

**YIĞIN LİÇİ KIRMA DEVRESİNDE KULLANILAN BİR  
YÜKSEK BASINÇLI MERDANELİ DEĞİRMENİN  
PERFORMANSININ İNCELENMESİ**

**AN INVESTIGATION OF THE PERFORMANCE OF THE HPGR  
USED IN HEAP LEACH CRUSHING CIRCUIT**

**ÖMER FARUK YILDIZ**

**PROF. DR ŞEVKET LEVENT ERGÜN**

**Tez Danışmanı**

Hacettepe Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin

Maden Mühendisliği Anabilim Dalı için Öngördüğü

Yüksek Lisans TEZİ olarak hazırlanmıştır.

2023

## ÖZET

### YIĞIN LIÇI KIRMA DEVRESİNDE KULLANILAN BİR YÜKSEK BASINÇLI MERDANELİ DEĞİRMENİN PERFORMANSININ İNCELENMESİ

ÖMER FARUK YILDIZ

**Yüksek Lisans, Maden Mühendisliği Bölümü**

**Tez Danışmanı: Prof. Dr. Ş. Levent Ergün**

Temmuz 2023, 77 sayfa

Bu tez kapsamında, yüksek basınçlı merdaneli değirmen devresinden alınan numunelerin boyut dağılımları ve işletme parametreleri kullanılarak, yığın liçi uygulamasında üçüncül kırıcı olarak kullanılan yüksek basınçlı merdaneli değirmenin performansı değerlendirilmiştir. Üçüncül kırıcı olarak kullanılan HPGR, iki adet tersiyer elek ile birlikte kullanılarak kapalı devre olarak konfigüre edilmiştir. HPGR cevher beslemesi iki aşamalı bir kırma eleme devresinden -45 mm olarak sağlanmaktadır. Farklı spesifik öğütme basıncında çalışırken devreden numuneler toplanmış ve elek analizleri yapılmıştır. Elde edilen tane boyu dağılımları, spesifik öğütme basıncı grafikleri, tüketilen enerji verileri kullanılarak ideal spesifik öğütme basıncının 3750 kN/m<sup>2</sup> olduğu ve bu basınçta elek altı üründe -1,18 mm boyut yüzdesinin %50 olduğu belirlenmiştir. Kapalı sistemde devreden yükün %47,6 olduğu hesaplanmıştır. Devreden yük taze besleme ile bir stok alanında birleşmekte ve HPGR sisteminde ideal besleme parça boyutu dağılımının bu karışım ile sağlandığı görülmüştür, kırma performansının en iyi seviyede korumak için bu devreden yükün %45 üzerinde olması gerektiği görülmüştür. İdeal spesifik öğütme basıncı üzerinde bir basınç ile öğütmenin ton başı harcanan

enerjide artışa ve sistemde oluşturduđu yüksek vibrasyon nedenli ekipmanların çalıřma verimlerinin dūřtūđu bulguları elde edilmiřtir.

Anahtar Kelimeler: gütme, HPGR, Yüksek Basınçlı Merdane, Performans Deđerlendirme

# ABSTRACT

## AN INVESTIGATION OF THE PERFORMANCE OF THE HPGR USED IN HEAP LEACH CRUSHING CIRCUIT

ÖMER FARUK YILDIZ

Master of Science, Department of Mining Engineering

**Supervisor: Prof. Dr. Ş. Levent Ergün**

July 2023, 77 pages

Within the scope of this thesis, the performance of high pressure grinding roller (HPGR), used as tertiary crusher in heap leaching operation, has been evaluated by using the operational parameters and the size distributions of the samples taken from the HPGR circuit. Functioning as a tertiary crusher, HPGR has been configured as a closed circuit together with two tertiary screens. The fresh ore feed to this circuit is provided at -45 mm from a two-stage crushing and screening circuit. The samples have been collected for the variable specific grinding pressure conditions and sieve analyses have been performed. Considering the obtained particle size distributions, specific grinding pressure charts, and consumed energy data, it has been concluded that the ideal specific grinding pressure is 3750kN/m<sup>2</sup> and the size distribution of the -1.18 mm material in the under screen product is 50% at this pressure. It has been calculated that the circulating load in the closed system is 47.6%. Moreover, it has been observed that the ideal feed size distribution has been achieved from the blending of this circulating load and fresh feed. Thus, it has been concluded that the circulating load should be kept more than 45% in order to maintain high crusher performance. On the other hand, it has been observed that operating at higher specific grinding pressure than the

ideal one, would result in increased power consumption per ton and high vibration causing a low efficiency of the equipment.

Keywords: Grinding, HPGR, High Pressure Grinding Roller, Performance Evaluation

## TEŞEKKÜR

Yüksek Lisans Tez çalışmam süresince bilgi ve tecrübesiyle bana yol göstermiş, farklı bir branşta uzmanlaşmam için tüm desteğini esirgememiş olan tez danışmanım Sayın Prof. Dr. Ő. Levent Ergün'e,

Tesis kullanımını aşamasında bana destek olan işletme müdürü Sayın Yahya Kemal Uzuner'e,

Deneysel analizler için Laboratuvar çalışmalarına destek veren işletme laboratuvar başmühendisi Sayın Ahmet Vedat Uğur'a,

Yüksek lisans tez çalışmalarım süresinde bana destek olan tüm Tümad Madencilik çalışanlarına,

Hep yanımda olan ve bana bu süreçte destek olan eşim Aylin Yıldız ve çok değerli çalışma arkadaşlarım Ali Burak Aktaş, Alper Aruer, Yavuz Aydemir ve Melis Erdem'e bana verdikleri destekler için,

Tüm içtenliğimle teşekkür ediyorum.



# İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	iii
TEŞEKKÜR.....	v
İÇİNDEKİLER.....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	x
EKLER DİZİNİ.....	x
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xi
<b>1. GİRİŞ.....</b>	<b>1</b>
<b>2. YIĞIN LIÇİNDE KULLANILAN KIRMA DEVRELERİ VE EKİPMANLARI.....</b>	<b>3</b>
2.1. Çeneli Kırıcı.....	3
2.2. Konik Kırıcı.....	5
2.3. Dönel Kırıcı (Gyratory).....	7
2.4. Vibrasyonlu Elekler.....	8
2.5. Yığın Liçinde Kullanılan Kırma Eleme Devreleri.....	9
2.5.1. Tüprağ Kışladağ Altın Madeni.....	9
2.5.2. Anagold Çöpler Altın Madeni.....	11
2.5.3. Koza Madencilik Himmetdede Altın Madeni.....	12
2.5.4. PT Merdeka Copper Gold Tbk. Altın Madeni.....	13
2.5.5. St. Augustine Gold & Copper King-king Copper-Gold Altın Madeni.....	14
2.5.6. Barrick Gold Corp. Lagunas Norte Mine Altın Madeni.....	15
<b>3. HPGR ve HPGR İÇEREN ÖĞÜTME DEVRELERİ.....</b>	<b>16</b>
3.1. HPGR.....	16
3.1.1. HPGR Teknolojisi.....	17
3.2. Endüstride Kullanılan HPGR Devreleri.....	25
3.2.1. Açık HPGR Devresi.....	25



3.2.2. Kapalı HPGR Devreleri .....	26
<b>4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR VE SONUÇLAR .....</b>	<b>30</b>
4.1. İşletmenin Tanımı.....	30
4.2. HPGR Devre Özeti .....	30
4.3. Akım Şeması ve Örnekleme Noktaları.....	31
4.4. Boyut Dağılımlarının Belirlenmesi .....	38
4.5. Madde Denkliği Çalışmaları .....	43
<b>5. SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ .....</b>	<b>59</b>
<b>6. SONUÇLAR ve ÖNERİLER .....</b>	<b>62</b>
KAYNAKLAR.....	64
EKLER .....	68
ÖZGEÇMİŞ.....	76

