micron Sıyırma Prosesi:

Bu proses Micron Research (Avustralya) firması tarafından geliştirilmiştir. Bu yöntem aslında “alkollü sıyırma” yönteminin geliştirilmiş halidir. Bu proseste yüklü aktif karbon kolonlarına ortam sıcaklığında %5-10 NaCN ve %1-2 NaOH konsantrasyonundaki çözelti içerisinde ön ıslatma yapılmaktadır. Bu çözelti kolon içerisinde alınmaktadır. Ön ıslatmaya tabi tutulmuş kolon hacminin yarısı kadar alkol kolon içerisine ilave edilerek kolon alt kısmından ısıtılmaktadır. Alkol olarak etil veya metil alkol kullanılabilir. Isıtma sonrası altın hızla çözeltiye geçmekte ve sonrası çözelti içerisinde bulunan alkol damıtılarak tekrar kazanılması sağlanmaktadır. Elde edilen nihai çözeltinin altın konsantrasyonu yukarıda bahsedilen yöntemlere göre oldukça yüksek olduğundan her türlü yöntemler ile altın çözeltiden kazanılabilmektedir. Bu yöntemin bir diğer avantajı ise sıyırma sonrası elde edilen aktif karbonun re-aktivasyon işlemine girmeden tekrar kullanılabilmesidir (Beyuo ve Abaka-Wood, 2016).

4.6.2. Merrill Crowe prosesi

Bu proseste temel olarak metalik çinko (Zhang ve ark., 2007) tozu kullanılmaktadır. Elektrokimyasal olarak çözelti içindeki altın çinko metalinden elektron alarak çökelmekte ve elektron veren çinko ise çözeltiye geçmektedir. Bu yöntem liç işlemleri sonrası elde edilen çözelti üzerine veya aktif karbondan sıyrılmış altın yüklü çözelti üzerine uygulanabilmektedir. İlgili çözeltilerin içinde bulunan çözünmüş oksijen işlemin başarısını olumsuz etkilediğinden çözelti vakum altında bir süre tutularak çözünmüş oksijen oranının düşürülmesi gerekmektedir. Sonrasında çinko tozu sisteme eklenerek altının çökmesi sağlanır. Elde edilen çökelek içerisinde Zn da bulunduğu için çökelek sıcak seyreltik sülfürik asit ile muamele edilerek çinkonun çözünerek katıdan uzaklaşması sağlanmaktadır. Bu esnada ortaya çıkabilecek HCN gazının tahliyesi için gerekli önlemlerin alınması gerekmektedir. Elde edilen nihai katı ergitilerek altın elde edilmektedir (İlyasoğlu ve ark., 2023).

4.6.3. Elektrolitik (Elektroliz) kazanım

Aktif karbondan sıyrılmış veya yüksek konsantrasyonlu liç çözeltisi üzerine uygulanabilmektedir. Çözeltinin altın konsantrasyonunun en az 500 mg/L olması istenen bu proseste altın çelik plakaları veya çelik yünü üzerinde katotta toplanmaktadır. Elektroliz işlemi 3.5 V potansiyel geriliminde 30-50 A akım şiddetinde gerçekleştirilmektedir. İşlem sırasında aşağıdaki reaksiyonlar gerçekleşmektedir;



Elektroliz işlemi sonrasında çelik yünü üzerinde toplanan metaller ile birlikte 750 °C sıcaklıktaki bir fırında kalsine edilir. Kalsinasyon, altın dışındaki diğer metallerin oksitlenmesini sağlamak ve ergitme işlemi sırasında bu oksitlerin curufa geçmesini kolaylaştırmak için yapılmaktadır (Schultz, 2022). Kalsine ürünün ergitme işlemi; gerekli curuf yapıcılar/flux ile karıştırılmış bir pota içerisinde 1250 °C sıcaklıkta gerçekleştirilmektedir. Bu ergitme sonrası curuf üstten sıyrılarak duruma göre altın-gümüş alaşımı halindeki ergimiş metal külçe (dore) halinde dökülmektedir. Bu külçeler >%95 oranında değerli metal içerirler ve altının rafinasyonu ayrı bir birimde yapılarak altın oranı >%99.6 Au olacak şekilde saflaştırılabilmektedir (Nsimba, 2009) .

5. MATERYAL ve METOD

5.1. Materyal

Sudan'ın Kızıl Deniz kıyısında kurulmuş Port Sudan şehrinin yaklaşık 25 km kuzeyinde cıva amalgamasyonu ile altın kazanımı yapan işletmelerin artık stoklarından (Şekil 5.1) numune alma kurallarına uygun olarak yaklaşık 50 kg numune alınmıştır. Temin edilen numune, Konya Teknik Üniversitesi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi Maden Mühendisliği Cevher Hazırlama laboratuvarına getirilerek el ve gözle fiziken incelenmiş ve içerisinde 0.5 cm kalınlığında toplaklaşmaların olduğu görülmüştür. Bu topakların dağıtılması amacıyla laboratuvarda bulunan çubuklu değirmende (Şekil 5.2) boş (öğütücü şarj olmaksızın) halde 15 dakika döndürülmüştür. Elde edilen numune daha sonra ızgaralı numune bölücüde (riffle sampling) (Şekil 5.3) azaltılmış ve yaklaşık 25 kg numune yapılması planlanan deneyler için ayrılmıştır, diğer kısım stoklanmıştır.



Şekil 5. 1. Çalışmalar için numune alınan artık yığını.

Stoklanan numuneden numune alma (karelaj) kurallarına uygun olarak numune azaltılmış bu numunelerin bir kısmı numunenin kimyasal ve mineralojik yapısının tespiti amacıyla XRF ve XRD analizleri, mikroskopik gözlemler (Şekil 5.4) ve elek analizi için kullanılmıştır. XRF ve XRD analiz sonuçları Çizelge 5.1 ve Şekil 5.5'de, elek analizi sonuçları Şekil 5.6'da verilmiştir.



Şekil 5. 2. Laboratuvar ölçekli çubuklu değirmen



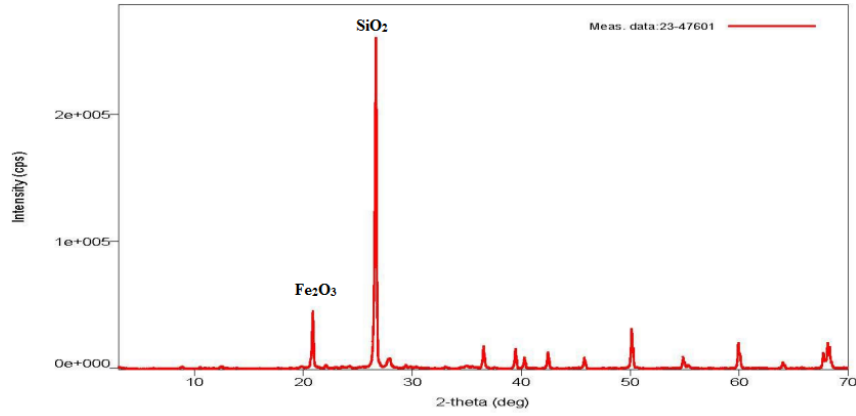
Şekil 5. 3. Izgaralı numune bölücü



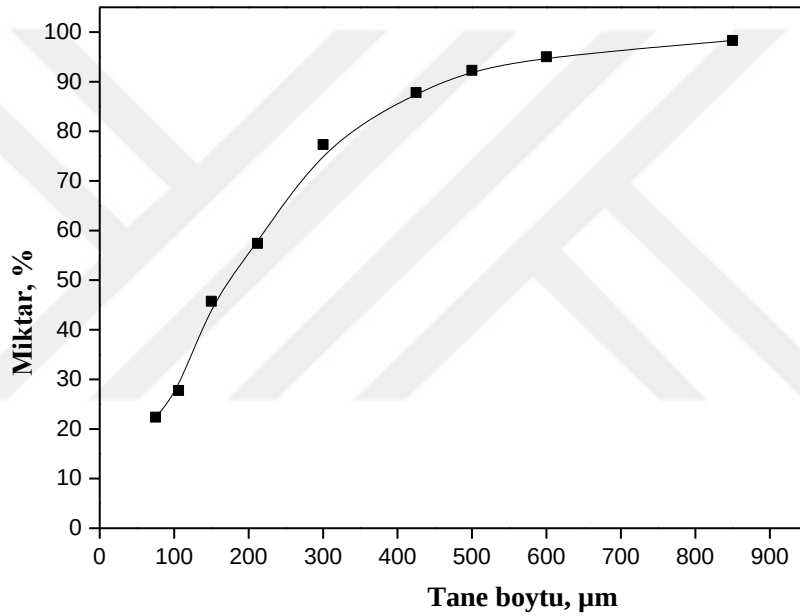
Şekil 5. 4. Olympus marka cevher mikroskobu (Model: SZ61)

Çizelge 5. 1. Çalışmalarda kullanılan numunenin XRF analiz sonuçları

Oksitler	Miktar, %
SiO ₂	77.100
Al ₂ O ₃	8.080
Fe ₂ O ₃	5.760
CaO	1.670
K ₂ O	0.970
As ₂ O ₃	0.054
Na ₂ O	1.100
SO ₃	0.392
TiO ₂	0.345
MnO	0.049
ZrO	0.005
CuO	0.011



Şekil 5. 5 .Çalışmalarda kullanılan numunenin XRD analizi sonuçları

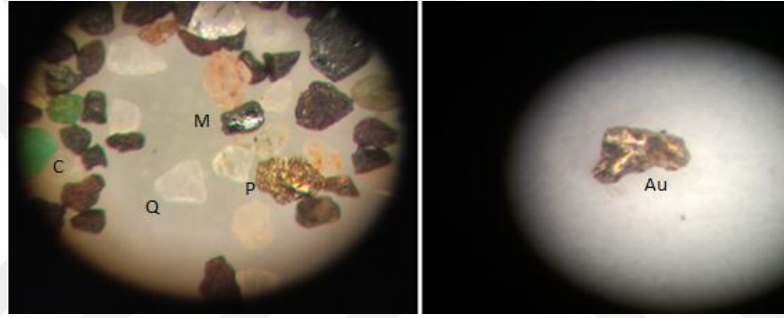


Şekil 5. 6. Çalışmalarda kullanılan numunenin elek analizi sonuçları

Elek analizlerinden elde edilen her bir fraksiyonun altın analizi yapılmış ve sonuçlar Çizelge 5.2’de verilmiştir. Mikroskopik gözlem için ayrılan numune klasik gravite zenginleştirmesine (tava yöntemi) tabi tutulmuş ve dipte kalan kısım (konsantre) cevher mikroskopunda gözlemlenmiştir. Gözlemler sonucu altın tanelerine rastlanmış ve fotoğraflanmıştır. Doğal olarak yoğunluğu yüksek metalik minerallerde elde edilen bu konsantre arasında; oksitli bakır, manyetit (Fe_3O_4) (mıknatıs ile test edilmiştir) ve pirit (FeS_2) rastlanmıştır (Şekil 5.7).

Çizelge 5. 2. Elek analizi sonucu elde edilen her bir fraksiyonun altın analizi sonuçları.

Fraksiyon tane boyutu (μm)	Au tenörü (g/ton)
-1000 +850	19.40
-850+600	15.68
-600+500	15.08
-500+425	16.16
-425+300	14.40
-300+212	11.32
-212+150	12.08
-150+106	13.58
-106+75	9.64
-75	30.16
Toplam	16.86

**Şekil 5. 7 .** Numuneden elde edilen gravite konsantresinin cevher mikroskobunda çekilmiş görüntüleri. (60x) (C: bakır oksit, Q: kuvars, M: manyetit, P: pirit, Au: altın)

Yukarıda verilen XRF ve XRD analizleri ve mikroskobik gözlem sonuçlarına göre çalışmalarda kullanılan numunenin;

- Ana minerali kuvarstan oluşmaktadır. Bunun yanı sıra demir ve bakır içeren minerallere de rastlanılmıştır.

-Numunenin ortalama Au tenörü 16.86 g/ton Au olup -75 μm tane boyutunun altın tenörü 30.16 g/ton'dur. Numune içerisindeki toplam altının yaklaşık %39'u bu tane boyutunda toplanmıştır. Başka bir deyişle altın büyük bir kısmı çok ince tane boyutundadır.

-Numune stok sahasında uzun süre beklediği için içerisinde bitki kalıntılarına da rastlanmıştır.

Deneysel çalışmalarda kullanılan NaCN Carlo Erba marka olup %95 saflığındadır. Adsorpsiyon çalışmalarında hindistan cevizinden üretilmiş ülkemizdeki altın üretimi yapan madencilik firmalarının kullandığı İspanya üretimi aktif karbon temin edilerek kullanılmıştır. Aglomerasyon çalışmalarında piyasada satılan portland

çimento ve deneysel çalışmalarda susuzlandırma amacıyla N100 flokülant kullanılmıştır.

5.2. Metod

Karıştırma liçi çalışmaları; ortam sıcaklığından kaynama sıcaklığına kadar 0.1 °C hassasiyetinde ayarlanabilen sıcak su banyosunda (Şekil 5.8) 1 L hacmindeki cam beher içerisinde 0,5 L hacminde çözeltiler kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Karıştırma liçi çalışmaları için devir hızı 40-2000 devir/dakika aralığında ayarlanabilen Heidolph marka RZ2021 model mekanik karıştırıcı kullanılmıştır. Liçing işlemlerinde kullanılan karıştırıcı pervane olarak yüzeyi asit ve baz gibi bilinen birçok kimyasal maddeden etkilenmeyen teflon kaplı bir şaft kullanılmıştır. Sıcaklığın etkisinin incelendiği çalışmalarda çözeltinin buharlaşarak hacminin azalmasını önlemek amacıyla içerisine soğuk su beslenebilen, çözeltiden buharlaşan suyu yoğunlaştırabilen iç bükey bir düzenek kullanılmıştır.



Şekil 5. 8. Karıştırma liçi çalışmalarda kullanılan deney düzeneği.

Karıştırma liçi çalışmalarda uygun pH ve NaCN konsantrasyonlarında hazırlanan 500 mL çözelti, planlanan sıcaklık değerine ayarlanmış sıcak su banyosuna yerleştirilerek deneyler öncesi çözeltinin çalışma sıcaklığına gelmesi sağlanmıştır. Çalışmalar belirli süre aralıklarında kesintisiz olarak gerçekleştirilmiştir. İlgili süreler

sonunda sistem durdurulmuş ve çözelti içerisinde yeterli miktarda numune alınarak analizler için hazırlanmıştır. Numunenin tane boyutu dağılımı ve içerdiği silikatlı kayaçların çok olması nedeniyle çökeltme olayı 2 gün gibi bir süre almış, numune alma ve susuzlandırma işlemleri sağlıklı bir şekilde gerçekleştirilememiştir. Bu nedenle ticari adı “N100” olan flokülanndan %0.01’lik çözelti hazırlanmış ve sistemden analizler için çözelti alınmadan 1 dk önce sisteme bu çözeltiden 0.5 mL eklenerek numunenin hızlıca çökmesi ile berrak bir çözelti elde edilebilmiştir. Berrak liç çözeltisinden her süre sonunda 4 mL numune alınmıştır. Çözeltilerin altın analizleri yine laboratuvarında bulunan GBC marka Sens AA model bir Atomik Absorpsiyon Spektrofotometre (AAS) kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Şekil 5.9).



Şekil 5. 9. Çözeltinin kimyasal analizleri için kullanılan Atomik Absorpsiyon Spektrofotometre.

Altın çözünme oranları/verimleri liç çözeltisindeki bu hacim azalmalarını dikkate alan Papangelakis ve Demopolous (1991) tarafından verilen eşitlik (Eşitlik 5.1) yardımıyla hesaplanmıştır.

$$X_{mi} = \frac{(V - \sum_{i=1}^{i-1} V_i) C_{m,i} + \sum_{i=1}^{i-1} V_i C_{m,i}}{M(\frac{C_m}{100})} \times 100 \quad (5.1)$$

Burada;

$X_{M,i}$: Liç çözeltisinden i. numune için altın çözünme verimi (%)

$C_{M,i}$: Liç çözeltisinden i. numune için altın konsantrasyonu (mg/L)

V: Liç çözeltisinin ilk (başlangıç) hacmi (L)

m: Deneylerde kullanılan altın numunesi ağırlığı (Computmg, Technology Handbook for ProfesswnaîII, & Explorer)

C_m : m: Deneylerde kullanılan altın numunesinin altın tenörü (%)

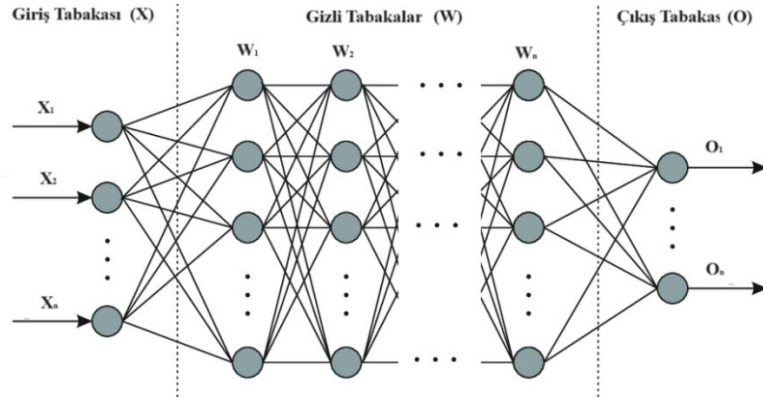
Karıştırma liçi çalışmaları sonrasında elde edilen nihai çözeltiyi süzme işlemi, süzgeç kağıdının çözünmüş altının bir kısmını adsorplayabileceği düşüncesiyle cam yünü kullanılarak gerçekleştirilmiştir ve elde edilen çözelti adsorpsiyon çalışmaları için stoklanmıştır.

Süzülme liçi ve perkolasyon liçi çalışmaları için aglomerasyon işlemleri silindirik bir kap içerisinde çimento kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Ayrıca çalışmalardan elde edilen sonuçların Artifical Neural Network (Yapay Sinir Ağları) sistemi ile işlenerek sonuçların tahmini çalışmaları yapılmıştır. Bu amaçla karıştırma liçi deney sonuçları kullanılmıştır.

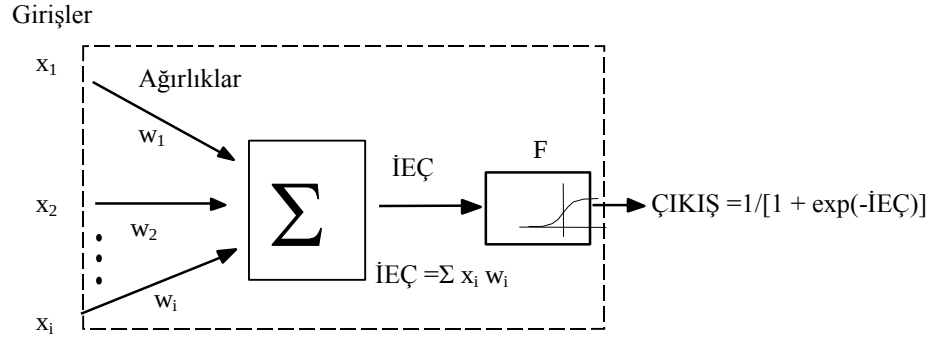
5.3. Yapay Sinir Ağları (YSA)

Yapay sinir ağları; insan beynini taklit ederek sisteme sunulan verilerin altında yatan ilişkileri ortaya çıkartmak için tasarlanmış yapay bir sistemdir. Bu sistem, belli bir problemi çözmek için sisteme girilen verileri paralel olarak işleyerek çok hızlı sonuçlara gidebilmesi ile bilinir. Bu nedenle gerçek zamanlı problem çözmede oldukça etkilidir (Rumelhart ve ark., 1986). Genel anlamda Yapay Sinir Ağları (YSA), insan beynindeki birçok nöronun veya yapay olarak ve farklı etki seviyeleriyle birbirine bağlanan basit işlem elemanlarının birbiri ile ilişkili/bağlı karmaşık bir sistem olarak kabul edilebilir. YSA, ağ nöronlarının birbirine bağlanması yoluyla oluşturulur ve genellikle katmanlar halinde düzenlenir (Şekil 5.10). Çok katmanlı algılayıcılar bu uygulamada en basit ve dolayısıyla en yaygın kullanılan YSA mimarileridir. Çok katmanlı algılayıcılar çok katmandan oluşur. Bunlar; giriş katmanı, çıkış katmanı ve ara katmanlardır. Bu ara katmanlar bazen gizli katman olarak da adlandırılmaktadır (Haykin, 1998). Bunla birlikte çeşitli YSA mimarileri mevcuttur ve son yıllarda aktif olarak kullanılmaktadır (Computmg ve ark., 1996). Bu çalışmada YSA yapısına ait çok katmanlı algılayıcı olarak ve yaygın biçimde kullanılan Levenberg-Marquardt (LM) öğrenme algoritması kullanılmıştır (Jang ve Mizutani, 1996).