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. Çeneli Kırıcı .....	4
Şekil 2. Konik Kırıcı.....	6
Şekil 3. Dönel Kırıcı (Gyratory).....	7
Şekil 4. Vibrasyonlu Elek.....	8
Şekil 5. Tüprag Kışladağ altın madeni akış şeması .....	9
Şekil 6. Tüprag Kışladağ altın madeni akış şeması (kapasite artışı sonrası) .....	10
Şekil 7. Anagold Çöpler altın madeni akış şeması .....	11
Şekil 8. Koza Madencilik Himmetdede altın madeni akış şeması.....	12
Şekil 9. PT Merdeka Copper Gold Tbk. altın madeni akış şeması.....	13
Şekil 10. King-king Copper-Gold altın madeni akış şeması .....	14
Şekil 11. Lagunas Norte Mine altın madeni akış şeması .....	15
Şekil 12. Parça ve katmanların sıkıştırılma, öğütme mekanizması .....	16
Şekil 13. HPGR' ait ana parçalar.....	18
Şekil 14. HPGR genel görüşünü.....	19
Şekil 15. HPGR temel P&ID şeması .....	20
Şekil 16. HPGR hidrolik devre şeması.....	22
Şekil 17. HPGR işletme ekran görüntüsü (Tümad Madencilik, İvrindi, 2019).....	23
Şekil 18. HPGR öğütücü merdane yüzey görüntüsü .....	24
Şekil 19. Açık devre HPGR akış şeması .....	25
Şekil 20. Kapalı devre HPGR akış şeması.....	26
Şekil 21. Kapalı devre HPGR akış şeması (seperatör ile) .....	27
Şekil 22. Kapalı devre HPGR akış şeması (değirmen devresi, havalı separatör ile).....	28
Şekil 23. Kapalı devre HPGR akış şeması (değirmen devresi, sulu siklon ile).....	29
Şekil 24. Örnekleme noktaları (grafiksel) .....	33
Şekil 25. Örnekleme noktaları (tesis) .....	33
Şekil 26. Numune alma aparatı.....	34
Şekil 27. Numune alma aparatı kullanımı .....	34
Şekil 28. Numune alma işlemi.....	35
Şekil 29. Numune alma aparatı kullanımı ile numunenin alınması.....	36

Şekil 30. HPGR besleme numuneleri tane boyu dağılımları .....	39
Şekil 31. HPGR çıkışı numuneleri tane boyu dağılımları .....	40
Şekil 32. Elek üstü numuneleri tane boyu dağılımları.....	41
Şekil 33. Elek altı numuneleri tane boyu dağılımları .....	42
Şekil 34. HPGR devresi taze cevher besleme tane boyu dağılımı.....	45
Şekil 35. Birinci örneklemenin ölçülen ve denklik sonrası durumu.....	46
Şekil 36. Birinci örnekleme elek verim eğrisi .....	46
Şekil 37. İkinci örneklemenin ölçülen ve denklik sonrası durumu .....	47
Şekil 38. İkinci örnekleme elek verim eğrisi .....	47
Şekil 39. Üçüncü örneklemenin ölçülen ve denklik sonrası durumu .....	48
Şekil 40. Üçüncü örnekleme elek verim eğrisi.....	48
Şekil 41. Dördüncü örneklemenin ölçülen ve denklik sonrası durumu.....	49
Şekil 42. Dördüncü örnekleme elek verim eğrisi .....	49
Şekil 43. Beşinci örneklemenin ölçülen ve denklik sonrası durumu.....	50
Şekil 44. Beşinci örnekleme elek verim eğrisi .....	50
Şekil 45. Altıncı örneklemenin ölçülen ve denklik sonrası durumu.....	51
Şekil 46. Altıncı örnekleme elek verim eğrisi .....	51
Şekil 47. Yedinci örneklemenin ölçülen ve denklik sonrası durumu .....	52
Şekil 48. Yedinci örnekleme elek verim eğrisi.....	52
Şekil 49. Sekizinci örneklemenin ölçülen ve denklik sonrası durumu.....	53
Şekil 50. Sekizinci örnekleme elek verim eğrisi .....	53
Şekil 51. Dokuzuncu örneklemenin ölçülen ve denklik sonrası durumu .....	54
Şekil 52. Dokuzuncu örnekleme elek verim eğrisi.....	54
Şekil 53. Onuncu örneklemenin ölçülen ve denklik sonrası durumu .....	55
Şekil 54. Onuncu örnekleme elek verim eğrisi.....	55
Şekil 55. 3500 kN/m <sup>2</sup> öğütme basıncında güç-tonaj grafiği.....	56
Şekil 56. 3750 kN/m <sup>2</sup> öğütme basıncında güç-tonaj grafiği.....	57
Şekil 57. 4000 kN/m <sup>2</sup> öğütme basıncında güç-tonaj grafiği.....	58
Şekil 58. Öğütme basıncının HPGR besleme tonajına etkisi .....	59
Şekil 59. Öğütme basıncının elek altı (ürün) tonajına etkisi .....	60
Şekil 60. Farklı öğütme basıncında alınan ürüne ait tane boyut dağılımları .....	61

## ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 1. Taze Cevher Multi-Element Analizi .....	32
Çizelge 2. Taze Cevher Öğütme Özellikleri.....	32
Çizelge 3. Örneklemelere ait spesifik güç ve tonajları .....	38
Çizelge 4. JKSimMet hesaplarına ait spesifik güç ve tonajlar .....	43

## EKLER DİZİNİ

Ek 1. 1.Numune: 3500 kN/m <sup>2</sup> öğütme gücünde alınan numunenin elek analizi .....	68
Ek 2. 2.Numune: 3500 kN/m <sup>2</sup> öğütme gücünde alınan numunenin elek analizi .....	68
Ek 3. 3.Numune: 3500 kN/m <sup>2</sup> öğütme gücünde alınan numunenin elek analizi .....	68
Ek 4. 4.Numune: 3750 kN/m <sup>2</sup> öğütme gücünde alınan numunenin elek analizi .....	69
Ek 5. 5.Numune: 3750 kN/m <sup>2</sup> öğütme gücünde alınan numunenin elek analizi .....	69
Ek 6. 6.Numune: 3750 kN/m <sup>2</sup> öğütme gücünde alınan numunenin elek analizi .....	69
Ek 7. 7.Numune: 4000 kN/m <sup>2</sup> öğütme gücünde alınan numunenin elek analizi .....	70
Ek 8. 8.Numune: 4000 kN/m <sup>2</sup> öğütme gücünde alınan numunenin elek analizi .....	70
Ek 9. 9.Numune: 4000 kN/m <sup>2</sup> öğütme gücünde alınan numunenin elek analizi .....	71
Ek 10. 10.Numune: 4000 kN/m <sup>2</sup> öğütme gücünde alınan numunenin elek analizi .....	71
Ek 11. 3500 kN/m <sup>2</sup> öğütme gücünde yapılan çalışmaya ait saatlik ortalama çalışma verileri ....	72
Ek 12. 3750 kN/m <sup>2</sup> öğütme gücünde yapılan çalışmaya ait saatlik ortalama çalışma verileri ....	73
Ek 13. 4000 kN/m <sup>2</sup> öğütme gücünde yapılan çalışmaya ait saatlik ortalama çalışma verileri ....	74
Ek 14. Örneklere ait besleme tonajı, elek üstü tonajı, elek altı tonajına ait tablo .....	75