Şekil 5. 10. Genel çok katmanlı YSA yapısı

Giriş katmanındaki X nöronlar sadece giriş sinyallerini, W gizli katmanındaki nöronlara dağıtmak için tampon görevi görür. Gizli katmandaki her bir nöron, giriş sinyallerini ilgili bağlantıların kuvvetleriyle ilişkilendirdikten sonra toplar ve çıkışı (O) toplamın bir fonksiyonu olarak hesaplar. YSA'nın çalışmasına esas teşkil eden en küçük bilgi işleme birimi yapay sinir hücresidir Şekil 5.11'de gösterildiği gibi girdiler, ağırlıklar, birleşme fonksiyonu, aktivasyon fonksiyonu ve çıkış olmak üzere 5 bileşenden meydana gelir. Girdiler, diğer hücrelerden yada dış ortamlardan bağlantılar üzerindeki ağırlıklar üzerinden hücreye giren verilerdir. Ağırlıklar, ilgili girişin hücre üzerindeki etkisini belirler. Birleştirme fonksiyonu, bir hücreye gelen net girdiyi hesaplayan bir fonksiyondur ve genellikle net girdi, girişlerin ilgili ağırlıkla çarpımlarının toplamıdır. Aktivasyon fonksiyonu ise birleştirme fonksiyonundan elde edilen net girdiyi bir işlemde geçirerek hücre çıkışını belirleyen ve genellikle doğrusal olmayan bir fonksiyondur (Karna ve Breen, 1989).



Şekil 5. 11. Yapay sinir hücresi

YSA modeline verilen giriş değerlerine önce toplama fonksiyonları uygulanır. Toplama fonksiyonundan alınan her bir işleme ait çıkış değeri yani işlem elemanı çıkışı (İEÇ),

$$\text{İEÇ} = \sum_{i=1}^N x_i w_{ij} - \theta_i \quad (5.2)$$

Olarak bulunur. Burada; X_i , i 'nci girişi, W_{ij} , j 'inci elemanından i 'inci elemanına bağlantı ağırlığını ve θ_i değerini ifade eder. Elde edilen çıkış değerleri aktivasyon fonksiyonlarından birine uygulanarak yani herhangi bir öğrenme eğrisine tatbik edilerek sonuç çıkış değerine ulaşılır. Elde edilen be değer,

$$\text{ÇIKIŞ} = f(\text{İEÇ}) = \frac{1}{1 + e^{-\text{İEÇ}}} \quad (5.3)$$

ile hesaplanır.

5.2.1.1. Aktivasyon fonksiyonları

YSA, aktivasyon fonksiyonu kullanmadan karmaşık yapıdaki problemlere (nonlinear) istenen hedefi sağlayacak bir algoritma olamamaktadır. Bunun için ara ve çıkış katmanlarında kullanılmak üzere aktivasyon fonksiyonları kullanılır. Uygulanan aktivasyon fonksiyonu lineer olması durumunda, ağ lineer özellik gösterir. Sigmoid fonksiyon ise pozitif değerler üretir, fonksiyon tanjant hiperbolik ise hem pozitif hem de negatif değerler üretir. Genellikle ÇKP yapılarında sigmoid veya tanjant hiperbolik fonksiyonlar tercih edilir. Hangi fonksiyonun kullanılacağı probleme bağlı olarak deneme yanılma yoluyla belirlenebilir. En çok kullanılan aktivasyon fonksiyonları Çizelge 5.3'de verilmiştir.

Çizelge 5. 3. Aktivasyon fonksiyonları

Aktivasyon fonksiyonları	Matematiksel yapı
Sigmoid	$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}}$
Lineer	$f(x) = x$
Hiperbolik Tanjant	$f(x) = \frac{1 - e^{-2x}}{1 + e^{-2x}}$
Çoklu-kuadratik	$f(x) = \frac{\sqrt{r^2 + (x - c)^2}}{r}$
Gauss tipi	$f(x) = e^{-\frac{(x-c)^2}{r^2}}$

Bu çalışmada ara ve çıkış katmanlarında “Hiperbolik Tanjant” aktivasyon fonksiyonu kullanılmıştır. Sonuçlar Bölüm 6.8’de sunulmuştur.

6. ARAŞTIRMA BULGULARI

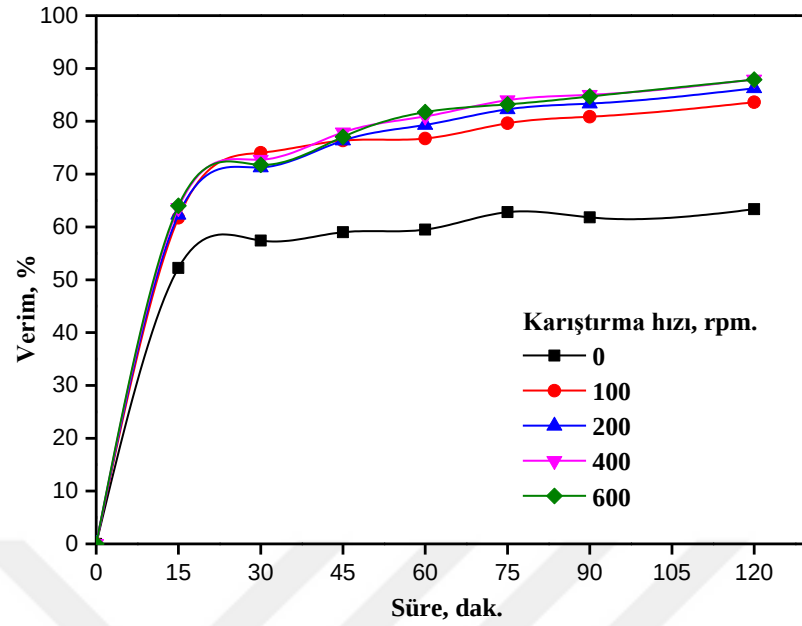
6.1. Karıştırma liçi

6.1.1. Karıştırma hızının altın çözünmesine etkisi çalışmaları

Karıştırma hızının altın çözünmesine olan etkisini araştırmak amacıyla çalışmalar pH 10.30'da ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), 0.5 g/L NaCN konsantrasyonunda, 25 °C sıcaklıkta ve %40 katı/sıvı oranı sabit şartlarında 0, 100, 200, 400 ve 600 dev/dak (rpm) karıştırma hızlarında gerçekleştirilmiştir. Deneyler kesintisiz olarak yapılmıştır ve her süre sonunda sistem durdurularak analiz için numune alınmıştır. Sistem durdurulmadan 1 dakika önce numune almayı kolaylaştırmak amacıyla sisteme 0.5 mL N100 flokülant çözeltisinden (%0.01 w/w) eklenmiştir. Elde edilen sonuçlar Çizelge 6.1 ve Şekil 6.1'de verilmiştir.

Çizelge 6. 1. Karıştırma hızının Au çözünmesine olan etkisi

Süre. Dak	Au çözünme verimi, %				
	0 dev/dak	100 dev/dak	200 dev/dak	400 dev/dak	600 dev/dak
15	52.23	61.72	62.30	63.58	64.01
30	57.41	74.04	71.27	72.72	71.77
45	58.99	76.34	76.34	77.89	77.06
60	59.49	76.73	79.32	80.91	81.75
75	62.81	79.62	82.27	83.99	83.19
90	61.82	80.85	83.35	85.02	84.69
120	63.36	83.60	86.24	87.91	87.87



Şekil 6. 1. Karıştırma hızının altın çözünmesine olan etkisi

Çizelge 6.1 ve Şekil 6.1'in incelenmesi sonucu aşağıdaki sonuçlara ulaşılabılır.

- Karıştırma hızı arttıkça Au çözünme hızı da artmaktadır. Örneğin 15 dakikalık bir liç işlemi sonucunda 0-600 rpm karıştırma hızlarında elde edilen Au çözünme verim değerleri sırasıyla %52.23, %61.72, %62.30, %63.58 ve %64.01 olduğu görülmektedir. 400 rpm ve 600 rpm karıştırma hızlarında altın çözünme verimlerinde birbirine çok yakın değerler elde edilmiştir. Başka bir deyişle 400 rpm karıştırma hızının üzerindeki değerlerde kayda değer altın çözünme verimi gözlemlenmemiştir.
- Siyanürleme proseslerinde normalde altın çözünmesi uzun zaman alan bir işlemdir. Ancak, 100 rpm karıştırma hızında 120 dakika sonunda altının yaklaşık %84'ü çözeltiliye alınabilmektedir. Cıvanın altın çözünme hızına pozitif olarak muazzam etkisinin olduğu bilinmektedir. Ama numune üzerinde yapılan analizler sonucu cıvaya rastlanmamıştır. Çözünme hızının yüksek olması durumu altının çok küçük tane boyutunda olması ve dolayısıyla çözelti ile temas eden yüzey alanının fazla olması ile açıklanabilir (John Marsden, 1992) .
- Karıştırma hızının artmasıyla altın çözünme hızının artması tipik bir difüzyon kontrollü prosesin özelliğidir.

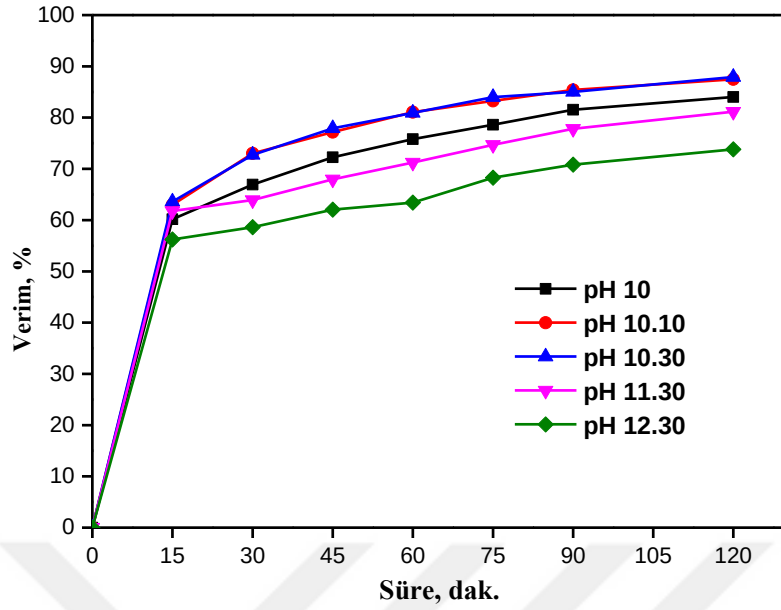
Sonraki parametrelerin araştırılması için 400 rpm karıştırma hızı seçilmiştir.

6.1. 2. pH'ın Altın Çözünmesine Etkisi Çalışmaları

pH'ın altın çözünmesine olan etkisini araştırmak amacıyla çalışmalar 400 rpm karıştırma hızında, 0.5 g/L NaCN konsantrasyonunda, 25 °C sıcaklıkta ve %40 katı/sıvı oranı sabit şartlarında pH 10.0, 10.10, 10.30, 11.30 ve 12.30 değerlerinde gerçekleştirilmiştir. Siyanürlü çözeltide CN⁻ iyonlarının kaybının önüne geçilebilmesi için çözelti pH'ının en az 10.00 değerinde olması gerektiğini bildirmişlerdir(Logsdon ev ark., 1999). Bu nedenle çalışmalar pH 10'da başlatılmıştır. Deneyler kesintisiz olarak yapılmıştır ve her süre sonunda sistem durdurularak analiz için numune alınmıştır. Sistem durdurulmadan 1 dakika önce numune almayı kolaylaştırmak amacıyla sisteme 0.5 mL N100 flokülant çözeltisinden (%0.01 w/w) eklenmiştir. Elde edilen sonuçlar Çizelge 6.2 ve Şekil 6.2'de verilmiştir.

Çizelge 6. 2. pH'ın Au çözünmesine olan etkisi.

Süre. Dak	Au çözünme verimi, %				
	pH 10	pH 10.10	pH 10.30	pH 11.30	pH 12.30
15	60.16	62.98	63.58	61.78	56.22
30	66.92	73.02	72.72	63.92	58.62
45	72.25	77.18	77.89	67.94	62.04
60	75.81	81.06	80.91	71.24	63.43
75	78.62	83.25	83.99	74.68	68.27
90	81.53	85.41	85.02	77.81	70.81
120	84.03	87.46	87.91	81.16	73.81



Şekil 6. 2. pH'nın Au çözünmesine olan etkisi.

Çizelge 6.2 ve Şekil 6.2'in incelenmesi sonucu aşağıdaki sonuçlara ulaşılabilir.

- pH 10-10.10 aralığında pH arttıkça Au çözünme hızı da artmaktadır. pH 10.10 ve pH 10.30 değerlerinde yapılan liç işlemi sonuçlarında Au çözünme hızı hemen hemen aynı olup pH 10.30 değerinden sonra Au çözünme hızlarında azalma meydana gelmektedir.
- pH ayarlayıcı olarak Ca(OH)_2 kullanılmış olması nedeni ile pH 10.30 değerlerinden büyük pH değerlerinde çözünme hızının hızla düşmesinin nedeni reaksiyon ürünü olarak oluşan H_2O_2 'nin (Eşitlik 4.5) Ca^{+2} iyonları ile altın yüzeyinde reaksiyona girerek CaO_2 (kalsiyum süperoksit) oluşturması (Eşitlik 4.11) olarak verilebilir. (Habashi, 1997) .

Diğer parametrelerin araştırılması için pH 10.30 seçilmiştir.

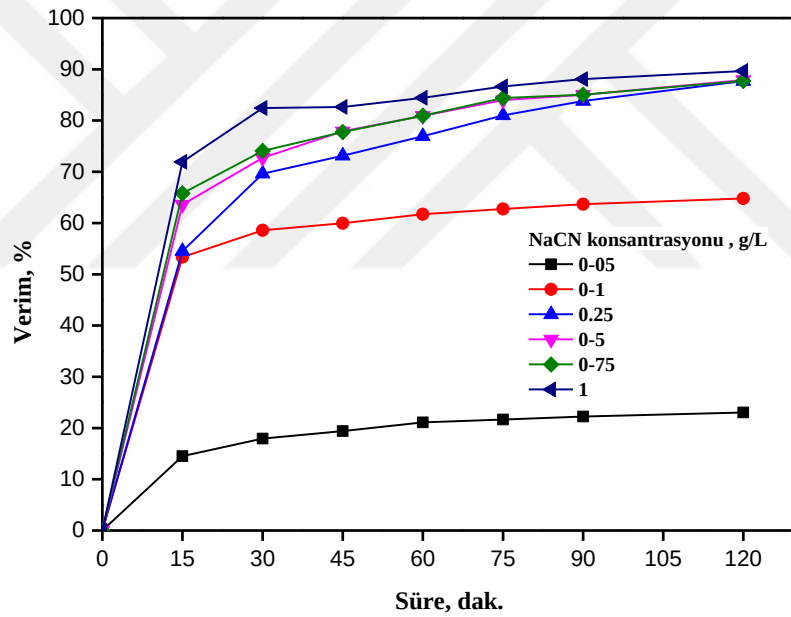
6.1.3. NaCN konsantrasyonunun altın çözünmesine etkisi çalışmaları

NaCN konsantrasyonunun altın çözünmesine olan etkisini araştırmak amacıyla çalışmalar pH 10.30'da (Ca(OH)_2), 25 °C sıcaklıkta, 400 rpm karıştırma hızında ve %40 katı/sıvı oranı sabit şartlarında 0.05, 0.1, 0.25, 0.50, 0.75 ve 1.0 g/L konsantrasyonlarında gerçekleştirilmiştir. Deneyler kesintisiz olarak yapılmıştır ve her süre sonunda sistem durdurularak analiz için numune alınmıştır. Sistem

durudurulmadan 1 dakika önce numune almayı kolaylaştırmak amacıyla sisteme 0.5 mL N100 flokülant çözeltisinden (%0.01 w/w) eklenmiştir. Elde edilen sonuçlar Çizelge 6.3 ve Şekil 6.3’de verilmiştir.

Çizelge 6. 3. NaCN konsantrasyonunun Au çözünmesine olan etkisi.

Süre, dk	Au çözünme verimi, %					
	0.05 g/L	0.10 g/L	0.25 g/L	0.50 g/L	0.75 g/L	1.0 g/L
15	14.53	53.36	54.52	63.58	65.80	71.93
30	17.95	58.59	69.63	72.72	74.07	82.43
45	19.41	59.97	73.12	77.89	77.76	82.65
60	21.10	61.73	76.95	80.91	80.94	84.42
75	21.66	62.75	81.02	83.99	84.39	86.65
90	22.25	63.69	83.81	85.02	85.04	88.10
120	23.02	64.78	87.72	87.91	87.75	89.67



Şekil 6. 3. NaCN konsantrasyonunun Au çözünmesine olan etkisi.

Çizelge 6.3 ve Şekil 6.3’ün incelenmesi sonucu aşağıdaki sonuçlara ulaşılabilir.

- NaCN konsantrasyonu arttıkça Au çözünme hızı da artmaktadır. Örneğin 15 dakikalık bir liç işlemi sonucunda 0.05-1.0 g/L NaCN konsantrasyonu aralığında elde edilen Au çözünme verim değerleri sırasıyla %14.53, %53.36, %54.52, %63.58, %65.80 ve %71.93 olduğu görülmektedir. 120 dakikalık liç işlemi sonucunda 0.25-1.0 g/L NaCN konsantrasyon aralığında Au çözünme verimleri yaklaşık %88 civarında kalmıştır. Çalışılan numune içerisindeki

altının ince taneli olanlar hızla çözünürken, siyanürleme işlemlerinin doğası gereği iri taneli altınların çözünme hızının yavaş kalmasından kaynaklandığı kanısına varılmıştır (Habashi, 1997).

ii) Eşitlik (Habashi, 1997) ve (4.6)'dan dörüleceği üzere CN^- iyonu konsantrasyonu arttıkça reaksiyonun sağa kayma eğilimi artar. Ancak, CN^- iyonu konsantrasyonu tek başına etkili olamaz. Çünkü sabit sıcaklıkta reaksiyon hızının artması reaksiyona girenlerin konsantrasyonunun artmasına bağlıdır. Bu nedenle tek başına CN^- iyonunun konsantrasyonundan ziyade çözelti içerisinde çözünmüş O_2 konsantrasyonu da etkili olacaktır. Karıştırma hızı (400 rpm) türbülans akış şartlarına uyduğu için reaksiyona giren çözelti içerisinde çözünmüş O_2 tüketimini karıştırmanın etkisiyle havadaki O_2 'in çözeltiye geçerek çözünmüş oksijen konsantrasyonunun sabit tutması ile açıklanabilir (Habashi, 1997).

iii) Yapılan ayrıntılı çalışmalar Au çözünme hızının artan CN^- iyonu konsantrasyonuna bağlı olarak arttığı ve belli bir konsantrasyondan sonra Au çözünme hızının sabit hale geldiği, yani bu konsantrasyondan sonra CN^- iyonunun etkisinin olmadığı gösterilmiştir. Ancak basınç liçi (otoklavliçi) şartlarında oksijen kısmi basıncının artması da çözünme hızını kayda değer bir şekilde arttırdığı bildirilmiştir (Deitz ve Halpern, 1953).

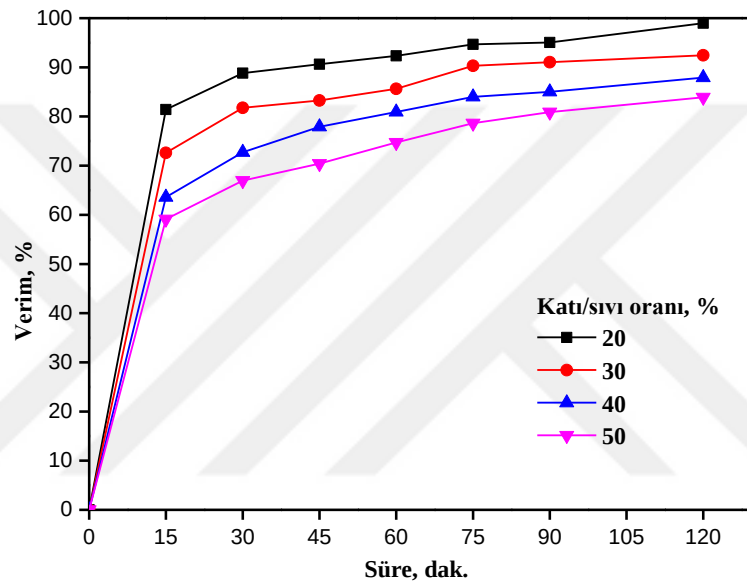
Diğer parametrelerin araştırılması için NaCN konsantrasyonu olarak 0.5 g/L seçilmiştir.

6.1.4. Katı/Sıvı oranının altın çözünmesine etkisi çalışmaları

Katı/sıvı oranının altın çözünmesine olan etkisini araştırmak amacıyla çalışmalar pH 10.30'da ($Ca(OH)_2$), 25 °C sıcaklıkta, 400 rpm karıştırma hızında ve 0.5 g/L NaCN konsantrasyonunu sabit şartlarında %20, %30, %40 ve %50 katı/sıvı (K/S) oranlarında gerçekleştirilmiştir. Deneyler kesintisiz olarak yapılmıştır ve her süre sonunda sistem durdurularak analiz için numune alınmıştır. Sistem durdurulmadan 1 dakika önce numune almayı kolaylaştırmak amacıyla sisteme 0.5 mL N100 flokülant çözeltisinden (%0.01 w/w) eklenmiştir. Elde edilen sonuçlar Çizelge 6.4 ve Şekil 6.4'de verilmiştir.

Çizelge 6. 4. Katı/sıvı oranının Au çözünmesine olan etkisi.

Süre, Dak	Au çözünme verimi, %			
	K/S:%20	K/S:%30	K/S:%40	K/S:%50
15	81.42	72.61	63.58	59.12
30	88.81	81.76	72.72	66.96
45	90.63	83.26	77.89	70.41
60	92.33	85.62	80.91	74.72
75	94.66	90.32	83.99	78.65
90	95.06	91.04	85.02	80.88
120	98.98	92.45	87.91	83.91

**Şekil 6. 4.** Katı/sıvı oranının Au çözünmesine olan etkisi.

Çizelge 6.4 ve Şekil 6.4'den görüleceği üzere katı/sıvı oranı arttıkça Au çözünme verimi de azalmaktadır. Bu azalma birkaç şekilde izah edilebilir.

- Katı oranı arttıkça çözelti içerisindeki katı miktarında artması ile sonuçlanacağından birim ağırlık için gereken CN^- iyonu miktarı azalmaktadır.
- Aynı şekilde çözelti içerisinde çözünmüş oksijen miktarı da birim ağırlık için gereken oksijen miktarını azaltmaktadır.
- Katı oranının azalması katının çözelti ile temas süresini de arttırmaktadır.

Normalde katı oranının azalması ile çözünme veriminin artması endüstriyel şartlarda bir şey ifade etmez. Çünkü katı oranının yüksek olması birim zamanda işleme tabi tutulan cevher miktarını arttıracığından kapasite artışı ile sonuçlanır. Başka bir deyişle katı oranının uygun şartlar için 2 katına çıkması tesis kapasitesinin aynı oranda

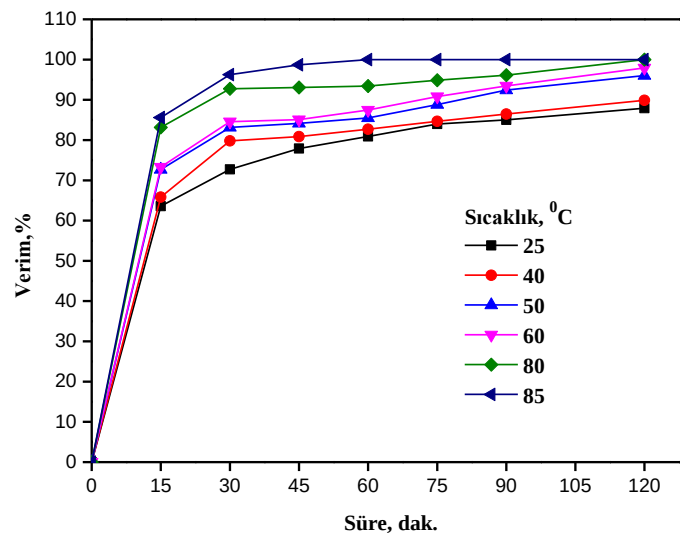
artması ile yani birim zamanda işlenen cevher miktarının artışı sağlar. Böylelikle ilk yatırım giderleri ve diğer giderlerin (çalışan giderleri, enerji giderleri vs.) azalması sağlanmış olur (Ahtiainen ve Lundström, 2019).

6.1.5. Sıcaklığın altın çözünmesine etkisi çalışmaları

Sıcaklığın altın çözünmesine olan etkisini araştırmak amacıyla çalışmalar pH 10.30'da ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), %40 katı/sıvı oranı, 400 rpm karıştırma hızında ve 0.5 g/L NaCN konsantrasyonunu sabit şartlarında 25-85 °C sıcaklık aralığında gerçekleştirilmiştir. Deneyler kesintisiz olarak yapılmıştır ve her süre sonunda sistem durdurularak analiz için numune alınmıştır. Sistem durdurulmadan 1 dakika önce numune almayı kolaylaştırmak amacıyla sisteme 0.5 mL N100 flokülant çözeltisinden (%0.01 w/w) eklenmiştir. Elde edilen sonuçlar Çizelge 6.5 ve Şekil 6.5'de verilmiştir.

Çizelge 6. 5. Sıcaklığın Au çözünmesine olan etkisi.

Süre, dk.	Au çözünme verimi, %					
	25 °C	40 °C	50 °C	60 °C	80 °C	85 °C
15	63.58	65.82	72.70	73.30	83.15	85.60
30	72.72	79.80	83.15	84.56	92.74	96.25
45	77.89	80.87	84.16	85.09	93.06	98.71
60	80.91	82.69	85.51	87.45	93.43	100.00
75	83.99	84.66	88.82	90.80	94.87	100.00
90	85.02	86.48	92.43	93.45	96.13	100.00
120	87.91	89.88	96.04	97.94	100.00	100.00



Şekil 6. 5. Sıcaklığın Au çözünmesine olan etkisi

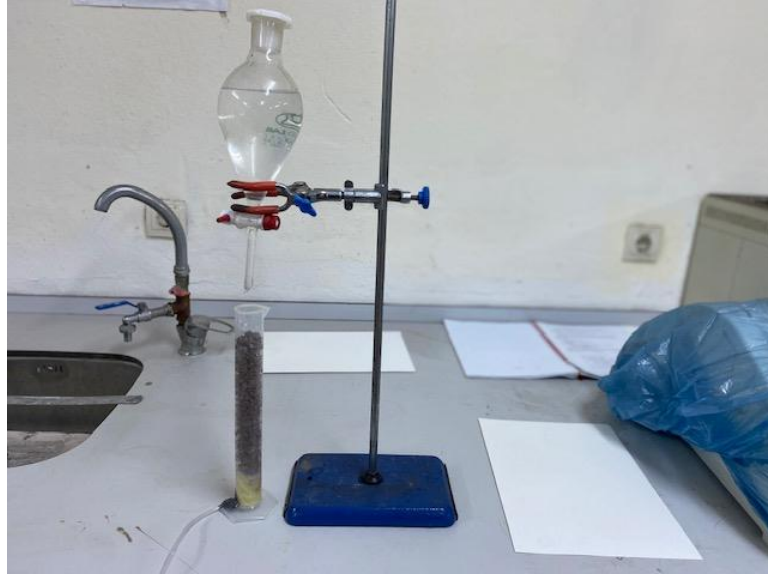
Çizelge 6.5 ve Şekil 6.5'ün incelenmesi sonucu aşağıdaki sonuçlara ulaşılabilir.

- i) Sıcaklık arttıkça Au çözünme hızı da artmaktadır. Örneğin 45 dakikalık bir liç işlemi sonucunda 25-85 °C sıcaklık aralığında (Çizelge 6.5) Au çözünme verimleri 25 °C için %77.89, 40 °C için %80.87, 50 °C için %84.16, 60 °C için %85.09, 80 °C için %93.06 ve 85 °C için %98.71 olarak gerçekleşmiştir.
- ii) 80 °C sıcaklıkta 120 dakikalık liç işlemi sonunda altının tamamı çözeltiye alınmıştır. Yine 85 °C sıcaklıkta 60 dakikalık bir liç işlemi sonucunda aynı değere ulaşılmıştır.
- iii) Kimyasal reaksiyonlarda genel olarak sıcaklığın artışı reaksiyon hızının artışı ile sonuçlanır. Ancak siyanürlü ortamda atmosfer basıncı altında gerçekleşen reaksiyonlarda reaksiyona girenler arasında çözelti içerisinde çözünmüş oksijen de olduğundan sistemin belli bir sıcaklığa kadar pozitif ve bu sıcaklıktan sonra negatif etkilenmesi beklenir. Çünkü gazların su içerisindeki çözünürlüğü sıcaklık artışı ile azalır. Bu çalışmada 85 °C sıcaklığa kadar sistemin davranışı incelenmiştir. Çünkü yapılan çalışmalar altın çözünme hızının 85 °C sıcaklığa kadar arttığı bu değer üzerindeki sıcaklıklarda göreceli olarak çözünme hızının azaldığı bildirilmiştir (Habashi, 1997).

6.2. Perkolasyon Liçi

Karıştırma liçi çalışmalarında ince tane boyutundaki numune liç işlemleri sonrasında susuzlandırma problemleri nedeniyle bir flokülant yardımıyla (N100) çökmesi sağlanarak analizler için numune alınabilmektedir. Numune içerisinde bulunan kuvars yüzeyi geniş bir pH aralığında negatif (-) olması süspansiyonun çökmesine olumsuz etki yapmakta ve çökeltme işlemi günler alabilmektedir. Tesis bazında bir çalışma düşünüldüğünde bu durum büyük problemler oluşturabilir. Her ne kadar liç işlemlerinde pH ayarlayıcı olarak kullanılan $\text{Ca}(\text{OH})_2$ bünyesindeki Ca^{+2} iyonları susuzlamaya yardımcı olacağına dair bir kanaat oluşsa yapılan çalışmalarımızda kayda değer bir etkinin olumlu olmadığı gözlemlenmiştir.

Perkolasyon liçi çalışmaları için 250 mL hacimli plastik mezür perkolasyon kolonu olarak kullanılmıştır (Şekil 6.6). Mezürün tabanına cam yünü yerleştirilerek kolon altından verilen çıkış deliğinin tıkanmasının önüne geçilmeye çalışılmıştır.



Şekil 6. 6. Perkolasyon çalışmalarında kullanılan deney düzeneği.

Perkolasyon deneyleri için orijinal numune üzerinde ön deneyler yapılmış ve susuzlandırma işlemi gerçekleştirilemediğinden çalışma sonlandırılmıştır. Bu problemi aşmak amacı ile numune çimento kullanılarak aglomere edilmiştir. Aglomere edilen numune üzerinde perkolasyon liçi deneyleri gerçekleştirilmiştir.

6.2.1. Aglomerasyon

Aglomerasyon çalışmalarında bağlayıcı olarak portland çimento (CM1) kullanılmıştır. Aglomerasyon işlemi 2.5 L hacminde silindirik bir haznenin içerisinde bilyalı değirmen döndürme ünitesi kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Şekil 6.7).



Şekil 6. 7. Peletleme deneylerinde kullanılan hazne ve bilyalı değirmen ünitesi.

Çalışmalar 100 g orijinal numune üzerinde içerisine çeşitli miktarlarda çimento eklenerek gerçekleştirilmiştir. Çimento-numune karışımı silindirik haznenin içerisine yerleştirilerek sistem çalıştırılmış ve içerisine dönme esnasında su püskürtülmüştür. Yapılan ön deneyler sonucu sistem eklenen su miktarı ve sistemin dönüş hızı optimize edilmeye çalışılmış olup dönüş hızı kritik hızın %60 olacak şekilde iyi sonuçların alındığı tespit edilmiştir. Sisteme eklenen su miktarı kritik sonuçlara neden olmuştur. Eklenen az miktarda su aglomerasyonu kısmen sağlarken aglomerasyonun gerçekleştiği miktarın çok az üstünde eklenen su aglomeratların dağılmasına neden olmuştur. Bu nedenle aglomeratın oluştuğu su miktarı tespit edilerek aglomerasyon çalışmalarında aynı miktarda su eklenerek aglomeratlar oluşturulmuştur. Her çimento oranı için aynı çalışma sistemi uygulanmıştır.

Tesis bazında normalde ocaktan çıkan cevherin aglomerasyon işlemleri için her 1 ton cevher için ağırlıkça 2 kg (%0.5 w/w) oranında çimento kullanılmaktadır. Kullanılan bağlayıcı miktarı inşaat sektöründe olduğu gibi kullanılan kumun/aglomeranın tane boyut dağılımı ile ilişkilidir. Numunenin tane boyutunun çok ince boyutlarda dağılmış olması doğal olarak numunenin yüzey alanını arttırmaktadır. Bu nedenle yüzeyi kaplayacak miktarda çimento/bağlayıcı kullanımı önemlidir. Çalışmalarda her 100 g numune için 0.5, 1, 3, 5, 7 ve 9 g çimento kullanılarak en uygun çimento miktarının tespiti yapılmaya çalışılmıştır. Miktar olarak 0.5 ve 1 g çimento kullanılan deneylerde bir bağlayıcılık gözlemlenmemiş ve elde edilen aglomeratlar hızla dağılmıştır. Bu nedenle çalışmalara diğer çimento ağırlık oranları için yoğunlaştırılmıştır.

7 g çimentonun (7/100 w/w) kullanıldığı aglomerasyon çalışmalarında elde edilen aglomeratlar Şekil 6.8’de verilmiştir.



Şekil 6. 8. 7 g çimento 100 g numune üzerinde gerçekleştirilen aglomerasyon sonuçları.

Çalışmalar sonucu elde edilen aglomeratların prizlenmesi için 3 gün süreyle açık alanda bekletilmiştir. Daha sonra aglomeratlar tartılarak ağırlıkları belirlenmiş ve her bir aglomerat numunesi için Au tenörleri bu ağırlık değerlerine göre tekrardan düzenlenmiştir.

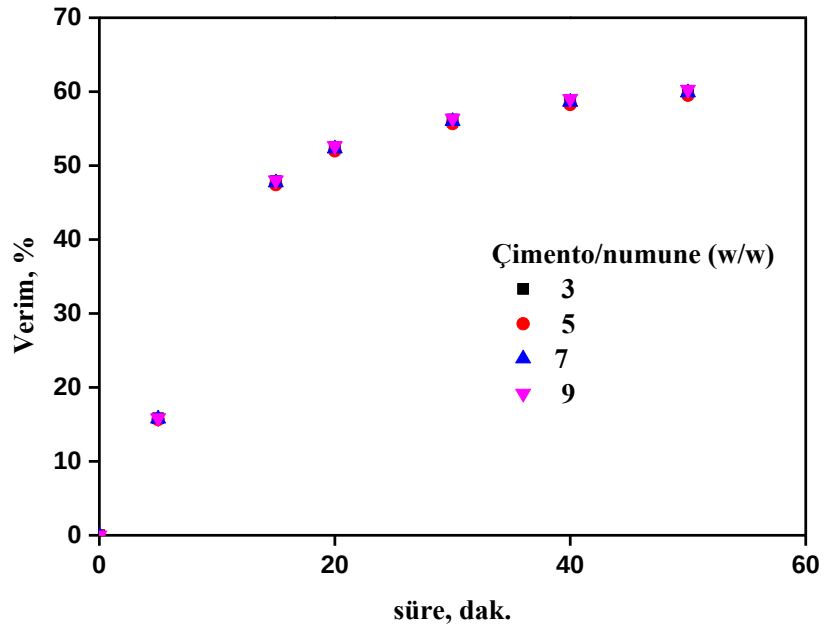
Perkolasyon liçi çalışmalarında, çözelti hazırlama işlemleri için karıştırma liçi çalışmalarından elde edilen uygun Katı/Sıvı oranı, pH ve NaCN konsantrasyonu kullanılmıştır. Her bir deney için 200 g aglomerat ve 500 mL NaCN çözeltisi kullanılmıştır. Çalışmalarda siyanür çözeltisi ayırma hunisi marifetiyle deney düzeneğinin üzerine üst taraftan damlatılarak verilmiştir. Çalışmalar ortam sıcaklığında (yaklaşık 25 °C) gerçekleştirilmiş olup parametre olarak çözelti besleme hızının Au çözünmesine olan etkisi araştırılmıştır.

6.2.2. Perkolasyon liçi deney sonuçları

Perkolasyon liçi deneyleri için hazırlanan NaCN çözeltisinin damla sayısı-hacim ilişkisinin belirlenmesine çalışılmıştır. Çalışmalar sonucu her 10 mL çözeltinin 125 damla olduğu tespit edilmiştir. Her bir bağlayıcı oranı için (3 g, 5 g, 7 g, ve 9 g) için dakikada 125 damla olacak şekilde deneyler yapılmış ve elde edilen sonuçlar Çizelge 6.6 ve Şekil 6.9’da verilmiştir.

Çizelge 6. 6. 10 mL/dak çözelti akışı için elde edilen Au çözünme verimleri.

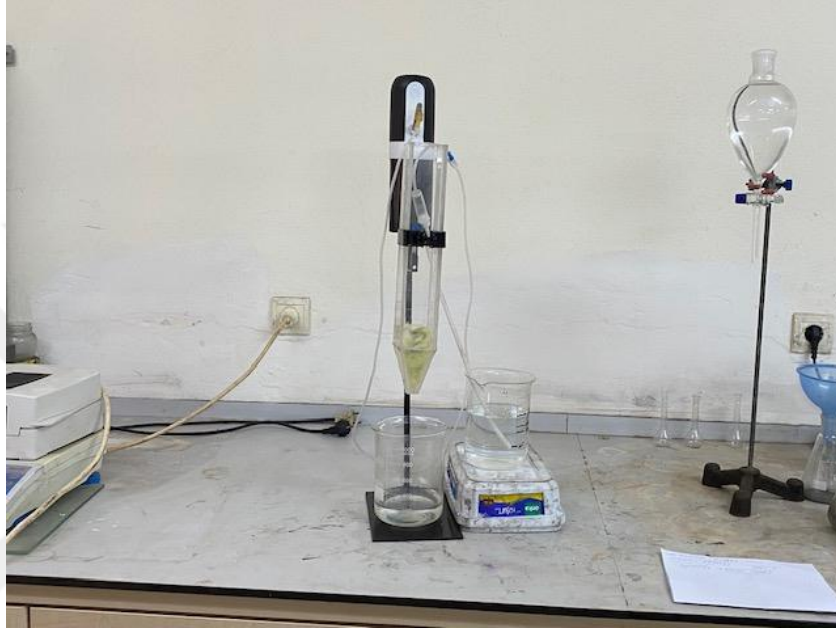
Süre dk	3/100 (w/w)	5/100 (w/w)	7/100 (w/w)	9/100 (w/w)
0	0	0	0	0
5	15.82			
15	47.89	15.66	15.76	15.87
20	52.51	47.41	47.70	48.03
30	56.23	51.98	52.30	52.67
40	58.85	55.67	56.00	56.40
50	60.11	58.26	58.61	59.03
		59.51	59.87	60.29

**Şekil 6. 9.** 10 mL/dak çözelti akışı için elde edilen Au çözünme verimleri.

Çizelge 6.6'da görüleceği üzere her bir bağlayıcı oranlarıyla elde edilen aglomeratlar için Au çözünme verimleri hemen hemen benzer sonuçlara ulaşılmıştır. Deneyler sonunda 3/100 (w/w) ve 5/100 (w/w) ağırlık oranlarında elde edilen aglomeratlar az da olsa bozulmuş ve çözeltide bir miktar bulanıklık meydana gelmiştir. Bu nedenle sonraki çalışmalarda 7/100 (w/w) ve 9/100 (w/w) aglomeratları kullanılmıştır.