## SİMGELER VE KISALTMALAR

### Simgeler

kN/m <sup>2</sup>	metrekareye uygulanan kilo Newton kuvvet
kW	kilowatt
kWh	kilowatt saat
Mpa	megapascal
TPH	saatlik tonaj
bar	basınç birimi
P80	Ürünün %80 lik kısmı

### Kısaltmalar

HPGR	High Pressure Grinding Roller
YBMD	Yüksek Basıncılı Merdaneli Değirmen
Cum Pass	Kümülatif Geçen
O/S	Elek Üstü
U/S	Elek Altı
R-Speed	Merdane Hızı
D-mm	İki Merdane arası mesafe, Motor tarafı
ND-mm	İki Merdane arası mesafe, Motor karşı tarafı
Gap-mm	İki Merdane arası mesafe
PLC	Programlanabilir Lojik Kontrolör

## 1. GİRİŞ

Cevher hazırlama tesislerinde en önemli işlemlerden biri boyut küçültme prosesidir. Bu süreç tesisdeki proses verimini ve tüketilen enerji miktarını belirleyen en önemli adımlardan birisidir. Dünya üzerinde yüksek tenörlü cevherlerin azalması nedeniyle aynı miktarda metal elde etmek için daha çok malzeme öğütmek gerekmektedir. Buna bağlı olarak; daha verimli ve düşük enerji tüketimi ile öğütme yapmak giderek daha önemli hale gelmektedir. Yüksek basınçlı merdaneli değirmen (HPGR), bu alanda kanıtlanmış başarıya sahiptir [4,13,17, 18, 33, 34].

HPGR teknolojisi 1982 sonrası geliştirilmiştir ve ilk olarak çimento üretim tesislerinde öğütme devresi kapasitesini artırmak amaçlı kullanılmış olup, Çimento endüstrisinde farklı devre konfigürasyonlarındaki başarısı [1,2,4,11, 18], cevher hazırlamada da birçok tesiste kullanımını sağlamıştır [3, 5, 6, 7, 8, 14, 15, 25, 29, 30, 35].

HPGR nin cevher hazırlama alanında en yaygın kullanımı; bilyalı değirmen öncesinde ikinci kırma ürününü ince boya kırarak üçüncül kırma ve iri öğütme devrelerini ortadan kaldıracak şekilde uygulamalar bulmuştur [3, 5, 6, 7, 8, 14, 15]. Diğer kullanımı ise, yığın liçinde ince aşamasında, çok sayıda paralel konik kırıcı yerine kullanarak devreyi basitleştirmek ve yüksek basınçla sıkıştırma ile oluşan çatlaklar nedeniyle liç verimini artırmak şeklinde olmaktadır [19, 20, 21,22,23, 24, 26,27, 28].

Ülkemizde HPGR nin yığın liçinde ilk uygulaması İvrindi’de 2018 yılında 7.200.000 ton/yıl olarak devreye alınmıştır. Yapılan test çalışmalarında, HPGR kullanımıyla cevherin ince boya kırılmasıyla altın veriminin önemli oranda artacağı belirlendiğinden, üçüncül kırmada HPGR devresi tercih edilmiştir.

Bu çalışmada, cevherin birincil ve ikincil kırıcıdan sonra stoklanmış ürününün besleme olarak kullanıldığı, elekli kapalı devre çalışan HPGR kırıcı sisteminin performans parametreleri incelenmiştir.

Kullanılan HPGR 2800kN/m<sup>2</sup> ile 4500kN/m<sup>2</sup> arasında spesifik öğütme basıncı oluşturabilen bir hidrolik sisteme sahip olup, 2× 2000 kW kurulu motor gücüne sahiptir. Üçüncül kırma devresi nominalde 990 ton/saat (dizayn faktörü %20 olarak tesis edilmiştir.) kırma kapasitesine sahiptir. İki adet elekli kapalı devre çalışmaktadır.

Bu amaçla, farklı çalışma basınçlarında; HPGR devresi girişinden, çıkışından ve eleklerin girişinden, çıkışından numuneler alınarak deneysel çalışmalar yapılmıştır. Deneysel çalışmaların tamamı üretim yapmakta olan tesisten fiili alınan numuneler üzerinden yapılmıştır ve tesise ait laboratuvar kullanılarak elek analizleri yapılmıştır.

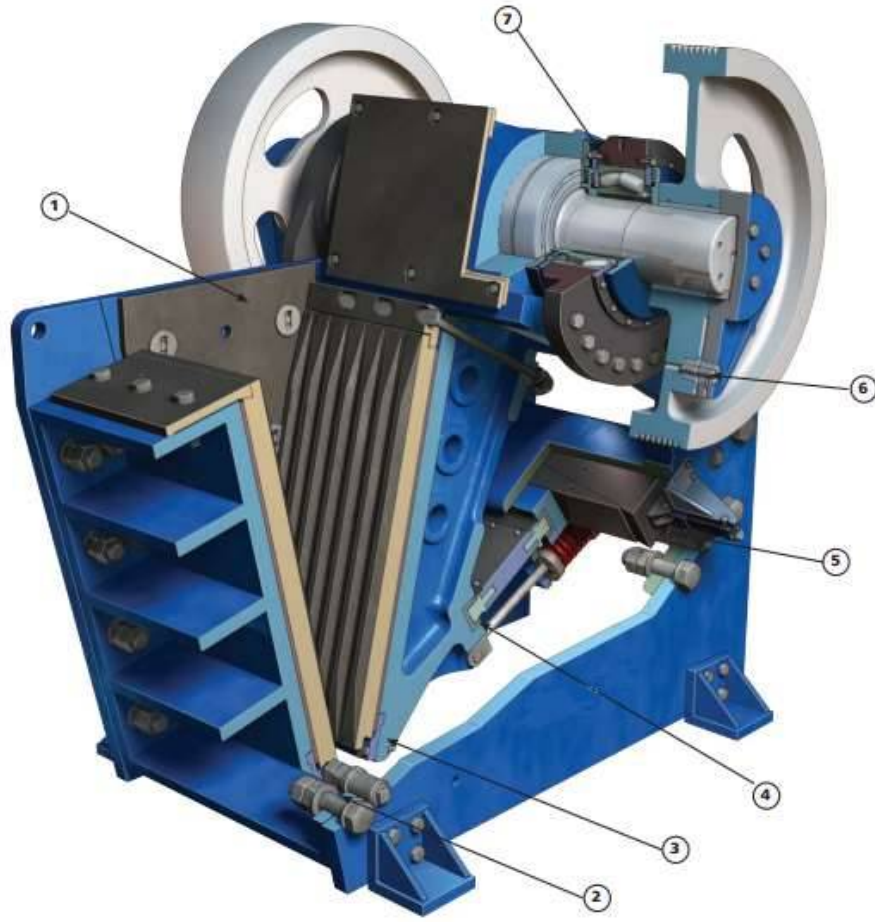
## 2. YIĞIN LIÇİNDE KULLANILAN KIRMA DEVRELERİ VE EKİPMANLARI

Boyut küçültme işlemi belirlenen proses ekipmanları ile tesiste cevherin işlenebileceği ebatlara getirilmesidir. Yıllar boyunca gelişen teknoloji ile birçok öğütme ekipmanı ortaya çıkmıştır. Bu ekipmanlar beslenecek cevherin tipi, büyüklüğü ve istenilen ürün boyutuna göre yapılan laboratuvar testleri sonucunda seçilmektedir. Seçimde bir çok parametre kullanılmaktadır. Tez konusunda yeralan metal madenciliğinde en çok kullanılan kırma-öğütme ekipmanları çeneli kırıcı, gyratory, konik kırıcı, HPGR, vibrasyonlu elekler bu bölümde açıklanmaktadır.