İlk perkolasyon liçi çalışmalarında Au çözünme verimlerinin hemen hemen aynı değerlere ulaşması ve 500 mL çözeltinin 10 mL/dak akış hızına bağlı olarak 50 dakika

sonra tükenmesi nedeniyle aynı çözeltinin tekrar kullanılarak Au çözünme veriminin artırılması amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda çözelti akış hızını kontrol edebileceği ve çözeltinin tekrar kullanılabileceği bir düzenek oluşturulmuştur. Bu düzenek için bir su pompası (damacana pompası) temin edilmiş ve çözelti akış hızının kontrol edilebilen hortum (serum hortumu) sistemi kurulmuştur. Deney düzeneği Şekil 6.10'da verilmiştir.

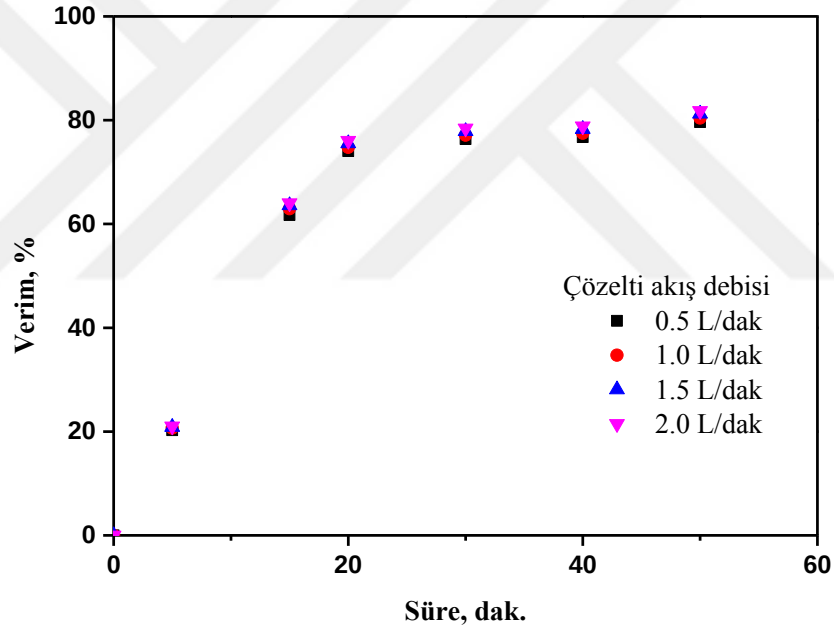


Şekil 6. 10. Perkolasyon liçi çalışmalarında kullanılan liçi düzeneği.

Bu deney düzeneğinde 7/100 (w/w) ve 9/100 (w/w) oranında elde edilen aglomeratlardan 250 g kullanılarak ortam sıcaklığında (25 °C) deneyler gerçekleştirilmiştir. Çözelti hazırlama işlemleri ve deney şartları için karıştırma liçi çalışmalarından elde edilen uygun Katı/Sıvı oranı, pH ve NaCN konsantrasyonu kullanılmıştır. Çalışmalarda çözelti akış hızının Au çözünmesine olan etkisi incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar Çizelge 6.7 ve 6.8'de ve Şekil 6.11 ve 6.12'de verilmiştir.

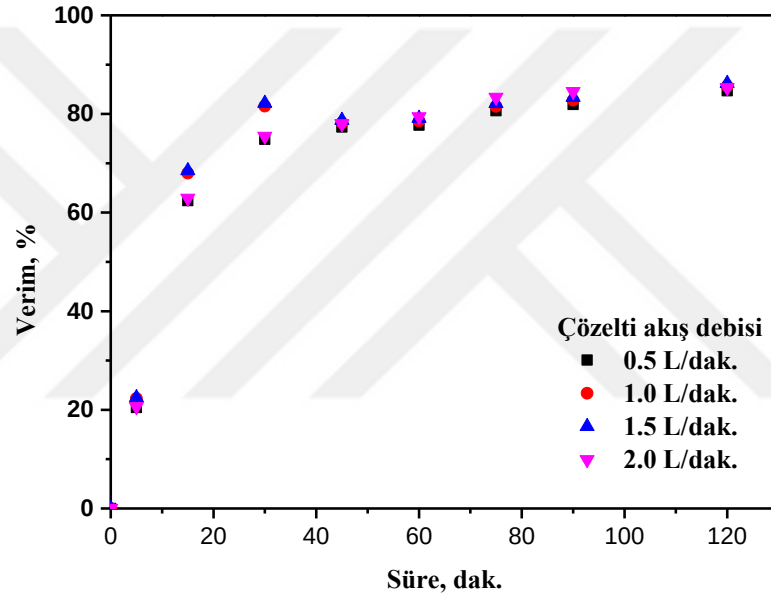
Çizelge 6. 7. Çeşitli çözelti debilerinde 7/100 (w/w) çimento/numune oranında yapılan deney sonuçları.

Süre, dak	Au çözünme verimi, %			
	0.5 L/dak.	1.0 L/dak	1.5 L/dak	2.0 L/dak
0	0	0	0	0
5	20.25	20.66	20.86	21.01
15	61.72	62.95	63.58	64.03
30	74.04	74.78	75.53	76.06
45	76.34	77.10	77.88	78.43
60	76.73	77.50	78.28	78.83
75	79.62	80.42	81.23	81.80
90	80.85	81.66	82.48	83.06
120	83.60	84.44	85.29	85.89

**Şekil 6. 11.** Çeşitli çözelti debilerinde 7/100 (w/w) çimento/numune oranında yapılan deney sonuçları.

Çizelge 6. 8. Çeşitli çözelti debilerinde 9/100 (w/w) çimento/numune oranında yapılan deney sonuçları.

Süre, dak	Au çözünme verimi, %			
	0.5 L/dak.	1.0 L/dak	1.5 L/dak	2.0 L/dak
0	0	0	0	0
5	20.47	22.32	22.47	20.64
15	62.40	68.01	68.49	62.90
30	74.85	81.59	82.16	75.47
45	77.33	78.18	78.73	78.01
60	77.73	78.58	79.13	79.41
75	80.66	81.54	82.11	83.36
90	81.90	82.80	83.38	84.53
120	84.69	85.62	86.22	85.34

**Şekil 6. 12.** Çeşitli çözelti debilerinde 9/100 (w/w) çimento/numune oranında yapılan deney sonuçları.

Yukarıda elde edilen veriler ışığında aşağıdaki sonuçlara ulaşmak mümkündür.

- i) 3/100 ve 5/100 (w/w) çimento/numune oranlarında elde edilen aglomeratlar deneyler sırasında kısmen bozulmuştur. Bu nedenle çalışmalar 7/100 ve 9/100 (w/w) ağırlık oranlarında elde edilen aglomeratlar üzerinde gerçekleştirilmiştir.
- ii) Perkolasyon liçinde çözelti akış hızının (debi) artması Au çözünme hızına bir etkisinin olmadığı ve 120 dakikalık bir liç işlemi sonunda çalışılan debilerde altın çözünme verimleri yaklaşık %85 olduğu bulunmuştur. Karıştırma hızının Au çözünmesine olan etkisi çalışmalarında yine benzer sonuçlara ulaşıldığı görülmektedir. Çözelti akışın, başka bir deyişle numune içerisindeki Au

partikülleri üzerinden geçen çözeltinin akış hızının Au çözünme hızına çok etkili olmadığı anlaşılmaktadır. Bu bağlamda çözünmüş Au'nın yüzeyinden uzaklaştırılması yeterli olmaktadır.

- iii) Çimento/numune oranının artması Au çözünme hızına etkisinin olmadığı görülmektedir. Benzer sonuçlar bağlayıcı olarak Na-bentonit kullanıldığı wüstit redüksiyonu çalışmalarında da gözlenmiştir. Kil oranının artması elde edilen peletlerin redüksiyon hızına hiçbir etkisi olmamıştır .

6.3. Vat Liçi Çalışmaları

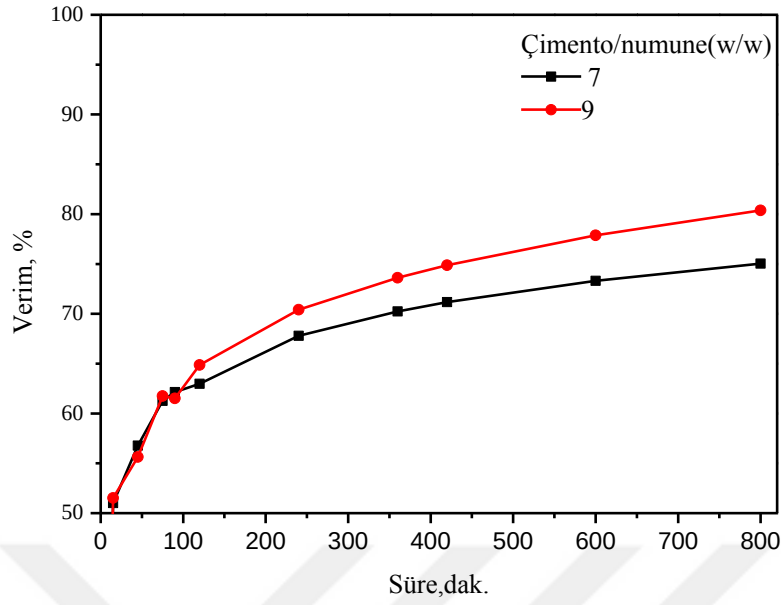
Vat liçi çalışmalarında paslanmaz çelikten üretilmiş demlik içi çay süzgeci (Vestel marka) kullanılmıştır. Deneyler 7/100 (w/w) ve 9/100 (w/w) çimento/numune oranlarında 1 L hacmindeki beher içerisinde gerçekleştirilmiştir (Şekil 6.13). Bu deney düzeneğinde 7/100 (w/w) ve 9/100 (w/w) oranında elde edilen aglomeratlardan 200 g kullanılarak ortam sıcaklığında (25 °C) deneyler gerçekleştirilmiştir. Çözelti hazırlama işlemleri ve deney şartları için karıştırma liçi çalışmalarından elde edilen uygun Katı/Sıvı oranı, pH ve NaCN konsantrasyonu kullanılmıştır. Çalışmalar, süzgeç içine yerleştirilen aglomeratlar ilgili şartlarda hazırlanmış çözelti içerisine daldırılarak gerçekleştirilmiştir. Sistemden analizler için çözelti alınmadan önce süzgeç dışarı çıkarılmış, çözelti karıştırılmış ve analizler için çözelti alınmıştır. Zamana göre Au çözünme verimleri incelenmiştir. Au çözünme veriminin %80'e ulaştığı zaman için çalışma durdurulmuştur. Elde edilen sonuçlar Çizelge 6.9'da ve Şekil 6.14'de verilmiştir.



Şekil 6. 13. Vat liçi deney düzeneği.

Çizelge 6. 9. Vat liçi deney sonuçları.

Süre. Dak	Au çözünme verimi, %	
	7/100 (w/w)	9/100 (w/w)
0	0	0
15	51.01	51.52
45	56.78	55.64
75	61.26	61.75
90	62.14	61.52
120	62.98	64.87
240	67.80	70.41
360	70.24	73.62
420	71.17	74.88
600	73.31	77.87
800	75.04	80.38



Şekil 6. 14. Vat liçi deney sonuçları

Vat liçi çalışmalarında zamana göre Au çözünme verimi 7/100 ve 9/100 (w/w) çimento oranları için elde edilen sonuçlara bakıldığında her iki çimento oranları için benzer değerler elde edilmiştir. Ancak 9/100 (w/w) çimento oranı için elde edilen çözünme verimi 800 dakikalık liçi işlemi sonunda 7/100 (w/w) çimento oranına göre yaklaşık 5 puan artış ile sonuçlanmıştır.

Çalışılan artık sahası için bir tesis kurulması durumunda karıştırma liçi, perkolasyon liçi ve Vat liçi sonuçlarının irdelenmesi kurulması planlanan tesisin her açıdan tetkiki için önemlidir. Burada dikkate alınması gereken birçok unsur bulunmaktadır. Bunlar; Au çözünme verimi, ne kadar sürede % 80 verimle Au çözünmesine ulaşılabilirdiği, çözünen gram Au başına tüketilen CN^- iyonu miktarı, tesiste harcanan toplam elektrik miktarı vs. gibi unsurlardır. Karıştırma liçi çalışmalarında liçi sonrası susuzlandırma problemleri ve kullanılan flokülant miktarı tesise fazladan bir yük getirecektir. Ayrıca üzerinde çalışılan artık numunesinin tane boyutunun küçük olması liçing işlemleri sonrası elde edilen atık malzemenin rüzgar ve yağış ile çevreye dağılmasına sebebiyet verecektir. Bu ve buna benzer problemlerin oluşabileceği tehlikesi ile aglomerasyon işlemi ile liçi çalışmalarına yönelmeye neden olmuştur. Bu bağlamda gerçekleştirilen perkolasyon ve Vat liçi sonuçları önem arz etmektedir.

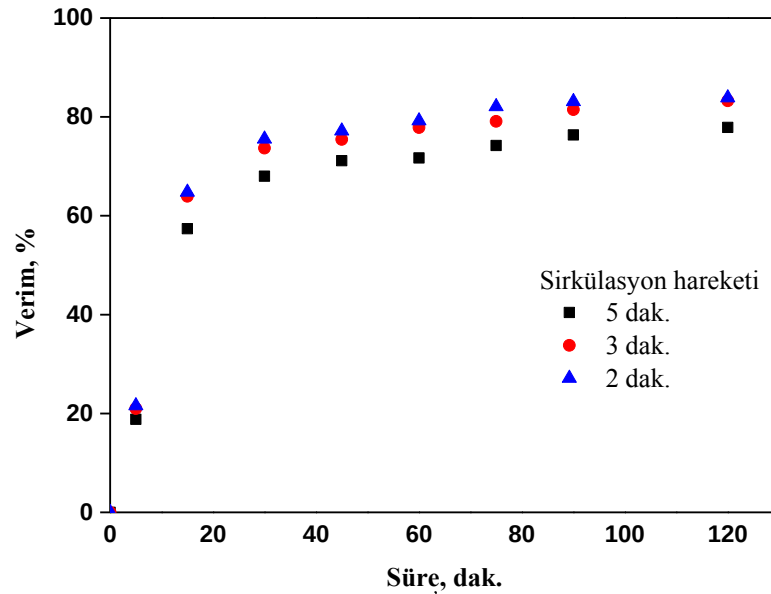
Perkolasyon liçi için, enerji tüketiminin artması gibi tesise gelecek ek maliyetler Vat liçi çalışmalarından elde edilen sonuçların önemini arttırmıştır. Çünkü Vat liçinde

perkolasyonu sağlayacak ekstra bir pompaya ihtiyaç duyulmayacaktır. Bir diğer önemli unsur liç işleminin süresi olup işlemin uzun sürmesi kapasitenin düşmesine ve işçilik gibi süreye bağlı maliyetlerin artması ile sonuçlanacaktır.

Au çözünme verimini arttırmak ve çözünme süresini azaltabilmek amacı ile Vat liçi çalışmalarında belirli süreler ile içi pelet dolu hazne iki (2) defa yukarı aşağı hareket ettirilerek deneyler yapılmasına karar verilmiştir. Bu çalışma perkolasyon-Vat liçi şeklinde değerlendirmek mümkündür. Bu amaçla; 2, 3 ve 5 dakikada aralar ile hazne yukarı aşağı 2 defa hareket ettirilerek çeşitli süreler ile deneyler gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar Çizelge 6.10'da ve Şekil 6.15'de verilmiştir.

Çizelge 6. 10. Çeşitli süreler için perkolasyon-Vat liçi sonuçları.

Süre, dak	Au çözünme verimi, %		
	5 dk	3 dk	2 dk
0	0	0	0
5	18.83	20.98	21.57
15	57.38	63.93	64.79
30	68.01	73.69	75.53
45	71.14	75.43	77.16
60	71.68	77.84	79.21
75	74.21	79.11	82.07
90	76.36	81.48	83.11
120	77.88	83.26	83.86



Şekil 6. 15. Çeşitli süreler için perkolasyon-Vat liçi sonuçları

Çizelge 6.10 ve Şekil 6.15'in incelenmesinden anlaşılabacağı üzere Au çözünme verimleri klasik Vat liğine göre hareketin sağlanması durumunda çok daha iyi sonuçlara ulaşıldığı görülmektedir. 2 ve 3 dakika süreler ile 2 defa yukarı aşağı hareket ile elde edilen Au çözünme verimlerinin birbirine çok yakın sonuçlar vermiştir.

Yukarıdaki bölümlerde verildiği üzere yapılan mikroskobik analizlerde çalışılan numune içerisinde manyetit, pirit ve bakır oksitlerin bulunduğu görülmüştü. Bu nedenle her bir deney sonucu elde edilen nihai çözeltinin Fe, Cu ve Zn analizleri yapılmıştır. Çözeltiler içerisinde Fe ve Zn izine rastlanmamış ancak her bir nihai çözelti için yaklaşık 81.46 ppm Cu konsantrasyonuna ulaşılmıştır. Siyanürlü ortamda numune içerisinde var olan bakırın çözünmesi gayet normal bir durum olup siyanür tüketimine neden olmaktadır.

Deneyler için hazırlanan çözeltilerdeki serbest CN^- miktarı ve deneyler sonucu elde edilen nihai çözeltilerin serbest CN^- miktarları titrasyon yöntemi kullanılarak ölçülmüştür. Başlangıçta 260 ppm serbest CN^- iyonu konsantrasyonu hesaplanmıştır. Bu bölümde verilen deneyler sonucu elde edilen nihai çözeltilerin hepsinde serbest CN^- iyonu konsantrasyonu yaklaşık 120 ppm olarak hesaplanmıştır. Çalışılan numune içerisinde bulunan altının yaklaşık %80'i çözeltiye geçmektedir. Bu değer çözünen her gram Au için 31 (CN^-/Au w/w) olup işlemin ekonomikliği için önem arz etmektedir. Tüketimi NaCN olarak hesaplandığında bu oran 58.4 NaCN/Au (w/w) olarak hesaplanır. Eşitlik (4.5) ve (4.6)'da verilen reaksiyonlar için ideal şartlarda bu oran (ağırlıkça NaCN/Au) 0.49'dur. Bu çalışma için bulunan 58.4 oranı oldukça yüksek kalmaktadır. Başka bir deyişle ideal şartların yaklaşık 119 katı NaCN tüketimi meydana gelmektedir. Numune içerisinde bulunan bakırın siyanürlü ortamda çözeltiye geçmesi serbest CN^- iyonu konsantrasyonunu düşürdüğü ve CN^- iyonu tüketimine neden olduğu düşünülmektedir. Çözeltiye geçen bakır iyonu (+2) veya (+) şeklinde olabilmekle beraber çözünmeyen CuCN ve $\text{Cu}_2[\text{Fe}(\text{CN})_6]$ gibi bakır-siyanür kompleksleri de meydana gelebilmektedir. Sulu ortamda çözünebilen $[\text{Cu}(\text{CN})_4]^{-2}$, $[\text{Cu}(\text{CN})_6]^{-4}$, $[\text{Cu}(\text{CN})_3]^{-2}$, $[\text{Cu}(\text{CN})_4]^{-3}$ ve $[\text{Cu}(\text{CN})_2]^-$ şeklinde bakır-siyanür kompleksleri meydana gelebilmektedir. Ayrıca siyanürlü ortamda demir de $\text{Fe}_4[\text{Fe}(\text{CN})_4]_3$ gibi çözünmeyen siyanür kompleksleri oluşturabilmektedir ve ark., 1999).

6.4. Aktif Karbona Adsorplama Çalışmaları

Çalışmalarda Selion® firmasından temin edilen hindistan cevizinden üretilmiş granül aktif karbon kullanılmıştır (Şekil 6.16). Çalışmalar karıştırma liçi ve perkolasyon-Vat liçi olarak iki farklı liç yönteminde CIP (karbon in pulp) yöntemi uygulanarak gerçekleştirilmiştir.



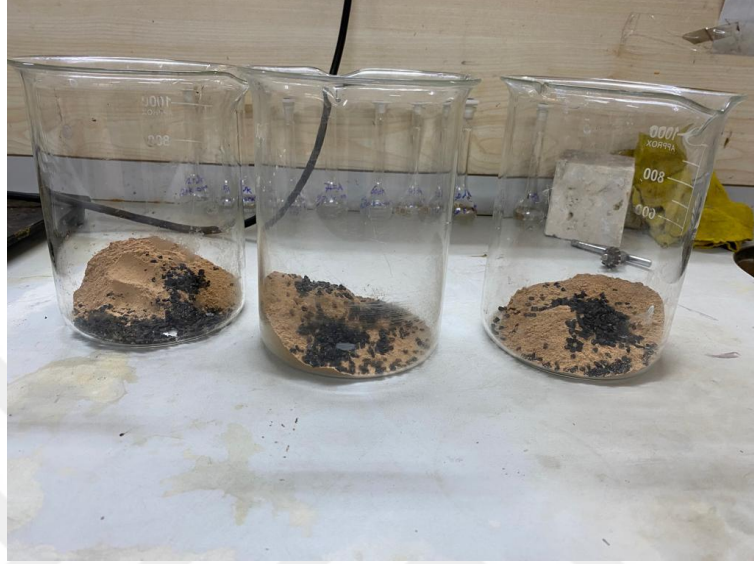
Şekil 6. 16. Adsorpsiyon çalışmalarında kullanılan granül aktif karbon.

6.4.1. Karıştırma liçi CIP çalışmaları

Bölüm 6.1’de verilen karıştırma hızının Au çözünmesine etkisi çalışmalarındaki şartlarda 400 rpm karıştırma hızı kullanılarak deneyler yapılmıştır. Deneyler için dünyada geçerli olarak kullanılan çözelti hacminin %3’ünü teşkil edecek şekilde granül aktif karbon kullanılmıştır. Firma sahibinin verdiği bilgilere göre kullanılan aktif karbon yoğunluğu ortalama 0.5 g/cm^3 ’tür. Aktif karbon ve altın numunesi 1 L hacminde cam behere tartılarak konulmuş ve yukarıda belirtilen şartlarda deneyler gerçekleştirilmiştir (Şekil 6.17). Deneyler 15, 45, 90 ve 120 dakikalar için ayrı ayrı kesintisiz olarak gerçekleştirilmiştir. Aktif karbon eklenmeden aynı şartlarda başka bir deney daha gerçekleştirilmiş ve işlemin başarısı mukayese edilmeye çalışılmıştır. Deneyler sonunda Vat liçinde kullanılan paslanmaz çelik süzgeç kullanılarak sonuç çözelti süzölmüş üstte

yüklü aktif karbon alınmıştır. Geriye kalan süzüntüden Au ve Cu analizleri yapabilmek için altta kalan pulp hızla N100 flokülant kullanılarak çökmesi sağlanmıştır.

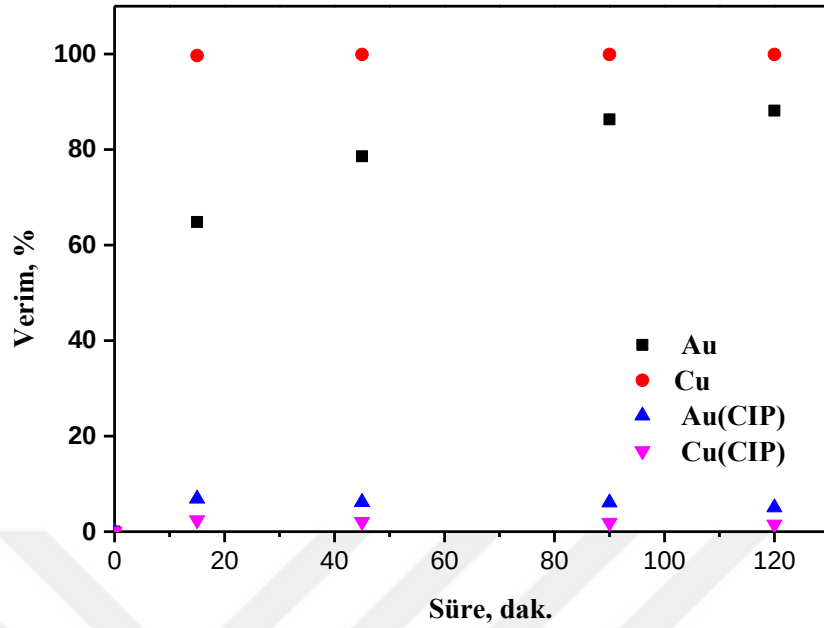
Orijinal numunenin Cu analizi sonuçlarına göre çalışılan numune 81.46 ppm Cu içermektedir. Elde edilen sonuçlar Çizelge 6.11 ve Şekil 6.18’de verilmiştir.



Şekil 6. 17. Karıştırma liçinde CIP deneyleri için hazırlanan numuneler.

Çizelge 6. 11. Karıştırma liçi CIP sonuçları.

Süre, dak	Au ve Cu çözünme verimleri, %		Aktif karbona adsorpsiyon sonrası (CIP) elde edilen Au ve Cu çözünme verimleri, %	
	Au	Cu	Au	Cu
0	0	0	0	0
15	64.81	99.66	6.90	2.40
45	78.56	99.88	6.18	2.06
90	86.30	99.89	6.07	1.88
120	88.13	99.90	5.04	1.51



Şekil 6. 18. Karıştırma liçi CIP sonuçları.

Çizelge 6.11 ve Şekil 6.18'in incelenmesinden görüleceği üzere; çözünen altının %94.28'i ve çözülmüş bakırın %98.49'u aktif karbon bünyesine alınmıştır. Siyanürlü ortamda numune içerisinde bulunan bakırın tamamı ilk dakikalarda çözeltiye geçmektedir. Bakır-siyanür komplekslerinin oldukça stabil olması siyanürün bakıra olan ilgisinin yüksek olduğunu göstermektedir. Zaten birçok tesiste aktif karbonun bakıra olan afinitesi altın ile gelen bakırın berterafı için ek işlemlere gerek duyulmasına neden olabilmektedir. Çözeltelerde her ihtimale karşı Fe ve Zn analizleri yapılmış ancak bu elementlere rastlanmamıştır.

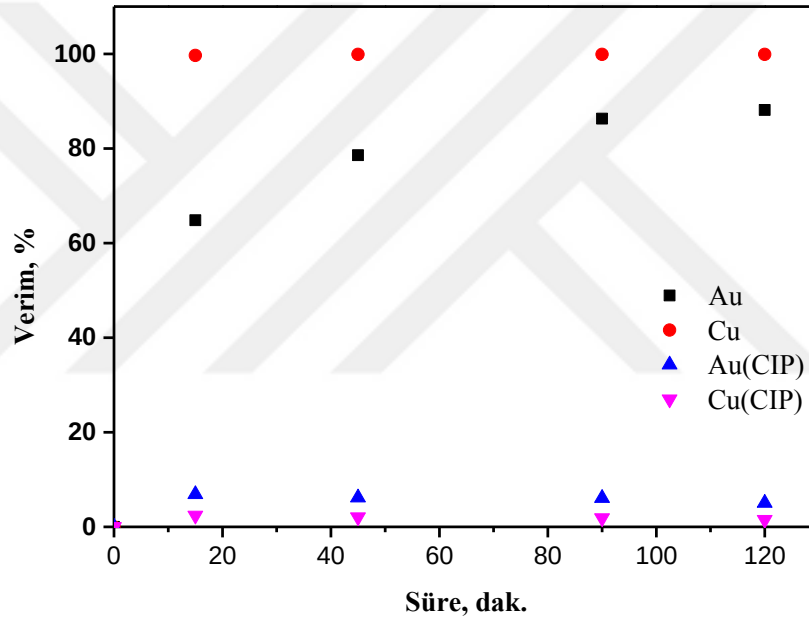
6.4.2. Perlolasyon-Vat liçi CIP çalışmaları

Çizelge 6.10'da verilen deneylerin bir benzeri CIP yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Deney şartları aynı tutulmuş ve 3 dakikada bir yukarı aşağı 2 defa hareket ettirme yöntemi kullanılmıştır. Karbon miktarı Bölüm 6.7.1'de verildiği gibi kullanılmış ancak karbon çözelti içerisine yerleştirilmiş hazne (paslanmaz çelik süzgeç) içerisine konulmamıştır. Deneyler yine ayrı ayrı gerçekleştirilmiş ve çalışmalarda 9/100 (w/w) peletler kullanılmıştır. Liç süresi yine Bölüm 6.7.1'de olduğu gibi 15, 45, 90 ve

120 dakika süreler ile ayrı ayrı kesintisiz gerçekleştirilmiştir. Nihani çözeltilerden Au ve Cu analizleri yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar Çizelge 6.12 ve Şekil 6.19’da verilmiştir.

Çizelge 6. 12. Perkolasyon-vat liçi CIP sonuçları.

Süre, dak	Au ve Cu çözünme verimleri, %		Aktif karbona adsorpsiyon sonrası elde edilen Au ve Cu çözünme verimleri, %	
	Au	Cu	Au	Cu
0	0	0	0	0
15	62.65	99.81	7.28	3.06
45	74.68	99.85	7.11	2.94
90	82.29	99.29	6.85	2.53
120	84.93	99.97	6.22	2.11



Şekil 6. 19. Perkolasyon-vat liçi CIP sonuçları.

Çizelge 6.12 ve Şekil 6.19’da görüleceği üzere karıştırma liçi CIP deneylerinden elde edilen sonuçlara benzer değerler elde edilmiştir. Numune içerisinde bulunan bakır ilk dakikalarda neredeyse tamamı çözünmekte ve aktif karbona adsorplanmaktadır. 120 dakikalık CIP işlemi sonucu çözünen altının %92.67’si çözünen bakırın ise %97.89’u aktif karbona adsorplanmıştır.

Siyanürlü altın çözeltilerindeki herhangi bir anyonun yüksek konsantrasyonda olması $[\text{Au}(\text{CN})]^{-2}$ kompleksini adsorplanma kapasitesini etkilemediğini ve bu kompleksin aktif karbonun ile etkileşimlerinin elektrostatik olmadığını Kuzminykh ve

Tjuriin öne sürmüşlerdir (Davidson ve Duncanson, 1977). Hindistan cevizi kaynaklı aktif karbonun altın adsorpsiyonunun tekrarlanabilirliğini saf suda sabit pH'da test çalışmaları yapılmıştır. Saf suda sabit pH'da yapılan testler hindistan cevizi kabuğu aktif karbonuna altın adsorpsiyonunun tekrarlanabilirliğini test etmiştir. $[\text{Au}(\text{CN})]^{-2}$ kompleksinin çözelti içerisinde Na^+ ve Ca^{+2} gibi iyonlar bulunmaması durumunda aktif karbona adsorplanmadığını tespit etmiştir. Ortamda bulunabilecek toprak alkali elementlerinin $[\text{Au}(\text{CN})]^{-2}$ kompleksinin adsorpsiyonunu kuvvetlendirdiği bildirmiştir. Bu liçing çalışmalarında kireç kullanılmış olması aktif karbona altının adsorpsiyonun artması ile sonuçlanmış olduğu anlaşılmaktadır.

6.5. Çalışmalardan Elde Edilen Sonuçların YSA İle Tahmininin Modellenmesi

Çalışmalardan elde edilen sonuçların YSA sistemi ile işlenerek sonuçların tahmini çalışmaları yapılmıştır. Bu amaçla karıştırma liçi deney sonuçları, zamana bağlı karıştırma hızının, katı/sıvı oranının, pH'ın, NaCN konsantrasyonun ve sıcaklığın Au çözünme verimine olan etkisi verileri kullanılmıştır. YSA sistemi için 6 giriş, 1 çıkış yapısı kullanılmıştır. Giriş yapısını liç süresi, karıştırma hızı, pH, NaCN konsantrasyonu, katı/sıvı oranı ve sıcaklık verileri oluşturmaktadır. Çıkış yapısını ise Au çözünme verimi verileri oluşturmaktadır. Bu amaçla YSA yapısı için ilgili bölümdeki çizelgelerde verilen toplam 168 verinin 96 adedi (15, 30, 45 ve 60 dak.) YSA yapısını eğitmek için, 72 adedi (75, 90 ve 120 dak.) YSA yapısını test etmek için kullanılmıştır. Böylelikle 15, 30, 45 ve 60 dakika verileri ile birlikte Au çözünme verim eğitme sonuçları Çizelge 6.13'de YSA tahmin sonuçları ile birlikte verilmiştir. 75, 90 ve 120 dakika verileri ile birlikte Au çözünme verim test sonuçları Çizelge 6.14'de YSA tahmin sonuçları ile birlikte verilmiştir. Böylece tahmin edilen sonuçların gerçek deneysel sonuçlara yakınlığı/uyumluluğu karşılaştırılarak sunulmuştur. Bu çalışma ile bu tür liç sistemlerin tahmini sonuçlarının uygunluğu ve uygulanabilirliği gösterilmiştir.

Çizelge 6. 13. 15, 30, 45 ve 60 dakikalık liç süreleri için eğitmek amaçlı verilen 96 adet veri.

	Süre	Krışt Hz	PH	NaCN	Katı/sıvı	sıcaklık	Verim Deneysel	Verim YSA
1	15	0	10.3	0.5	40	25	52.23	52.23
2	30	0	10.3	0.5	40	25	57.41	57.41
3	45	0	10.3	0.5	40	25	58.99	58.99
4	60	0	10.3	0.5	40	25	59.49	59.49
5	15	100	10.3	0.5	40	25	61.72	61.72
6	30	100	10.3	0.5	40	25	74.04	74.04
7	45	100	10.3	0.5	40	25	76.34	76.34
8	60	100	10.3	0.5	40	25	76.73	76.73
9	15	200	10.3	0.5	40	25	62.3	62.3
10	30	200	10.3	0.5	40	25	71.27	71.27
.	.	.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.	.	.
87	45	400	10.3	0.5	40	50	84.16	84.16
88	60	400	10.3	0.5	40	50	85.51	85.51
89	15	400	10.3	0.5	40	60	73.3	73.3
90	30	400	10.3	0.5	40	60	84.56	84.56
91	45	400	10.3	0.5	40	60	85.09	85.09
92	60	400	10.3	0.5	40	60	87.45	87.45
93	15	400	10.3	0.5	40	80	83.15	83.15
94	30	400	10.3	0.5	40	80	92.74	92.74
95	45	400	10.3	0.5	40	80	93.06	93.06
96	60	400	10.3	0.5	40	80	93.43	93.43

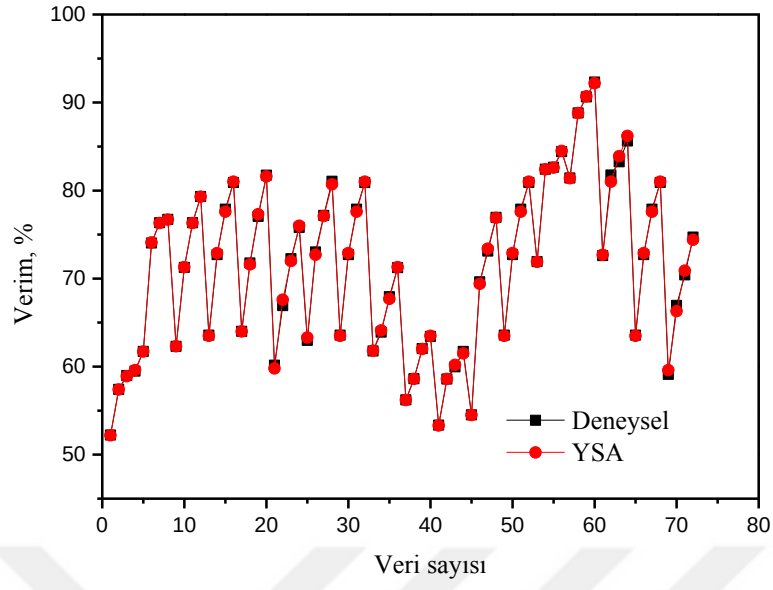
Çizelge 6.13’de görüldüğü gibi gerçek deneysel veriler ile eğitilen Au çözünme verimleri YSA ile hesaplanıp tahmin edilmiştir ve aynı çizelgede YSA sonuçları verilmiştir. Bu sonuçlara göre 96 verinin toplam hatası 17.26’dır. Yani 96 adet gerçek Au çözünme verimleri YSA ile tahmin edilen Au çözünme verimleri arasındaki toplam mutlak farktır. Ortalama hata ise 0.18’dir.

Çizelge 6. 14. 75, 90 ve 120 dakikalık liç süreleri için test ve tahmin amaçlı verilen 72 adet veri.

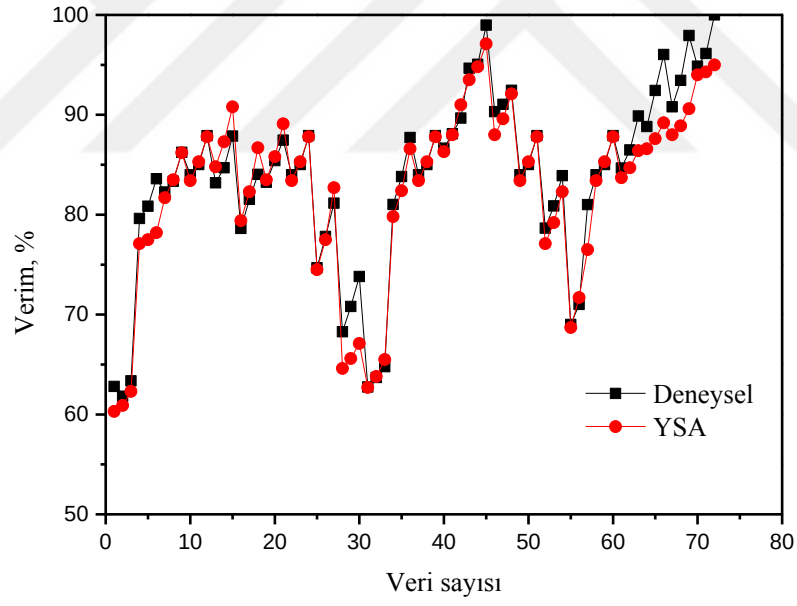
	Süre	Krışt Hz	PH	NaCN	Katı/sıvı	sıcaklık	Verim Deneyssel	Verim YSA
1	75	0	10.3	0.5	40	25	62.81	62.81
2	90	0	10.3	0.5	40	25	61.82	61.82
3	120	0	10.3	0.5	40	25	63.36	63.36
4	75	100	10.3	0.5	40	25	79.62	79.62
5	90	100	10.3	0.5	40	25	80.85	80.85
6	120	100	10.3	0.5	40	25	83.6	83.6
7	75	200	10.3	0.5	40	25	82.27	82.27
8	90	200	10.3	0.5	40	25	83.35	83.35
9	120	200	10.3	0.5	40	25	86.24	86.24
.	.	.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.	.	.
64	75	400	10.3	0.5	40	50	88.82	88.82
65	90	400	10.3	0.5	40	50	92.43	92.43
66	120	400	10.3	0.5	40	50	96.04	96.04
67	75	400	10.3	0.5	40	60	90.8	90.8
68	90	400	10.3	0.5	40	60	93.45	93.45
69	120	400	10.3	0.5	40	60	97.94	97.94
70	75	400	10.3	0.5	40	80	94.87	94.87
71	90	400	10.3	0.5	40	80	96.13	96.13
72	120	400	10.3	0.5	40	80	100	100

Çizelge 6.14’de görüldüğü gibi gerçek deneysel veriler ile test Au çözünme verimleri YSA ile hesaplanıp tahmin edilmiştir ve aynı çizelgede YSA sonuçları verilmiştir. Bu sonuçlara göre 72 verinin toplam hatası 119.36’dır. Yani 72 adet gerçek Au çözünme verimleri YSA ile tahmin edilen Au çözünme verimleri arasındaki toplam mutlak farktır. Ortalama hata ise 1.66’dır.