### 2.1. Çeneli Kırıcı

Çeneli kırıcı temel olarak biri sabit diğer hareketli iki plakadan oluşmaktadır. Hareketli parça pitman adı verilen eksantrik bir şafta bağlı olup bu yapı ivmesel bir hız kazanmasıyla sabit astarlı plaka ile hareketli astarlı plaka arasından geçen cevherin ezilerek kırılmasına dayanan bir süreç oluşturur. Malzeme çıkış büyüklüğü çeneli kırıcı alt çıkış bölgesinin açıklığının ayarlanmasıyla belirlenir. Yapısal olarak hareketi tek plaka ile sağlayan çene (single toggle) ve hareketi çift plaka ile sağlayan çene (double toggle) olarak temel olarak ikiye ayrılmaktadır. Giriş/Çıkış boyut küçültme oranı klasik olarak 5/1 yada 10/1 oranları arasındadır [9]. Büyüklüklere göre çene kapalı mesafesi 40 mm den 300mm ye kadar değişiklik göstermektedir [10]. Aşağıda Şekil 1 de bir çeneli kırıcının en temel parçaları gösterilmiştir.



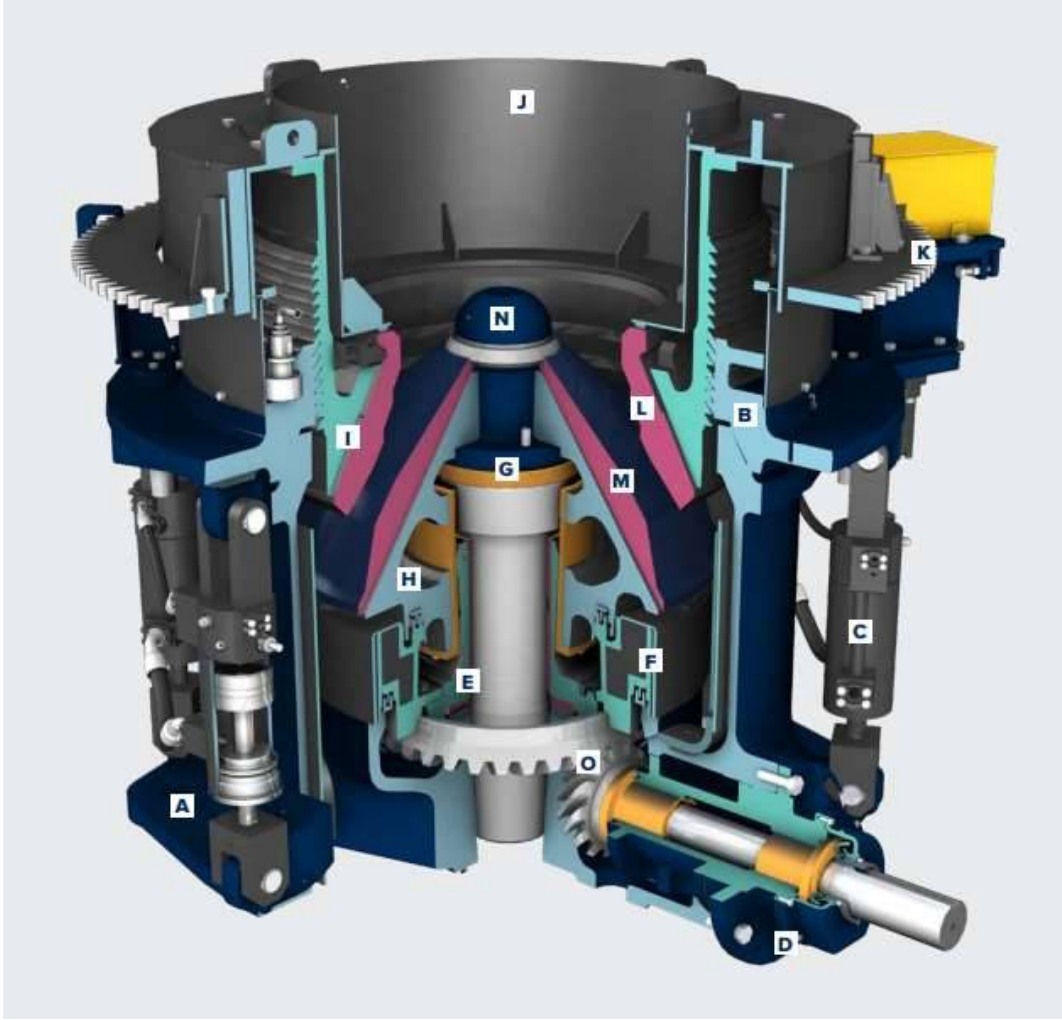


Şekil 1. Çeneli Kırıcı

1. Hareketli Çene
2. Sabit Çene
3. Pitman Gövedesi
4. Toggle
5. CSS Ayar Kamaları
6. Tahrik Volanı ve Güvenlik Pimi

## 2.2. Konik Kırıcı

Konik kırıcı çalışma prensibi kendi eksenini etrafında dönen üzeri astarlı bir mekanizma ile dışında bulunan sabit astar plakası arasında geçen malzemenin ezilerek kırılmasına dayanır. Kendi etrafında dönen kafa (head) bir eksantrik şafta bağlı olduğundan dönüşü esnasında dış astarla belirli noktalarda mesafesi artar bu sayede çeşitli büyüklüklere sahip cevherin kırılmasına olanak tanır. Ürün boyutunu kırıcı kapalı ayarı (CSS) belirler, konik kırıcı büyüklüklerine göre bu değer 8 mm ile 50 mm arasında değişiklik gösterebilir [12]. Bu ayar güncel teknolojik kırıcılarda ayar çember sistemi ile kolayca ayarlanır. Zamanla aşınan astardan dolayı konik kırıcı büyüklüğüne göre belirlenen tonaj aralıklarında kırıcı tamamen boşaltılır, temizlenir ve sonrasında kırıcı kapalı ayarı kontrol edilerek gerekiyorsa tekrar kalibre edilir. Elektronik aletlerin hatalarına karşı bu kalibrasyon kontrolü boş çalışma sırasında beslemeden atılan besleme büyüklüğüne göre belirlenmiş kurşun plakalar atılır. Kırıcı altındaki banttardan atılan bu kurşun plakalar alınarak ölçülür ve kalibrasyon doğruluğu tespit edilir. İstenilen ürün büyüklüğüne ve yapısal montaj gerekliliklerine göre normal ve kısa kafalı konik kırıcılar bulunmaktadır. Konik kırıcı cevher hazırlama tesislerinde genel olarak ikincil yada üçüncül kırıcı olarak kullanılmaktadırlar. Şekil 2 de bir konik kırıcının temel parçaları gösterilmiştir.



Şekil 2. Konik Kırıcı

- A. Ana Gövde
- B. Ayar emberi
- C. Dış Astar (Bowl) Kaldırma Sistemi
- D. Tahrik şaft mili ve dişlisi
- E. Eksantrik şaft Gövdesi
- F. Karşı Ağırlık Gövdesi
- G. İç Astar (Mantle) Bağlantı Soketi
- H. İç Astar (Mantle) Bağlantı Kafası
- I. Dış Astar (Bowl) Gövdesi

- J. Üst Bunker
- K. Ayar Çemberi Mekanizması
- L. Dış Astar
- M. İç Astar
- N. Besleme Plaka Gövdesi
- O. Dişli ve Pinyon

### 2.3. Dönel Kırıcı (Gyratory)

Bu kırıcılar konik kırıcıların çalışma prensibine bire bir benzemektedir. En büyük fark konik kırıcılarda besleme cevher maksimum tane boyutu 200-250mm olabilirken gyratory kırıcılarda 1380mm tane boyutuna kadar cevherler kırılabilmektedir. Buda yüksek tonajlı (>5000 ton/saat) kırma devrelerinde büyük bir avantaj sağlamaktadır [16].