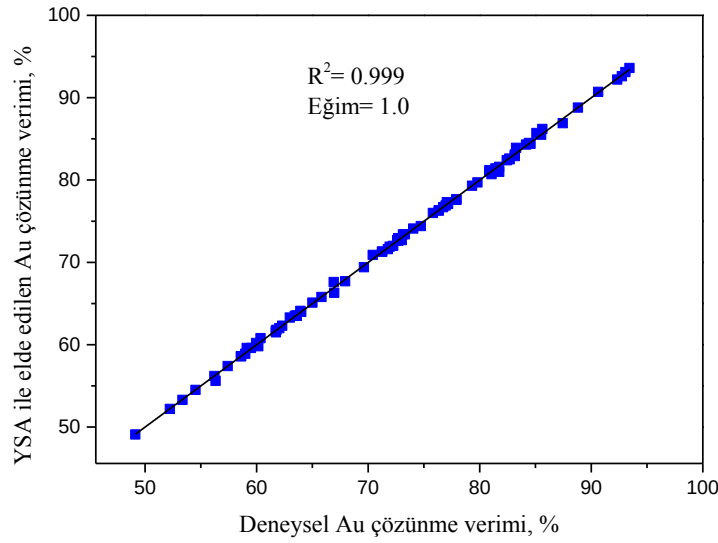
Sonuçlar Şekil 6.20’de (eğitim) ve Şekil 6.21’de (test) verilmiştir. Korelasyon sonuçları ise Şekil 6.22’de (eğitim) ve Şekil 6.23’de (test) verilmiştir. Bu korelasyon sonuçlarına göre; eğitim için elde edilen deneysel_{eğitim}-YSA_{eğitim} korelasyon katsayısı (R^2) 0.9994 olan bir doğru elde edilmiştir. Aynı şekilde test için elde edilen deneysel_{test}-YSA_{test} korelasyon katsayısı (R^2) 0.9410 olan bir doğru elde edilmiştir.



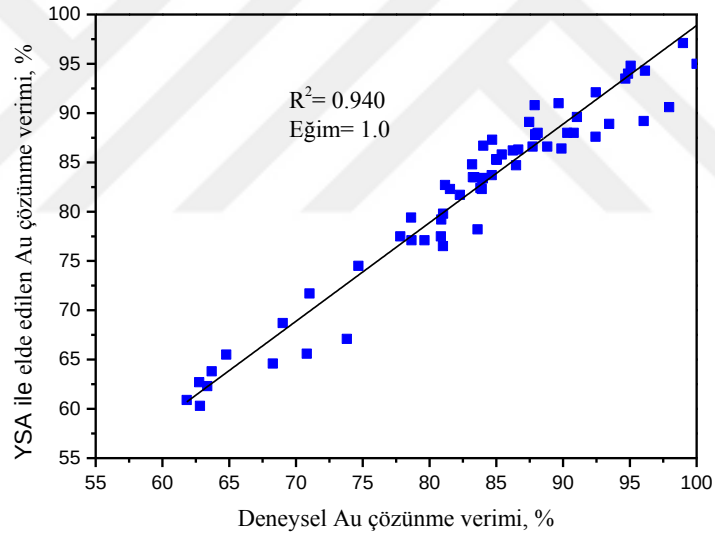
Şekil 6. 20. 96 adet eğitim deneyisel verinin YSA ile elde edilen 96 verinin karşılaştırılması.



Şekil 6. 21. 72 adet test deneyisel verinin YSA ile tahmin edilen 72 verinin karşılaştırılması.



Şekil 6. 22. 96 adet eğitim deneysel verinin YSA ile elde edilen 96 veri ile korelasyonu.



Şekil 6. 23. 72 adet test deneysel verinin YSA ile elde edilen 72 veri ile korelasyonu

YSA yapısının elde edilen en iyi performansı birçok denemeden sonra belirlenmiştir. Belirlenen nihai yapı 6 giriş 3 (7, 2, 3 ağırlıklı) ara katman ve tek çıkıştan oluşmaktadır. Ara ve çıkış katmanları için aktivasyon fonksiyonu olarak “hiperbolik tanjant” fonksiyonu kullanılmıştır.

Eğitim 1450 iterasyon sonucu 6.248×10^{-8} hedef performansı ile 17 saniye sürmüştür. Bununla birlikte başlangıç “mu” değeri 0.7744, “mu” için azalma faktörü 0.303472, “mu” için artma faktörü 2.19357 olarak bulunmuştur. YSA çalışmaları Matlab r2022b programı ile gerçekleştirilmiştir.

7. FİZİBİLİTE ÇALIŞMALARI

Çalışmaya konu olan Port Sudan bölgesinde cıva amalgamasyonu ile altın kazanım sonrası elde edilen artık malzemenin üretimi hala devam etmektedir. 2019 yılı verilerine göre yaklaşık 900 000 ton artık birikmiş durumda iken 2023 yıl sonu verilerine göre 1.4 milyon tonun üzerinde artık yığınının biriktiği tahmin edilmektedir. Bu yığın içerisinde bulunan altının siyanürleme yöntemiyle kazanılması durumunun ekonomik olarak irdelenmesi ihtiyacı doğmuştur.

Altın liç tesisinin boyutu ve kapasitesi, maliyetini önemli ölçüde etkiler. Daha büyük tesisler altyapı, ekipman ve iş gücü açısından daha önemli yatırımlar gerektirir. Ayrıca, daha yüksek kapasiteli tesisler, daha kapsamlı işleme tesisleri ve daha büyük bir iş gücü gerektirmekte, bu da işletme maliyetlerinin artmasına neden olmaktadır. İşlenen altın içeren cevherin özellikleri de maliyetleri etkilemektedir. Cevher kalitesi, parçacık boyutu ve mineraloji, ek adımlar veya özel ekipman gerektirerek liç işleminin verimliliğini etkileyebilir. Bazı durumlarda, düşük tenörlü altın içerikli cevherin işlenmesi, maliyetlerin potansiyel getirilerden daha fazla olması nedeniyle ekonomik olarak uygun olmayabilir.

Altın liç tesisinin konumu maliyetlerin belirlenmesinde hayati bir rol oynamaktadır. Sınırlı altyapıya sahip uzak alanlar veya bölgeler, ulaşım, enerji tedariki ve su yönetimi konularında önemli yatırımlar gerektirebilir. Nitelikli işgücüne erişim ve yerel malzemelerin mevcudiyeti de maliyetleri etkileyebilir. Çünkü cihazlar ve sarf malzemelerin ithal edilmesi veya taşınması önemli masraflara neden olabilir.

Mevzuat gerekliliklerine uymak ve çevresel sürdürülebilirliği sağlamak ek maliyetler içerir. Altın liç tesisleri, tehlikeli kimyasalların taşınması ve bertarafı, su kullanımı ve atık yönetimi ile ilgili katı düzenlemelere uymak zorundadır. Çevre kirliliğini önlemek için uygun güvenlik önlemlerinin ve izleme sistemlerinin uygulanması, ekipmana, eğitime ve sürekli uyumluluk çabalarına yatırım yapılmasını gerektirir.

Altın liç tesisleri önemli miktarda enerji ve su tüketmektedir. Enerji maliyetleri bölgenin elektrik fiyatlarına ve santralin enerji verimliliğine bağlı olarak değişiklik gösterebilmektedir. Benzer şekilde, su mevcudiyeti ve arıtma maliyetleri de genel giderleri önemli ölçüde etkileyebilir. Yenilenebilir enerji kaynakları ve su geri dönüşüm sistemleri gibi yenilikçi teknolojilerin uygulanması, uzun vadede işletme maliyetlerinin azaltılmasına yardımcı olabilir.

Altın liç tesisinin işletilmesi ve bakımı vasıflı işgücü gerektirir. İşçilik maliyetleri yerel ücretler, işgücü düzenlemeleri ve tesis operasyonlarının karmaşıklığı gibi faktörlere bağlıdır. Ayrıca, optimum performansı sağlamak ve arıza süresini önlemek için ekipmanın düzenli bakım ve onarımı gereklidir. İşçilik ve bakım giderlerinin bütçelenmesi, tesisin verimli ve tutarlı bir şekilde çalışmasını sağlamak için çok önemlidir.

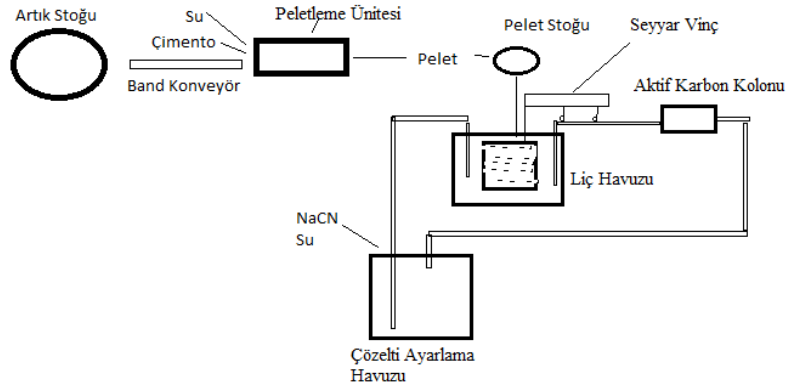
Özet olarak; bir altın liç tesisinin kurulması ve işletilmesi, dikkatli bir şekilde değerlendirilmesi gereken bir dizi maliyeti gerektirir. Tesis büyüklüğü, cevher özellikleri, konum, uygunluk gereklilikleri, enerji ve su tüketimi ile işçilik ve bakım giderleri gibi faktörlerin tümü genel maliyete katkıda bulunur. Bu faktörleri anlamak ve maliyetleri doğru bir şekilde tahmin etmek, altın madenciliği sektöründe bilinçli yatırım kararları vermek için çok önemlidir.

Konvansiyonel yöntemler ile altın üretim sürecinde cevherin kazılması, kazılmış cevherin nakliyesi, varsa posanın atılması, gerekli boyut küçültmenin yapılması, aglomerasyon işlemleri, siyanürleme, aktif karbona adsorpsiyon, aktif karbondan sıyırma ve rafinasyon işlemlerini içeren bir dizi procesten geçilerek gerçekleştirilmektedir.

Çalışılan bölgede, cevher kazılmakta ve amalgamasyon işlemleri sırasında öğütülmektedir. Amalgam alınarak geriye kalan artık, artık sahasına atılmaktadır. Amalgamasyon işleminin bir önemli dezavantajı iri taneli altının amalgam oluşturmaması ve cıvanın küçük tanelere ulaşamamasıdır. Sudan hükümeti bu işlemi yapan küçük ölçekli madencilerin dağınık bir şekilde çalışmaması için 1×1 km (1 km^2) bir alan tahsis ederek her bir alanda kendi sınırları içinde 15 işletmenin çalışmasına izin vermektedir. Bu oluşturulan kampüs alanı içersinde amalgamasyon, amalgamdan altın üretimi (distilasyon) ve üretilen altını satmak zorunda olduğu bir altın tüccarı (kuyumcu) bulunmaktadır. Bu küçük işletmeler 24 saat esasına göre çalışmaktadırlar. Meydana gelen artık yığını kampüs alanı dışına taşınarak biriktirilmektedir.

Burada biriken artık içerisindeki altının ekonomiye kazandırılması durumunda ne gibi faydalar elde edilebileceği konusu önemlidir. Yukarıda ifade edilen siyanürleme yöntemiyle altın üretim sürecinde; cevherin çıkarılması, taşınması ve öğütülmesini içeren aşamaların elimine edilmiş durumda olması önemli bir ekonomik avantaj olarak karşımıza çıkmaktadır. Geriye; artığın peletlenmesi, siyanürlenmesi, aktif karbona adsorpsiyonu vs. gibi işlemler kalmaktadır.

Bu kapsamda Vat liçi çalışmalarından elde edilen sonuçların ekonomik irdeleme için kullanılmasına karar verilmiştir. Kurulması planlanan tesisin şeması Şekil 6.23’de verilmiştir.



Şekil 6.23. Kurulması planlanan tesisin akım şeması

Şekil 6.23’den görüleceği üzere konveyör bant, peletleme ünitesi, jeneratör, süzgeçli paslanmaz çelik sepet, seyyar vinç, çözelti pompaları, aktif karbon kolonu, liç işlemleri ve çözelti ayarlamak için havuzlar içermektedir. Ekonomik irdelemeyi iki aşamada yapmak mümkündür. Bunlar; ilk yatırım giderleri ve işletme giderleri olarak ifade edilebilir.

7.1. İlk Yatırım Giderleri

İlk yatırım giderleri olarak band konveyör, peletleme ünitesi, jeneratör, süzgeçli paslanmaz çelik sepet, seyyar vinç, çözelti pompaları aktif karbon kolonu ve havuzların inşaatı verilebilir. Yukarıda verilen ilk yatırım giderlerine ait fiyat verileri tesis kapasitesine göre belirlenip fiyatlandırılmaya çalışılmıştır.

Tesis kapasitesi Vat liçi sonuçlarından elde edilen 120 dakikalık sirkülasyon verilerinden hareketle belirlenmiştir. Her bir sirkülasyon için 1 Ons Au çözeltiye alınacak şekilde kapasite düşünülmüş ve kurulması tasarlanan küçük işletmenin ilk yatırım masrafları buna göre şekillendirilmiştir.

Laboratuvar ortamında elde edilmiş 9/100 (w/w) çimento/numune oranındaki peletlerin yığın yoğunluğu ölçülerek ilk hesaplamalar buna göre şekillendirilmiştir. İlgili numunenin yığın yoğunluğu 1.20 g/cm^3 olarak hesaplanmıştır. Buna göre 1 Ons (31.10 g) Au çözeltiye alınması için gerekli olan artık miktarı üzerinden hareketle tesis planlanmıştır.

Artık yığını yaklaşık 16 g/ton Au içermektedir. Buna göre %80 Au çözünme verimine ulaşıldığı 120 dakikalık liç periyodu için;

Gereken artık miktarı:

$$31.10 \text{ g}/16 \text{ g/ton}/0.8 = 2.43 \text{ ton artık (1 Ons 31.10 g)}$$

2.43 ton artığın peletleme sonrası hacmi:

$$2.43 \text{ t}/1.20 \text{ t/m}^3 = 2.03 \text{ m}^3$$

Gerekli olan paslanmaz çelik süzgeç hacmi (%10 güvenlik katsayısı):

$$2.03 \text{ m}^3 \times 1.10 = 2.24 \text{ m}^3$$

Paslanmaz çelik süzgeç sepet silindirik şekilde olup yüksekliği elde edilen peletin dayanımı ile ilgilidir. Laboratuvar ortamında yapılan çalışmada peletin parçalanmadan 1.8 m yüksekliğe kadar yüklenebileceği görülmüştür. Bu nedenle silindirik paslanmaz çelik süzgeç sepet yüksekliği her ihtimale karşı 1.3 metre olacak şekilde düşünülmüştür. Buna göre yüksekliğin 1.3 m olduğu silindirik yapı için silindir yarıçapı 0.55 m olarak hesaplanmıştır. Ayrıca bu iş için kullanılacak paslanmaz çelik sac 316-MAT olup 3 mm kalınlıktadır. Sepeti güçlendirmek ve sepeti yüklü halde taşıyabilmek için paslanmaz çelik destek elemanlarına ihtiyaç duyulacağından 40x5 mm ölçülerinde lamalar kullanılacaktır. Toplam hacmi 2.24 m³ olacak şekilde üzerinde 1 cm aralıklarla 3 mm çapında delikler olan, yüksekliği 1.3 m ve çapı 1.10 m olan ve paslanmaz çelikten (316-MAT) sac, lama (silindirik sepetin tahkimi) ve taşıyıcı zincir için Karaca Paslanmaz Çelik firmasından (İstanbul) üretim fiyatı istenmiştir. İlgili firma tarafından yukarıda belirtilen şartlara uygun 2 adet paslanmaz çelik sepet için 4000 USD fiyat verilmiştir.

Seyyar vinç için çalışmalar yapılmıştır. Çalışılması düşünülen artığın ağırlığı 2.43 ton olarak hesaplanmıştır. Paslanmaz çelik sepet toplam ağırlığı ise 325 kg olarak firma tarafından verilmiştir. Vinçin taşıyacağı toplam ağırlık 2.755 ton olarak hesaplanmıştır. Yapılan piyasa araştırmasında 5 ton yük taşıma kapasiteli vinç için (Pratik Vinç firması, Bursa) 7100 USD birim fiyatına ulaşılmıştır. 2 adet vinç için fiyatı için 14000 USD fiyat teklifi yapılmıştır.

Tesisin toplam elektrik ihtiyacının 15 KVA'lık bir dizel jeneratör ile sağlanabileceği Konya Teknik Üniversitesi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği bölümü öğretim üyeleri ile yapılan istişare ile belirlenmiştir. Yapılan piyasa araştırmalarında 15 KVA jeneratör ve panosu için 5100 USD fiyat verilmiştir (Güçbir Jeneratör, İstanbul).

Seyyar konveyör bant için fiyat araştırması yapılmıştır. Yüksekliği ayarlanabilir 7 m uzunluğunda bir konveyör bant için 3500 USD fiyat alınmıştır (Millmak Değirmen Makinaları, Konya).

Peletleme makinası ve peletleme sonrası eleme işlemi yapan komple sistem için tambur çapı 1.5 m olan ve eğimi ayarlanabilen bir sistem tasarlanmış ve Konya’da bulunan küçük işletmelere gidilerek fiyat alınmıştır. Bir tarım makinaları yapan firma (Uyanık Yatağanlı) 1800 USD fiyat vermiştir.

Yüklü çözeltiyi reaksiyon havuzdan aktif karbon kolonlarına ve ayrıca sıyrılmış çözeltiyi reaksiyon havuzuna pompalayacak paslanmaz çelik pompa araştırması yapılmıştır. Reaksiyon havuzunun çözelti kapasitesi 3.65 m^3 olması gerektiğinden 30 dakika içerisinde bu çözeltinin reaksiyon havuzundan alınması ve yeni çözeltinin (NaCN konsantrasyonu ayarlanmış) reaksiyon havuzuna eklenmesi gerekmektedir. Pompa basıncı çözeltiyi emdiği noktadan basabildiği noktaya kadar ölçülen su yüksekliğine göre belirlenmektedir. Bu anlamda minimum $8 \text{ m}^3/\text{saat}$ kapasiteli, minimum 10 m yüksekliğe çözeltiyi basabilecek 2 adet pompaya ihtiyaç duyulmaktadır. Bu bağlamda yapılan piyasa araştırmasında Kampa® firması ile yapılan istişare sonucu 15 m su yüksekliğine kadar $10 \text{ m}^3/\text{saat}$ çözelti basabilen 2 adet paslanmaz çelik pompa için 3500 USD fiyat alınmıştır.

Sudan’da altın üterimi yapan Ariab firması ile irtibata geçilerek tesiste kullandıkları aktif karbon kolonu hakkında bilgi edinilmiştir. Firma 10 cm x 2 m plastik boru kullanılarak oluşturdukları silindirik yapı içerisine aktif karbon koyarak kendi aktif karbon kolonlarını yaptıklarını ifade etmişlerdir. Bu nedenle gider olarak dikkate alınmamıştır.

Çözelti havuzlarının tasarımında her bir sirkülasyon için kullanılan çözelti hacmi ve artık hacminin yanı sıra kullanılan sepetin hacmi de önemlidir. Havuz derinliği paslanmaz çelik sepet yüksekliğinden 15 cm büyük olması çözeltinin tüm pelet ile teması için yeterli olacaktır. Ancak, sistemin 3 dakikada bir yukarı aşağı hareketi ile taşma yaşanmaması için havuz çapının sepet çapından 20 cm geniş olması sağlanması durumunda yükseklik kendiliğinden ortaya çıkacaktır. Paslanmaz çelik için firmadan alınan yoğunluk bilgileri ile kapladığı hacim hesaplanmıştır. 325 kg ağırlığındaki paslanmaz çelik sepet 0.04 m^3 hacim kaplamaktadır. Artık hacmi (gerçek hacim) hesaplamak için artığın yoğunluğu belirlenmiş ve 2.62 t/m^3 olarak tespit edilmiştir. Buna göre 0.93 m^3 artığın her bir sirkülasyon için kullanıldığı tespit edilmiştir. Buna göre kullanılan çözelti hacmi ise 3.65 m^3 ’tür. Toplam hacim 4.62 m^3 olarak

hesaplanacaktır. Havuz kesitinin çapı; sepet çapı + 20 cm= 1.30 m olacağından buradan hareketle reaksiyon havuzu yüksekliği 2.26 m olacaktır. Çözelti ayarlama havuzu ise çözelti hacmi ile eşit olacaktır ki 3.65 m^3 'tür. Emniyet faktörü olarak %20 eklenmesi ile havuzların olması gereken yükseklikleri hesaplanabilir. Çalışılması düşünülen bölge normal toprak zemin olup havuz için yapılacak kazım işleri için bir kepçe kiralanacaktır. Kazım işlerinin 1 gün (12 saat) sürmesi beklenmektedir. Kepçe kirası Sudan şartlarında 100 USD/saat olduğu bilgisine ulaşılmıştır. Yaklaşık 1200 USD maliyetle kazım işlerinin tamamlanacağı düşünülmektedir.

Havuzun geçirgenliğinin önlemesi amacıyla membran ihtiyacı vardır. Membran fiyat araştırmasında 8 USD/m² olarak fiyat bilgisine ulaşılmıştır. Toplam alan+ %20 olacak şekilde yapılan hesaplamada reaksiyon havuzu için 5.12 m² ve çözelti ayarlama havuzu için de aynı miktarda membran kullanılması durumunda yaklaşık 10 m² membran ihtiyacı doğmaktadır. Membran maliyeti toplamda 80 USD gibi fiyat olmaktadır.

Dünyada siyanürleme yöntemiyle altın üretimi için yaygın kullanılabildiğine göre 1 g Au için 1 kg aktif karbon şeklindedir. Her döngü için 1 Ons Au hedeflendiğinden yaklaşık 31 kg/döngü aktif karbona ihtiyaç vardır. 24 saat esasına göre 9 döngü şeklinde çalışma yapılacağından 279 kg aktif karbona ihtiyaç duyulacaktır. Aktif karbondan altının sıyırılması işlemi 6 saat gibi bir süre almaktadır. 1 gün içinde toplanan yüklü aktif karbondan altının sıyırılması, kullanılmış aktif karbonun tekrar aktivasyonu için 24 saat bir süre gerekmektedir. Bu nedenle gerekli olan toplam aktif karbon miktarı iki katına çıkmaktadır. Emniyet faktörlerinin (%25) göz önünde tutulması durumunda $279 \times 2 \times 1.25 = 698$ kg aktif karbona ihtiyaç duyulmaktadır. İnlice/Konya'da bulunan Eczacıbaşı'na ait işletme ile yapılan iştişarede kullandıkları aktif karbonunu İspanya menşeli bir firmadan 2000 Euro/ton (2180 USD/ton) şeklinde temin ettikleri bilgisine ulaşılmıştır. Bu durumda 698 kg aktif karbon alım gideri toplam 1522 USD olarak gerçekleşmektedir.

Aktif karbondan sıyırılmış olan altın çözeltisinden elektro-kazanım yoluyla altın üretimi gerçekleştirilecektir. Günlük kapasite olarak 9 Ons (279 g) altın üretimi yapılacağından günlük 1 kg kapasiteli elektro kazanım ünitesi yeterli olacaktır. Yapılan fiyat araştırmasına göre 1 kg/gün elektro-kazanım ünitesi fiyatı 8200 USD olarak fiyat bilgisine ulaşılmıştır (Eco-Goldex™).

Barınma ve ofis amaçlı sabit karavanlara ihtiyaç duyulmaktadır. Çalışmalar 24 saat (3 vardiya) esasına göre yapılması planlanmaktadır. Bu nedenle her bir vardiya için

5 çalışana (1 mühendis, 4 işçi) ihtiyaç duyulduğundan 1 adet ofis için, 1 adet mühendis için ve 1 adet işçiler için olmak üzere 3 adet sabit karavana ihtiyaç duyulmaktadır. Sudan şartları için yapılan fiyat araştırmasında 12x2.3x2.35 m ebatlarındaki 1 adet karavan için 2000 USD fiyat verilmiştir. İstihdam edilmesi düşünülen mühendisin karavanı hem kendi ofisi hem yatacak yeri hem de depo amaçlı kullanılacak şekilde 3 parça halinde bölünmüş şekilde olacaktır. Ofis için kullanılacak karavan 2 eşit parçaya bölünmüş halde ofis+mutfak-yemekhane şeklinde olacaktır. Mutfak maliyeti olarak LPG'li ocak ve fırın ve diğer mutfak malzemeleri ve ayrıca buzdolabı için 1800 USD fiyat bilgisine yine Poer Sudan şartlarında ulaşılmıştır. Ofis malzemeleri ve yataklar için yaklaşık toplam 600 USD fiyat bilgisine ulaşılmıştır. İlk yatırım giderleri özet olarak aşağıdaki çizelgede (Çizelge 7.1) verilmiştir.

Çizelge 7. 1. Kurulması planlanan tesisin ilk yatırım giderleri.

Alınacak teçhizat/hizmet alımı	Birim/Miktar/adet	Maliyet (USD)
Paslanmaz çelik süzgeç sepet	2 adet	4000
15 KVA Jeneratör+pano	2 adet	10200
Seyyar vinç	2 adet	1400
Seyyar konveyör bant	1 adet	3500
Peletleme makinesi	1 adet	1800
Çözelti pompası	2 adet	3500
Navlun (Türkiye-Port Sudan)	1 Konteyner	4000
Çözelti havuzu	2 adet	1200
Membran	10 m ²	80
Elektro-kazanım ünitesi	1 adet	8200
Navlun (Çin-Port Sudan)	1 Konteyner	6000
Sabit karavan (barınak/ofis/depo)	3 adet	6000
Ofis malzemeleri, yatak vs.	-	600
Mutfak demirbaşları	-	2280
Aktif karbon	698 kg	1522
Port Sudan-Çalışılacak sahaya nakliyat	6 hizmet	660
Toplam	-	54942

7.2. İşletme Giderleri

Kurulması planlanan tesisin işletmeye alınması ile çalışan giderleri, iaşe giderleri, yakıt giderleri (dizel jeneratör), su giderleri, NaCN giderleri, aktif karbon

giderleri, aktif karbondan sıyırma-rafinasyon giderleri ve amortisman giderleri olarak planlanmıştır.

5 çalışan/vardiya olarak planlanan tesiste 3 mühendis 12 işçi çalışacaktır. Bu çalışan dışında 1 adet aşçı da istihdam edilecektir. Sudan şartlarında tecrubeli bir mühendis ayda minimum 800 maksimum 1200 USD, işçi ise ayda minimum 150 maksimum 300 USD maaş ödemesi aldığı bilgisine ulaşılmıştır. Aşçı maaşı da yine işçiler kadar olduğu bilgisine ulaşılmıştır. Çalışan sigortaları ise özel firmalar tarafından kişi başı 25 USD/ay olarak yapılmaktadır. Buna göre 3 vardiya için toplam çalışan gideri (maksimum maaş/ay'a göre hesaplanmıştır) sigorta dahil 7850 USD/ay olarak hesaplanmıştır. Sudan çalışma yasasına göre madencilik sektöründe 1 ay çalışan işçi ve mühendis bir ayın sonunda 15 gün izine ayrılmak zorundadır. Bu durumda çalışan sayısı normal durumun 2 katı olması zorunluluğu vardır. 7850 USD/ay olan çalışan gideri 15700 USD/ay'a ulaşmaktadır.

Çalışanların günlük iâşe giderleri kişi başı 5 USD/öğün gibi bir rakama tekabül etmektedir. Aşçı dahil 3 öğün yemek için toplam 3600 USD/ay olarak hesaplanmıştır.

Jeneratör hem tesisi hem de mutfakta bulunan buzdolabını çalıştıracak şekilde çalışacaktır. 15 kVA güçteki jeneratör ortalama olarak toplam gücünün %75'i kadar çalışması tesisin toplam elektrik ihtiyacını karşılayabileceği Konya Teknik Üniversitesi Müh. Ve Doğa Fakültesi Elektrik ve Elektronik Mühendisliği öğretim üyeleri ile yapılan istişare ile belirlenmiştir. Üretici firma ile yapılan görüşmede belirlenen şartlarda 3.25 L/saat motorin tüketiminin gerçekleşeceği ile ilgili bir çizelge göndermişlerdir. Bakım masrafları olarak 250 saat (yaklaşık 10 gün) çalışma sonunda yapıldığı belirtilmiştir. Bakım olarak, hava filtresi ve motor yağı değişimi yapılmasının yeterli olduğu bilgisi verilmiş ancak hava filtresinin de yağlı filtre olduğu belirtilmiştir. 5 L 20w/50 yağ ile bakımının yapılması yeterlidir. Bu durumda 75 USD/ay motor yağı gideri ve 2340 L/ay motorin gideri meydana gelmektedir. Sudan motorin piyasasında motorin litre fiyatı 0.6 USD bilgisine ulaşılmıştır. Bu durumda 1404 USD/ay motorin gideri tahmin edilmektedir.

Her 120 dakikalık periyotlar ile yapılacak liç çalışmalarında periyotlar arası maksimum 30 dakika olacak şekilde tesiste üretim planlaması düşünülmektedir ve dolayısıyla her bir periyot 150 dakika sürmektedir. Bu durumda 24 saat (3 vardiya) çalışma döngüsü için 9.6 periyot üretim gerçekleştirilebilmektedir. İyi şartlar için 9 periyot/gün üretim düşünülebilir. Her bir periyotta yukarıdaki bölümde hesaplandığı üzere 2.43 ton artık kullanılacağından, %40 K/S oranı ile her bir periyot için gereken su

miktarı 6.1 m^3 'tür. Buharlaşıma ve diğer olumsuz faktörleri göz önüne alındığında %20'lik bir güvenlik faktörüyle bu değer 7.3 m^3 /periyot olarak hesaplanabilir. Çalışılan bölgenin denize yakın olması ve bağıl nem oranının hemen hemen her mevsim %80 civarında kalması nedeniyle suyun buharlaşma hızının düşük kalacağı tahmin edilmektedir. Çalışılan her gün için %25 civarında bir emniyet faktörü ile 1.82 m^3 ekstra suya ihtiyaç olacağı tahmin edilmektedir. Çalışılan bölgede/sahada tankerler ile su getiren bazı işletmeler suyun m^3 fiyatını yaklaşık 3 USD fiyattan satmaktadır. Bu durumda 3 USD/gün su gideri ile aylık 90 USD masraf oluşturmaktadır.

NaCN giderleri olarak Bölüm 6.6'da hesaplanan $58.4 \text{ NaCN/Au (w/w)}$ oranı dikkate alınmıştır. 1 Ons Au için 1.82 kg NaCN tüketimi meydana gelmektedir. Yapılan piyasa araştırmasına göre Port Sudan'ın karşı kıyısında bulunan Suudi Arabistan'da üretilen NaCN ton fiyatı 800-1200 USD aralığında değişmektedir. 9 periyot/gün için 16.38 kg ve 1 ay için 491.4 kg NaCN tüketimi meydana gelmektedir. Üretilen NaCN saflıkları %95-%98 aralığında değişmekte olup yaklaşık 517 kg/ay NaCN ihtiyacı ile 620 USD/ay gider oluşturmaktadır.

Peletleme/aglomerasyon ünitesinde kullanılmak üzere çimentoya ihtiyaç duyulacaktır. $100/9 \text{ (w/w)}$ oranında çimento kullanılması durumunda; her periyotta 2.43 ton artık kullanılacağından 9 periyot için 21.87 ton artık için 1.97 ton/gün çimentoya ihtiyaç duyulacaktır. Sudan piyasasında çimento fiyatı 150 USD/ton bilgisine bilgisine ulaşılmıştır. Bu durumda 8865 USD/ay çimento gideri meydana gelecektir.

Çalışılan artıklar tez içerisinde bahsi geçen amalgamasyon yöntemiyle altın işletmelerin ortak malıdır. İşletmeler naliz sonucu belirlenen ortalama altın tenörüne bağlı olarak hesaplanan altının %50'sini işletmelerin ortak hesabına gelir olarak almaktadırlar. Başka bir deyişle elde edilen vergi sonrası gelirin yarısı işletmelerin ortak hesabına aktarılmaktadır. Bölüm 7.3'de hesaplanan gelirin yarısı olan 249561 USD işletmelere aktarılacaktır.

Sudan yasalarına göre üretilen altının %30'u maliyeye vergi olarak ödenmektedir. Ayrıca Çizelge 7.1'de verilen ilk 13 satırdaki ilk yatırım giderlerinin ömrü 5 yıl ile sınırlı olduğundan $41682/(12 \times 5) = 695 \text{ USD/ay}$ amortisman gideri vardır. İşletme giderleri Çizelge 7.2'de özet olarak verilmiştir.

Çizelge 7. 2. Kurulması planlanan tesisin tahmini giderleri.

Giderler	Maliyet (USD)/ay
Çalışan gideri	15700
İaşe giderleri	3600
Motorin gideri (jeneratör)	1404
Su gideri	90
NaCN gideri	620
Çimento gideri	8865
Amortisman gideri	695
İşletmelere aktarılan para	249561
Vergi	149737
Beklenmeyen giderler	2211
Toplam	432483

7.3. Gelirler ve Başa Baş Noktasının Tespiti

Altın fiyatları yıllara göre değişkenlik göstermektedir. Fiyat değişiklikleri bir çok faktöre bağlı olup 2008 yılından itibaren günümüze altın Ons fiyatındaki haftalık değişim grafiği Şekil 7.1’de verilmiştir. Şekil 7.1’den görüleceği üzere Ons altın fiyatları geniş bir bant aralığında seyretmektedir. Bu bant aralığı incelendiğinde 2025 yılı ocak ayı başı için altın Ons fiyatları maksimum 2600 USD ve minimum 1555 USD olarak görülmektedir (1 Troy Ons= 31.1 g). Trent ortalaması olarak 2054 USD/Ons olarak fiyat çıkmaktadır. Yakın gelecekte dünyadaki enflasyon ortamında ve ekonomik şartlarında kayda değer bir değişikliğin ve aynı zamanda büyük savaşların olmadığı durumlar için altın fiyatları Şekil 7.1’de görülen bant aralığında seyredecektir.

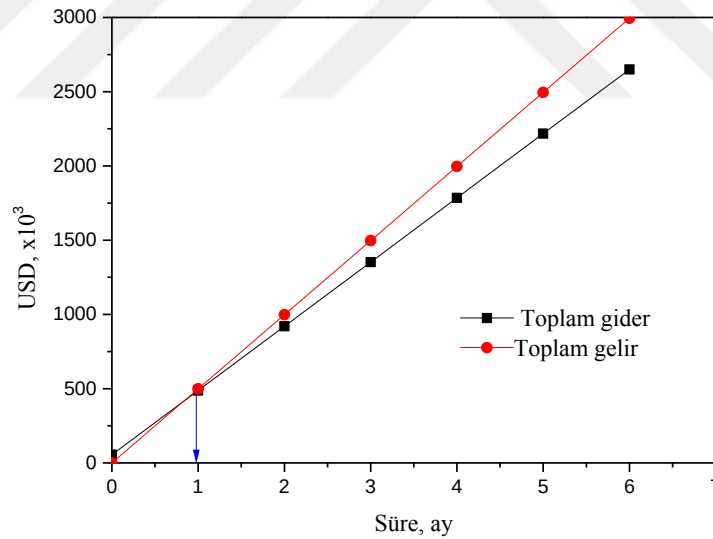
**Şekil 7. 1.** Yıllara göre altın Ons fiyatındaki değişim (haftalık grafik).

İşletmenin tek geliri üretilen altındır. Elektro-kazanım ünitesinden elde edilen altın aylık bazda hesaplandığında;

$$(1 \text{ Ons/periyot}) \times (9 \text{ periyot/gün}) \times 30 \text{ gün/ay} = 270 \text{ Ons/ay}$$

Altın fiyatının uzun yıllara ait trent ortalaması olan 2054 USD/Ons düşünülmesi durumunda üretilen altından elde edilmesi beklenen gelir 554000 USD/ay'dır. Ancak üretilen altın elektro-kazanım ürünü olduğu için rafinasyona ihtiyaç vardır. Bu nedenle elde edilen altının piyasa fiyatının %90'ı ile işlem görmektedir. Sonuç olarak $554000 \times 0.9 = 499122$ USD/ay net gelir elde edilmektedir. Bu altına ait Sudan maliyesine verilecek olan %30 devlet hakkı vergisi ise 149737 USD/ay olarak hesaplanmış ve vergi gideri olarak Çizelge 7.2'de verilmiştir.

Buna göre ilk yatırım giderleri (Çizelge 7.1), aylık işletme giderleri (Çizelge 7.2) ve yine aylık bazda işletme gelirleri kullanılarak kurulması düşünülen/planlanan tesisin kâra geçme zamanı hesaplanabilir. Şekil 7.2'de aylık bazda gelir-gider grafiği verilmiştir. Şekil 7.2'den görüleceği üzere kurulması planlanan tesisin başa-baş noktası yaklaşık 1 aydır.



Şekil 7. 2. Kurulması planlanan tesisin aya bağlı gelir-gider grafiği.

8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

8.1. Sonuçlar

Portsudan'daki altın madenciliği artıklarından altının siyanürleme işlemleriyle kazanılması ile ilgili karıştırma liçi, perkolasyon liçi ve Vat liçi çalışmaları yapılmıştır. Perkolasyon liçi ve Vat liçi çalışmaları için çimento kullanılarak aglomerasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Çalışmalardan elde edilen çözeltilerde bulunan altının aktif karbona adsorpsiyonu çalışılmıştır.

- Karıştırma liçi çalışmalarında aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır;
- i) Artık üzerinde yapılan mineralojik ve kimyasal analizler sonucu artığın büyük bir çoğunluğunun SiO_2 'den oluştuğu görülmüştür. Ayrıca; artık içerisinde bir miktar oksitli demir ve bakır da bulunmakta olup ortalama Au tenörü 16.86 g/ton'dur.
- ii) Karıştırma liçi çalışmalarında karıştırma ortam sıcaklığında ($25\text{ }^\circ\text{C}$) hızı 0-400 dev/dak. aralığında arttıkça Au çözünme hızı artmaktadır. 400 dev/dak. Karıştırma hızının üzerindeki hızda kayda değer bir Au çözünme hızında artış gözlenmemiştir. 400 dev/dak. karıştırma hızında 120 dakikalık liç işlemi sonunda %87.91 verimle Au çözünmüştür.
- iii) pH ayarlayıcı olarak Ca(OH)_2 kullanılmıştır. pH 10-10.10 aralığında pH arttıkça Au çözünme hızı da artmaktadır. pH 10.10 ve pH 10.30 değerlerinde yapılan liç işlemi sonuçlarında Au çözünme hızı hemen hemen aynı olup pH 10.30 değerinden sonra Au çözünme hızlarında azalma meydana gelmiştir. Azalmanın nedeni olarak literatürde de bildirildiği gibi, reaksiyon sonucu oluşan H_2O_2 'nin Ca^{+2} iyonları ile altın yüzeyinde reaksiyona girerek CaO_2 (kalsiyum süperoksit) oluşturmaya dayandırılan görüşüne varılmıştır.
- iv) NaCN konsantrasyonu arttıkça Au çözünme hızında artış meydana gelmiştir. 120 dakikalık liç işlemi sonucunda 0.25-1.0 g/L NaCN konsantrasyon aralığında Au çözünme verimleri yaklaşık %88 civarında kalmıştır.
- v) Katı/sıvı oranı arttıkça Au çözünme verimi de azalmaktadır. Katı oranı arttıkça çözelti içerisindeki katı miktarında artması ile sonuçlanacağından birim ağırlık için gereken CN^- iyonu miktarı azalmaktadır. Katı oranının azalması katının çözelti ile temas süresini de arttırmaktadır. Bu bağlamda katı/sıvı oranı arttıkça Au çözünme veriminin azalması izah edilmiştir.