Şekil 3. Dönel Kırıcı (Gyratory)

## 2.4. Vibrasyonlu Elekler

Vibrasyonlu elekler kırma eleme devrelerinde istenilen ürün boyutunu elde etmek amacıyla genel olarak kırıcı ekipmanlarıyla beraber kullanılmaktadır. Yapısal olarak düz ve muz tipi gövdeler kullanılmakta olup sınıflandırma için tek katlı elek yüzeyi yada çok katlı elek yüzeyleri kullanılmaktadır. Elek medyası cevher tipine göre değişiklik gösterir; bunlar kauçuk, poliüretan, çelik tel..vb ham maddelerden imal edilirler. Vibrasyonlu elekler genel olarak kırma devrelerinde kapalı devre olarak çalıştırılmaktadırlar, elek altı ürün sistemden alınırken elek üstü ürün tekrar boyut küçültülmesi için devreye dönmektedir.



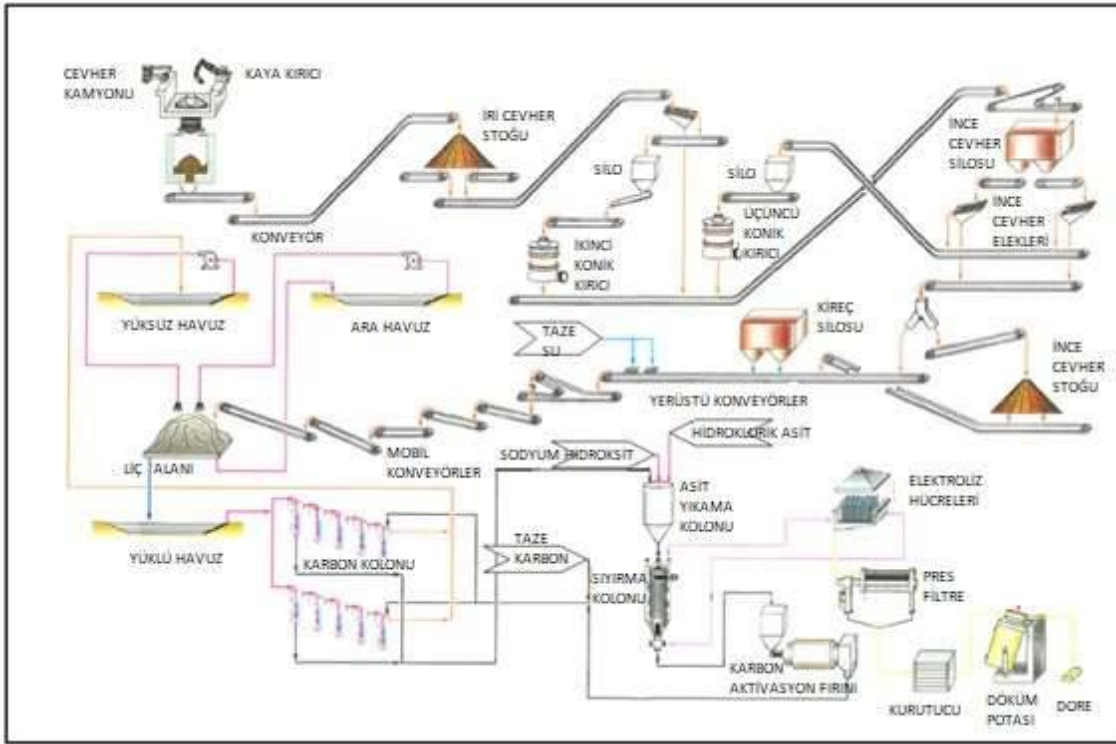
**Şekil 4.** Vibrasyonlu Elek

## 2.5. Yiğın Liçinde Kullanılan Kıırma Eleme Devreleri

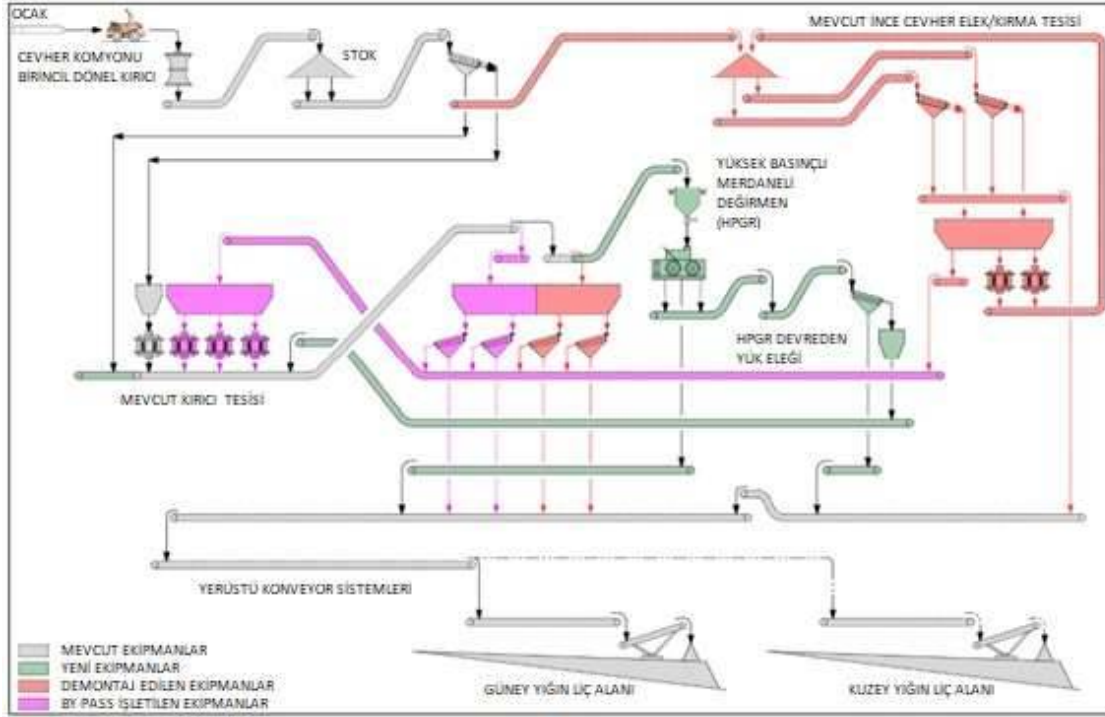
Dünyada, yiğın liçinde kullanılan geleneksel devre tasarımları 2 yada 3 aşamalı boyut küçültme devreleridir. Bu devrelerde final ürün P80 boyutu geleneksel olarak 4-12mm arasında olmaktadır, cevher leach verimine göre bazı yiğın liçi çalışmalarında tane boyutu 50 mm değere kadar ulaşabilmektedir. Türkiye de bulunan yiğın liçi kırma eleme devreleri ve dünyadan örnekler aşağıda tanıtılmıştır.

### 2.5.1. Tüprag Kışladağ Altın Madeni

Bu yiğın liçi kırma eleme devresinde 3 aşamalı boyutlandırma yapılmıştır. Ocaklardan çıkartılan cevher öncelikle birincil kırıcı olarak kullanılan bir gyratory kırıcıya beslenmiştir. Biricil kırıcı çıkışı stoklanmış ve sonrasında ikincil kırıcı, üçüncül kırıcı ve vibrasyonlu elekler ile bir kapalı devre oluşturularak final ürün elde edilmiştir. Final ürün P80 tane boyutu 6.3mm dir [31]. Tesis kapasitesi kuruluşunun ilk 2 yılında 5.000.000 kuru ton/yıl iken sonrasında 10.000.000 kuru ton/yıl 'a yükseltilmiştir. İleriki yıllarda verimi artırmak amaçlı çalışmalar yapılmış [32] ve 2021 yılında üçüncül kırıcı olarak HPGR sisteme entegre edilmiş ve 2022 yılında devreye alınmıştır. HPGR içeren kırma eleme devresi Şekil 6 de gösterilmiştir.