- vi) Sıcaklık arttıkça Au çözünme hızı 25-85 °C sıcaklık aralığında artmaktadır. Örneğin 45 dakikalık bir liç işlemi sonucunda Au çözünme verimleri 25 °C için %77.89, 40 °C için %80.87, 50 °C için %84.16, 60 °C için %85.09, 80 °C için %93.06 ve 85 °C için %98.71 olarak gerçekleşmiştir. 80 °C sıcaklıkta 120 dakikalık liç işlemi sonunda altının tamamı çözeltiye alınmıştır. Yine 85 °C sıcaklıkta 60 dakikalık bir liç işlemi sonucunda aynı değere ulaşılmıştır.
- vii) Artık içerisinde yaklaşık %77 oranında SiO₂ bulunması ve ince tane boyutunda dağılması sonucu liç sonrası susuzlandırma problemi meydana getirdiğinden bütün karıştırma liçi çalışmalarında susuzlandırma amaçlı N100 polimer kullanılmıştır
- viii) Aktif karbona adsorpsiyon çalışmaları karıştırma liçi deneyleri yapılarak gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalarda CIP (Carbon in Pulp) yöntemi kullanılmıştır. Çalışmalarda çözünmüş altının yaklaşık %93'ü ve yine çözünmüş bakırın yaklaşık %98'i aktif karbona adsorplanmıştır. Bu bağlamda siyanür tüketiminin önemli bir kısmı bakırın çözündürülmesinde harcandığı tespit edilmiştir.
- Perkolasyon liçi çalışmalarında karıştırma liçi çalışmalarında elde edilen pH, NaCN konsantrasyonu ve katı/sıvı oranı kullanılmıştır. Elde edilen sonuçları aşağıda özetlemek mümkündür.
- i) Karıştırma liçi her ne kadar olumlu sonuçlar verse de liç sonrası susuzlandırma problemi nedeniyle bu çalışma için aglomerasyon yapılması ihtiyacı duyulmuştur. Aglomerasyon işlemi çimento ile gerçekleştirilmiş olup sulu ortamda fiziksel dayanım anlamında en iyi sonuçlar 7/100 ve 9/100 (w/w) çimento/artık oranında elde edilen aglomeratlarda alınmıştır.
- ii) Perkolasyon liçinde çözelti akış hızının (debi) artması Au çözünme hızına bir etkisinin olmadığı tespit edilmiştir. Karıştırma hızının Au çözünmesine olan etkisi çalışmalarında olduğu gibi 120 dakikalık bir liç işlemi sonunda çalışılan debilerde altın çözünme verimleri yaklaşık %85 olduğu tespit edilmiştir. Bu bağlamda çözünmüş Au'nın yüzeyinden akan siyanür çözeltisi ile uzaklaştırılması yeterli olmaktadır.
- Vat liçi çalışmalarında karıştırma liçi çalışmalarında elde edilen pH, NaCN konsantrasyonu ve katı/sıvı oranı kullanılmıştır. Elde edilen sonuçları aşağıda özetlemek mümkündür.

- i) Vat liçi çalışmalarında perkolasyon liçi çalışmalarında kullanılan aglomeratlar kullanılmıştır. Çalışmalarda 2, 3 ve 5 dakika aralıklarla deney düzeneği 2 defa aşağı yukarı hareket ettirilmiştir. Deneyler sonucu 2 ve 3 defa yapılan aşağı yukarı hareket ettirilen deneylerde 120 dakikanın sonunda yaklaşık %83 Au çözünme verimine ulaşılmıştır.

- Yapay Sinir Ağları (YSA) ile karıştırma liçi çalışmalarından elde edilen veriler analiz edilerek prosesin çeşitli değişkenlere bağlı tahmininin yapılmasına çalışılmıştır. YSA çalışmaları sonucu; deneysel çalışmalar-YSA tahmin verileri korelasyon katsayısı yaklaşık 1 olan bir doğru elde edilmiştir.

- Fizibilite çalışmaları Vat liçi çalışmalarından elde edilen veriler ışığında gerçekleştirilmiştir. Çalışmalar sonucu tez çalışmasına konu olan artıklardan altın üretiminin gerçekleştirilmesi durumunda 1 aylık bir üretim sonrasında tesis kâra geçebilmektedir.

8.2. Öneriler

Çalışılan artıklar içerisinde bulunan altın tenörünün yüksek olması nedeniyle aşağıdaki önerileri sunmak mümkündür;

- i) Flotasyon çalışmaları yapılarak konsantre olarak elde edilebilecek ürünün çeşitli fluxlar yardımıyla izabesi gerçekleştirilebilir.
- ii) Çalışmalar tiyosülfat ve tiyoüre kullanılarak gerçekleştirilip siyanürleme liçi ile mukayese edilebilir.
- iii) Sarsıntılı masa, Humphrey's Spirali, Multi Gravity seperatör ve Falcon konsantratörü gibi gravite ayırıcılar ile gravite zenginleştirilmesi yapılabilir.

KAYNAKLAR

- Abbruzzese, C., Fornari, P., Massidda, R., Veglio, F., and Ubaldini, S. 1995. Thiosulphate leaching for gold hydrometallurgy. *Hydrometallurgy*, 39(1-3), pp. 276-295.
- Acarkan, N., Gürkan, V., and Arslan F. 1994. The role of protective alkalinity and Ca^{+2} ions in the cyanidation of refractory silver ores. *Hydrometallurgy*, 36(3), pp. 361-367.
- Adams, M. D., 1990. The mechanism of adsorption of aurocyanide onto activated carbon 1. Relation between the effects of oxygen and ionic strength. *Hydrometallurgy* 25, s-s. 171 - 184.
- Aahlatcı, F., Yazıcı, E. Y., Celep, o., and Deveci, H. 2017. Tiyosülfat ile Altın ve Gümüş liçinin temelleri-bölüm 1. *Scientific Mining Journal*, 56(3), pp. 117-130.
- Ahmed, A. M., Purwanto, P., and Sunoko, H. R. 2019. Consequences of Mercury Used by Artisanal and Small-Scale Gold Mining Processes a Case of River Nile State Sudan. *Journal of Ecological Engineering*, 20(2), pp. 106-115.
- Ahmd, A. M., 1998. Sudan industrial minerals and rocks: Centre for Strategic Studies.
- Ahmed, M. R., Mohammed, H. S., El-Feky, M. G., and Abdel-Monem, Y. K. 2020. Gold Leaching Using Thiourea from Uranium Tailing Material, Gabal El-Missikat, Central Eastern Desert, Egypt. *Journal of Sustainable Metallurgy*, 6, pp. 599-611.
- Ahtiainen, R., and Lundström, M. 2019. Cyanide-free gold leaching in exceptionally mild chloride solutions. *Journal of Cleaner Production*, 234, 9-17. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.06.197>
- Anderson, C. G. 2016. Alkaline sulfide gold leaching kinetics. *Minerals Engineering*, 92, 248-256.
- Arima, H., Fujita, T., and Yen, W. T. 2004. Using nickel as a catalyst in ammonium thiosulfate leaching for gold extraction. *Materials Transactions*, 45(2), 516-526.
- Aslan, S. 1999. Altın ve altına dayalı işlemler muhasebesi: doktora tezi marmara Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, İşletme Anabilim Dalı, Finans Bilim Dalı, İstanbul.
- Atay, g. 2013. dünyada ve türkiye’de altın piyasaları ve türkiye’de altın fiyatlarını etkileyen faktörlerin incelenmesi. Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, İşletme Anabilim Dalı, Finans Bilim Dalı, İstanbul.
- Aylmore, M. G., and Muir, D. M. 2001. Thiosulfate leaching of gold—A review. *Minerals Engineering*, 14(2), 135-174.
- Beyuo, M., and Abaka-Wood, G. 2016. zadra Elution Circuit Optimisation and Operational Experience at the CIL Plant of Gold Fields Ghana Limited. Paper presented at the 4th UMaT Biennial International Mining and Mineral Conference. (pp. 161-167).

- Bhagat, K., Kotwal, D., and Roshan, S. 1990. On the occurrence of wheat and barley aphid *Sitobion avenae* Fabricius (Homoptera: Aphididae) and its natural enemies in Jammu (Jammu and Kashmir). *Journal of Advanced Zoology*, 11(1), 48-52.
- Bhappu, R. B. 1990. Hydrometallurgical processing of precious metal ores. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 6(1-4), 67-80.
- Güney, k., erler, m., & sağıroğlu, ş. 1999. Neurodesign Of Log-Periodic Dipole Antenna. *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 12(2), 18-34.
- Çelik, H. 2005. refrakter altın cevherlerinin/konsantrelerinin ön iyileştirilmesinde biyooksidasyon yönteminin kullanımı. *Bilimsel Madencilik Dergisi*, 44(3), 35-46.
- Çilingir, Y. 1996. Metalik cevherler ve zenginleştirme yöntemleri: Cilt 1 DEÜ Müh.-MimFak. Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir.
- Davidson, R., and Duncanson, D. 1977. The elution of gold from activated carbon using deionized water. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 77(12), 254-261.
- Deitz, G., and Halpern, J. 1953. Reaction of silver with aqueous solutions of cyanide and oxygen. *JOM*, 5, 1109-1116.
- Derneği, A. M. 2011. Madencilik Sektörü ve Altın Madenciliği Raporu. Altın Madencileri Derneği, 1-71.
- Dunne, R. 2005. Flotation of gold and gold-bearing ores. *Developments in mineral processing*, 15, 309-344.
- Erdem, B. 2006. İkincil Altın Kaynaklarından Altın Geri Kazanım Ve Rafinasyon Prosesinin Optimizasyonu. yüksek lisans tezi, İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü. Anabilim Dalı : metalurji ve malzeme mühendisliği, İstanbul.
- Feather, C., and Koen, G. 1973. The significance of the mineralogical and surface characteristics of gold grains in the recovery process. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 73(7), 223-234.
- Ferdana, A. D., Petrus, H. T. B. M., Bendiyasa, I., Prijambada, I. D., Hamada, F., and Sachiko, T. 2018. Optimization of gold ore Sumbawa separation using gravity method: Shaking table. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 1945, No. 1). AIP Publishing.
- Ghofur, A., Mursadin, A., Amrullah, A., & Raihan, R. 2022. The potential of activated carbon from peat soil as an absorbent for hydrocarbon (HC) and carbon monoxide (CO) emissions in motor vehicles. *Jurnal Rekayasa Mesin*, 13(1), 251-256.
- Gökçe, A. 1995. Özel Maden Yatakları. Chap. 59 in *Maden Yatakları*. Sivas: Cumhuriyet Üniversitesi Yayınları, 133-140.
- Gray, D. E. 1999. A quantitative study into carbon-in-pulp adsorption operations.
- Greenwood, N. N., and Earnshaw, A. 2012. *Chemistry of the Elements*: Elsevier.1341.

- Habashi, F. 1997. Handbook of extractive metallurgy: Wiley-Vch, Germany.
- Haykin, S. 1998. Neural networks: a comprehensive foundation: Prentice Hall PTR.
- Hilson, G. 2009. Small-scale mining, poverty and economic development in sub-Saharan Africa: An overview. *Resources Policy*, 34(1), 1-5. doi:<https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2008.12.001>.
- Hussien, H. H., and Mohamed, E. E. 2020. Impacts of artisanal gold mining in River Nile State, Sudan. *International Journal of advanced and applied sciences*, 7(9), 8-14.
- Ibrahim, M. 2015. Artisanal mining in Sudan: Opportunities, challenges, and impacts In: UNCTAD, 17th Africa OILGASMINE: Extractive Industries and Sustainable Job Creation: Khartoum.
- İlyasoğlu, G., Vergili, I., Aktaş, Ö., Kaya, Y., Gönder, Z. B., and Yilmaz, G. 2023. Effect of sludge retention time on bioregeneration of powdered activated carbon loaded with paracetamol. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 1-14.
- Jang, J.-S. R., and Mizutani, E. 1996. Levenberg-Marquardt method for ANFIS learning. Paper presented at the Proceedings of North American Fuzzy Information Processing. (pp. 87-91). IEEE.
- Karna, K. N., and Breen, D. M. 1989. An artificial neural networks tutorial: part 1- Basics. *Neural Networks*, 1(1), 4-23.
- Kırıkoğlu, M. S. 1990. The Formation and the Features of the Epithermal Gold Deposits. *Scientific Mining Journal*, 29(1), 41-50.
- Kiriş, K. 1994. Altın; ekonomik yataklanma tipleri, arama safhaları ve maliyet. *Jeoloji Mühendisleri Odası Yayınları*, 44-45.
- Kroeker, S., Wasylishen, R. E., and Hanna, J. V. 1999. The structure of solid copper (I) cyanide: A multinuclear magnetic and quadrupole resonance study. *Journal of the American Chemical Society*, 121(7), 1582-1590.
- Kumar, R., and Wang, R.-A. (2016). Structure, expression and functions of MTA genes. *Gene*, 582(2), 112-121.
- Linge, H., and Welham, N. 1997. Gold recovery from a refractory arsenopyrite (FeAsS) concentrate by in-situ slurry oxidation. *Minerals Engineering*, 10(6), 557-566.
- Logsdon, M. J., Hagelstein, K., and Mudder, T. 1999. The management of cyanide in gold extraction: (p. 10). Ottawa: International Council on Metals and the Environment.
- Ma, C. J., Li, J. Y., and Liu, R. J. 2015. A review of thiocyanate hydrometallurgy for the recovery of gold. *Applied Mechanics and Materials*, 768, 53-61.
- Maclaurin, R. 1893. XLVIII.—The dissolution of gold in a solution of potassium cyanide. *Journal of the Chemical Society, Transactions*, 63, 724-738.
- Marsden, J. 1992. 1. House, *The Chemistry of Gold Extraction*: Ellis-Horwood, Chichester.
- Marsden, J., and House, C. 2006. *The chemistry of gold extraction*, Society for Mining. Metall. Explor.(SME), Littleton, Co, USA.

- McDonal, W., Johnson, J., and Sandberg, R. 1990. Treatment of Alaskan refractory gold ores. *Engineering and Mining Journal*, June. pp48-53.
- McDougall, G. 1991. The physical nature and manufacture of activated carbon. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 91(4), 109-120.
- Mitchell, C., Evans, E., and Styles, M. 1997. A review of gold particle-size and recovery methods. *british geological survey Mineralogy & Petrology Group Technical Report WC/97/14*.
- MTA 2016. Türkiye ve dünyada altın: Erişim adresi: <http://www.mta.gov.tr/v3.0/sayfalar/bilgi-merkezi/maden>.
- Nsimba, E. B. 2009. Cyanide and cyanide complexes in the goldmine polluted land in the east and central rand goldfields, South Africa. University of the Witwatersrand Johannesburg.
- Oygür, V. 1990. Altın madenciliğinin yeniden doğuşu. *Jeoloji Mühendisliği Dergisi*(41), 17-22.
- Pekcan, E.1998. Altın bankacılığı, borsası, rafinerisi, ve Türkiye: İstanbul Ticaret Odası.
- Pizarro, R., McBeth, J., and Potter, G. 1974. Heap Leaching Practice at the Carlin Gold Mining Co. AIME Annual Meeting, Dallas, 15.
- Rumelhart, D. E., McClelland, J. L., and Group, P. R. 1986. Parallel distributed processing, volume 1: Explorations in the microstructure of cognition: Foundations.
- Rusanen, L., Aromaa, J., and Forsen, O. 2013. Pressure oxidation of pyrite-arsenopyrite refractory gold concentrate. *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, 49.
- Schultz, S. K. 2022. Dynamic Modelling of a Carbon-in-leach Gold Processing Plant. Stellenbosch: the degree of master of engineering. Stellenbosch University.
- Senanayake, G. 2005. Gold leaching by thiosulphate solutions: a critical review on copper (II)–thiosulphate–oxygen interactions. *Minerals Engineering*, 18(10), 995-1009.
- Seyidoğlu, A. 2003. Modeling activated sludge population dynamics (Master's thesis, Middle East Technical University) URI <https://hdl.handle.net/11511/13146>.
- Sheng, G., Xu, S., and Boyd, S. A. 1997. Surface heterogeneity of trimethylphenylammonium-smectite as revealed by adsorption of aromatic hydrocarbons from water. *Clays and clay minerals*, 45, 659-669.
- Sun, X., Guan, Y. C., and Han, K. N. 1996. Electrochemical behavior of the dissolution of gold-silver alloys in cyanide solutions. *Metallurgical and materials transactions B*, 27(3), 355-361.
- Taggart, A. F. 1945. *Handbook of Mineral Dressing*~ John Wiley and Sons. Inc., New York, 19-203.
- Türe, A. S., and Yılmaz, M. 2000. *Kuyumculuğun Doğuşu*, İstanbul: Goldaş Kültür Yayınları.

- Van Hinsberg, V. J. 2008. *Wills' mineral processing technology*: Butterworth-Heinemann (Elsevier), Burlington, Massachusetts. 456 p. ISBN: 978-0-7506-4450-1.: Mineralogical Society of America.
- Viswanathan, B., Neel, P. I., and Varadarajan, T. 2009. Methods of activation and specific applications of carbon materials. *India, Chennai*, 600(36), 1-160.
- West, D. C., Ford, J. B., and Ibrahim, E. 2015. *Strategic marketing: creating competitive advantage*: Oxford University Press, USA.
- Wills, B. A., and Finch, J. 2015. *Wills' mineral processing technology: an introduction to the practical aspects of ore treatment and mineral recovery*: Butterworth-Heinemann.
- Yıldız, C., Sayin, M., Yerebakan, H., and Kucukaksu, S. 2010. First Turkish Experiences of Assisted Beating-Heart Coronary Artery Bypass Graft with the Impella Microaxial Ventricular Assist Device®. Paper presented at the Heart Surgery Forum. (Vol. 13, No. 1, pp. E60-E62).
- Yin, X., Opara, A., Du, H., and Miller, J. D. 2011. Molecular dynamics simulations of metal–cyanide complexes: Fundamental considerations in gold hydrometallurgy. *Hydrometallurgy*, 106(1-2), 64-70.
- Yoon, J. H. 2014. *Gas around galaxies and clusters: The case for the virgo cluster*: Columbia University. ProQuest LLC. 789 East Eisenhower Parkway P.O. Box 1346 Ann Arbor, MI 48106 - 1346.
- Yurtoğlu, N. 2019. Cumhuriyet Türkiye'sinde maden işletmeciliği ve maden politikaları (1923-1960): Siyasal Kitabevi. Mart 2019, Ankara ISBN No: 978-605-7877-05-5.
- Yüce, A. E. 1995. Altın Gümüş İçeren Sulfürlü Bakırlı-Pirit Cevherlerinden Tiyoüre Liçi İle Altın ve Gümüş Kazanımı. Doktora Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Maden Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul, 125 s.
- Zhang, X., Pazner, M., and Duke, N. 2007. Lithologic and mineral information extraction for gold exploration using ASTER data in the south Chocolate Mountains (California). *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 62(4), 271-282.