Şekil 5. Tüprag Kışladağ altın madeni akış şeması

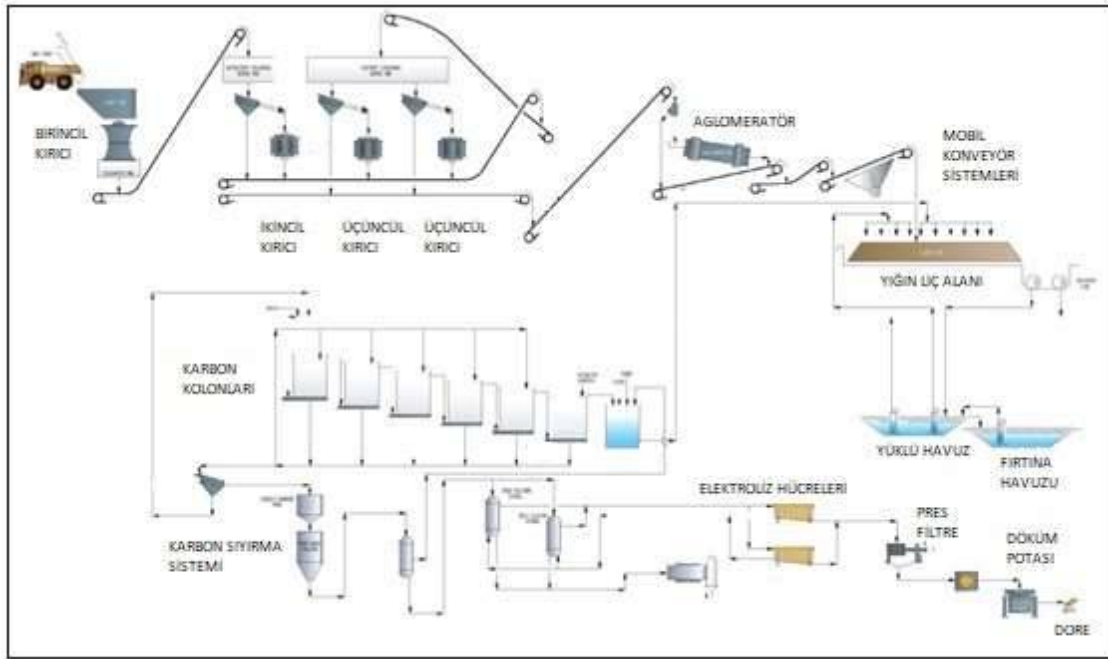


**Şekil 6.** Tüprağ Kışladağ altın madeni akış şeması (kapasite artışı sonrası)

Yeni yapılan üçüncül kırıcı devresi ile yüksek miktarda ince taneli ürün elde edilmiştir. Yüksek miktardaki ince tane boyutlu ürünün yığın liçinde hem operasyon hem solüsyon nüfuziyetini artırmak amaçlı 2022 yılında aglomerasyon ünitesi yatırımına başlanmış olup 2023 yılında devreye alınmıştır.

## 2.5.2. Anagold Çöpler Altın Madeni

Bu yığın liçi kırma eleme devresinde 3 aşamalı boyutlandırma yapılmıştır. Ocaklardan çıkartılan cevher öncelikle birincil kırıcı olarak kullanılan bir gyratory kırıcıya beslenmiştir. Biricil kırıcı çıkışı vibrasyonlu eleğe beslenerek üst akımı ikincil konik kırıcıya beslenmiş alt akımı ise ikincil kırıcı ürünü ile birleşerek elekler ile kapalı devre tasarlanan üçüncül konik kırıcılara verilmiştir. Final ürün P80 tane boyutu 12.5 mm dir [36]. Ürün yığın liçine serilmeden önce çimento ve kireç gibi katkıları kullanılarak aglomeratörden geçirilmiştir. Tesis kapasitesi yıllık olarak 6.000.000 ton olarak dizayn edilmiştir.

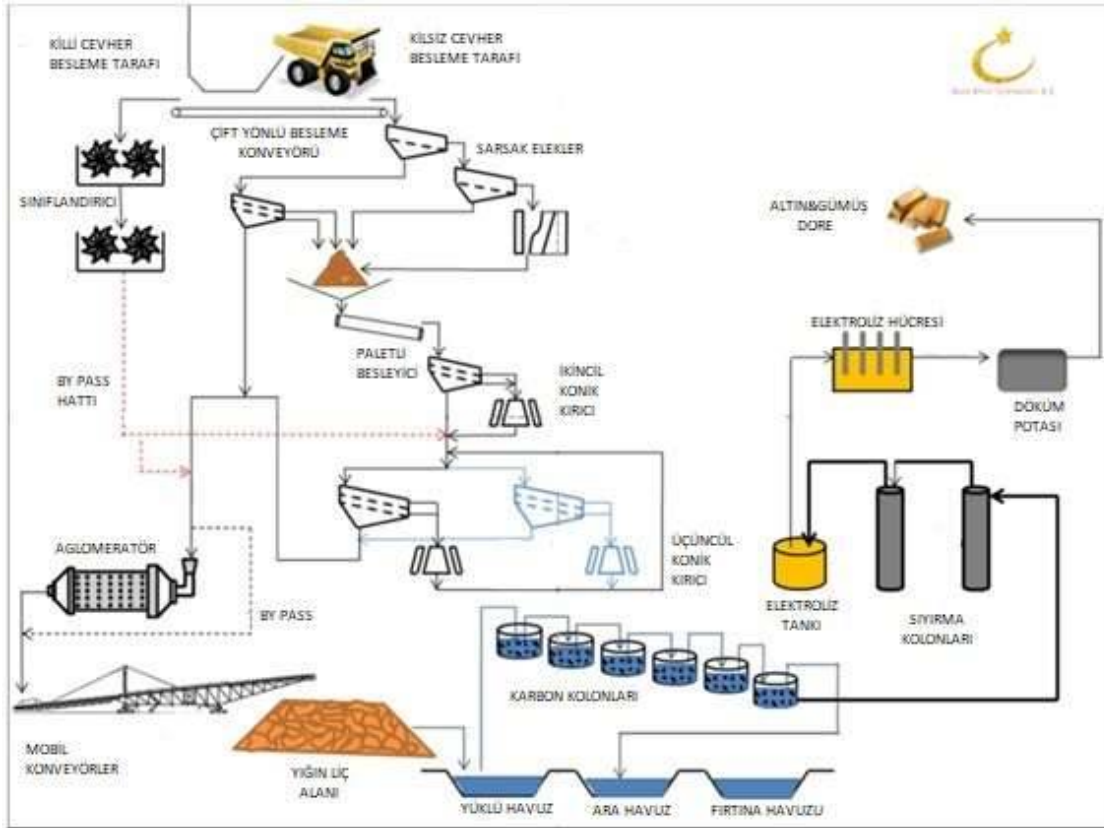


Şekil 7. Anagold Çöpler altın madeni akış şeması



### 2.5.3. Koza Madencilik Himmetdede Altın Madeni

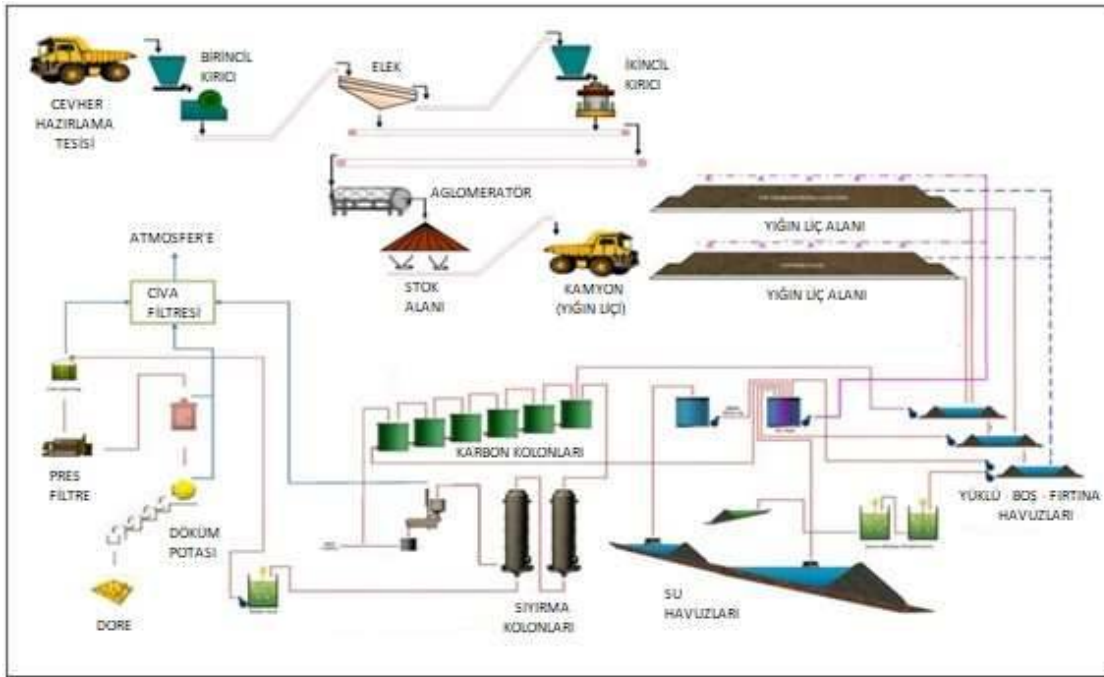
Bu yığın liçi kırma eleme devresinde 3 aşamalı boyutlandırma yapılmıştır. Ocaklardan çıkartılan cevher öncelikle bir elekten geçirilerek birincil kırıcı öncesinde boyutlandırılmış üst akımı çeneli kırıcıya beslenmiş alt akımı tekrar bir vibrasyonlu eleğe beslenmiştir. Bu eleğin üst akımı öncelikle stoklanmış, stok sonrası bir elekten geçirilerek elek üst akımı ikincil olarak kullanılan konik kırıcıya verilmiştir. Elek altı ve ikincil konik kırıcı çıkışı bir elek ile kapalı devre olarak çalışan üçüncül kırıcı devresine beslenilmiştir. Final ürün P80 tane boyutu 9.5 mm dir [37]. Ocakta 3 tip cevher ve tane boyutuna göre altın kazanımları farklı olduğundan 2 tip cevher tipi için tane boyutu -50mm olarak sınıflandırılmış ve yığın liçine serilmiştir. Ürün yığın liçine serilmeden önce çimento ve kireç gibi katkıları kullanılarak aglomeratörden geçirilmiştir. Tesis kapasitesi 1100 ton/saat cevher kırma kapasitesine yıllar içinde artırım projeleri ile ulaşmıştır.



Şekil 8. Koza Madencilik Himmetdede altın madeni akış şeması

## 2.5.4. PT Merdeka Copper Gold Tbk. Altın Madeni

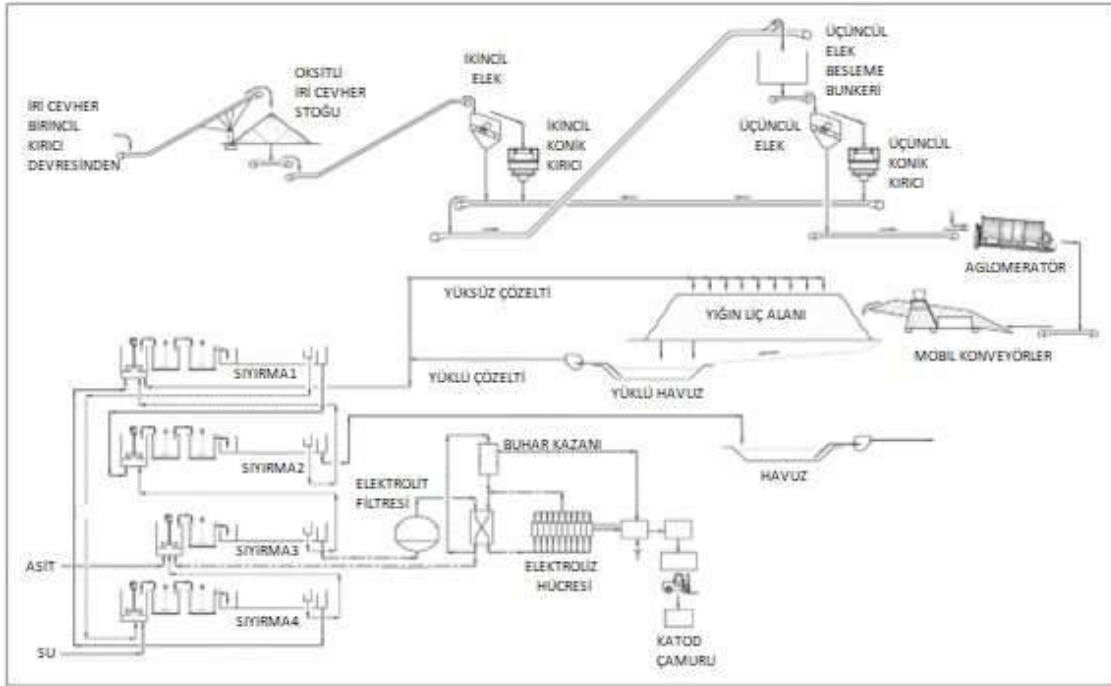
Bu yığın liçi projesi Endonezya ülkesinde Banyuwangi şehrinde kurulmuştur ve kırma eleme devresinde 2 aşamalı boyutlandırma yapılmıştır. Ocaklardan çıkartılan cevher öncelikle birincil kırıcı olarak kullanılan bir gyratory kırıcıya beslenmiştir. Birincil kırıcı çıkışı bir elek ile kapalı devre çalışan konik kırıcı devresine beslenmiştir [38]. Final ürün P80 tane boyutu 6-12 mm olduğu düşünülmektedir. Ürün yığın liçine serilmeden önce çimento ve kireç gibi katkıları kullanılarak aglomeratörden geçirilmiştir. 50 x 70 metre lik bir yığın liçine 10 metre yığın yüksekliğinde serilmiştir. Tesis kapasitesi yıllık olarak 4.000.000 ton olarak dizayn edilmiştir.



Şekil 9. PT Merdeka Copper Gold Tbk. altın madeni akış şeması

### 2.5.5. St. Augustine Gold & Copper King-king Copper-Gold Altın Madeni

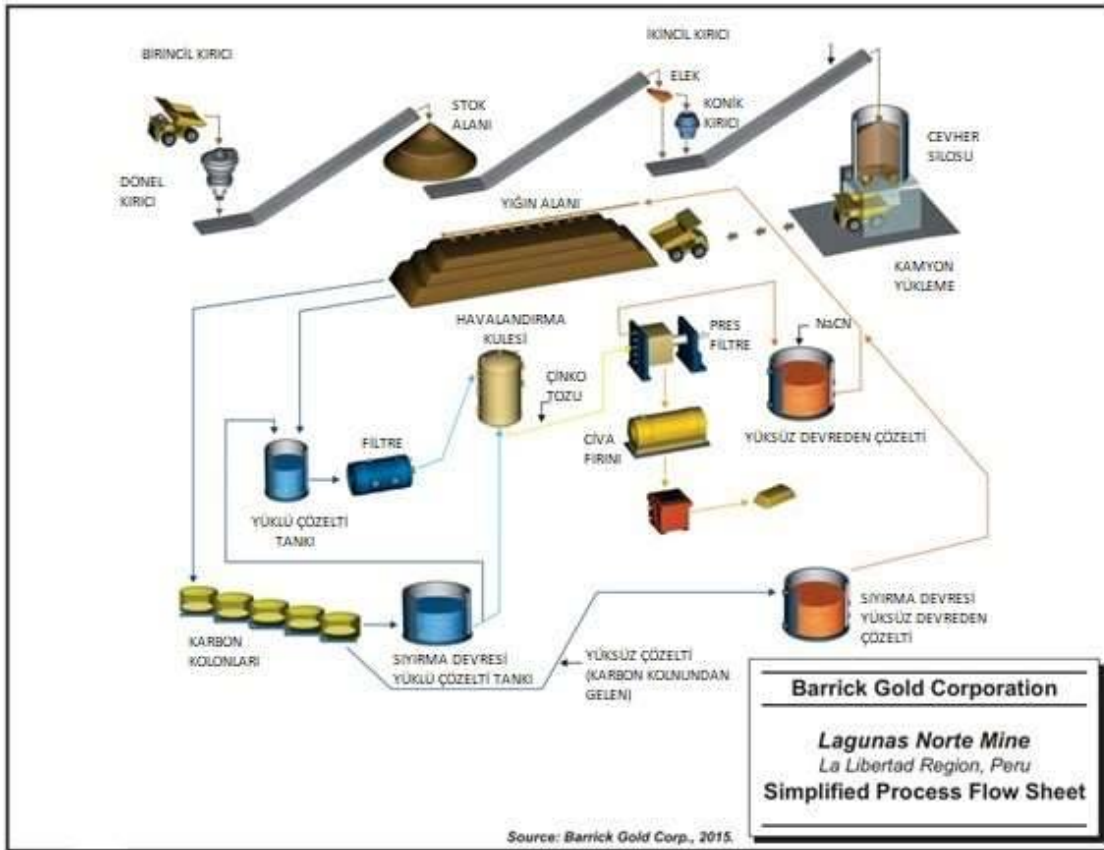
Bu yığın liçi projesi Filipin ülkesinde Davao şehrinde kurulmuştur ve kırma eleme devresinde 2 aşamalı boyutlandırma yapılmıştır. Ocaklardan çıkartılan cevher öncelikle bir elekten geçirilerek üst akım bir konik kırıcıyı beslemektedir, sonrasında elde edilen ara ürün bir elek ile kapalı devre çalışan ikinci konik kırıcıya verilerek P80 -20mm ürün elde edilmektedir. Bu ürün yığın liçine serilmeden önce ton başına 12.8 kg sülfirik asit ilave edilmektedir, ayrıca nem oranını %8'e getirmek için su ilave edilerek bir aglomerasyon tamburundan geçirilmekte ve yığın liçine serilmek üzere sevk edilmektedir. Tesiste iki farklı proses vardır, toplamda günlük 60.000 ton cevher işlenirken yıllık toplam 21.900.000 ton cevher işleme kapasitesine ulaşmaktadır [39].



Şekil 10. King-king Copper-Gold altın madeni akış şeması

## 2.5.6. Barrick Gold Corp. Lagunas Norte Mine Altın Madeni

Bu yığın liçi projesi Peru ülkesinde Trujillo şehri yakınlarında kurulmuştur ve kırma eleme devresinde 2 aşamalı boyutlandırma yapılmıştır. . Ocaklardan çıkartılan cevher öncelikle birincil kırıcı olarak kullanılan bir gyratory kırıcıya beslenmiştir. Ara ürün bir stok alanına alınmış sonrasında bu stok alanından alınana ara cevher bir elek ile açık devre çalışan bir konik kırıcıya beslenmiştir. Elek altı direk yığına sevk edilirken elek üstü ürün konik kırıcıya beslenmiştir. Final ürün P80 yaklaşık 50mm tane boyutundadır. Bu proseste aglomeratör kullanılmamaktadır, yığın liçine sevk için geleneksel mobil konveyörler yerine kamyon kullanılmıştır. Ve yığın liçinde 10 metre yüksekliğinde yığınlar oluşturulmaktadır [41]. Tesis günlük tonajı 42.000 ton olarak dizayn edilsede 63.000 ton günlük tonaja ulaşabilmesi iznine sahiptir.

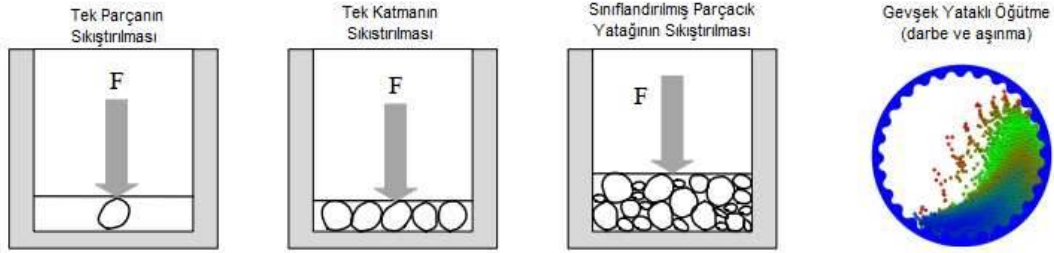


Şekil 11. Lagunas Norte Mine altın madeni akış şeması

### 3. HPGR ve HPGR İÇEREN ÖĞÜTME DEVRELERİ

#### 3.1. HPGR

HPGR ekipman çalışma mantığını ilk olarak 1970'lerde Schönert tanıtmıştır [40]. Yaptığı çalışmalar ile 1982 yılında 50MPa basınçla öğütme üzerine bir patent alınmıştır ve 1985 yılında ilk ticari HPGR kurulumu Almanya'nın Dortmund şehrinde Cemex çimento fabrikasında kurulmuştur [42]. Çalışmalarında bir parçanın yavaş bir şekilde ezerek kırmanın çok yüksek bir enerji tüketimine neden olduğunu sonucunu çıkarmış ve çalışmalarına parçalar arası temasla kırılmaları olgusu üzerine devam etmiş, bu deneysel çalışmasında parçacıklardan oluşan bir yatağı bir piston yardımı ile sıkıştırarak sonuçlarını analiz etmiştir. Sonuç olarak parçacıklardan oluşan yatağın kırılması tek parçanın kırılmasına göre çok daha az enerji tükettiğini tespit etmiştir [43, 44, 45].



**Şekil 12.** Parça ve katmanların sıkıştırılma, öğütme mekanizması

1977 yılında patentini aldıktan sonra iki Alman firması olan Thyssenkrupp ve KHD ile endüstriyel HPGR imalatı için lisans anlaşması yapmıştır. HPGR üretim prosesi astar ömrü ve merdane üretimi aşamalarının zorluğunu göstermiş, bunu çözmek için daha önce briket prosesinde deneyimi olan başka bir Alman firması Köppern'nin deneyimlerinden faydalanılmıştır.

HPGR ilk olarak 1980'lerin ortasında çimento sektöründe kullanılmaya başlanmıştır. Bu sektörde genellikle bilyalı değirmen öncesinde ön ezici olarak kullanılmıştır. Başlarda yüksek kapasite amaçlı kullanılsalarda bu süreçte %10 ile %30 arasında bir enerji verimliliği rapor edilmiştir [46].

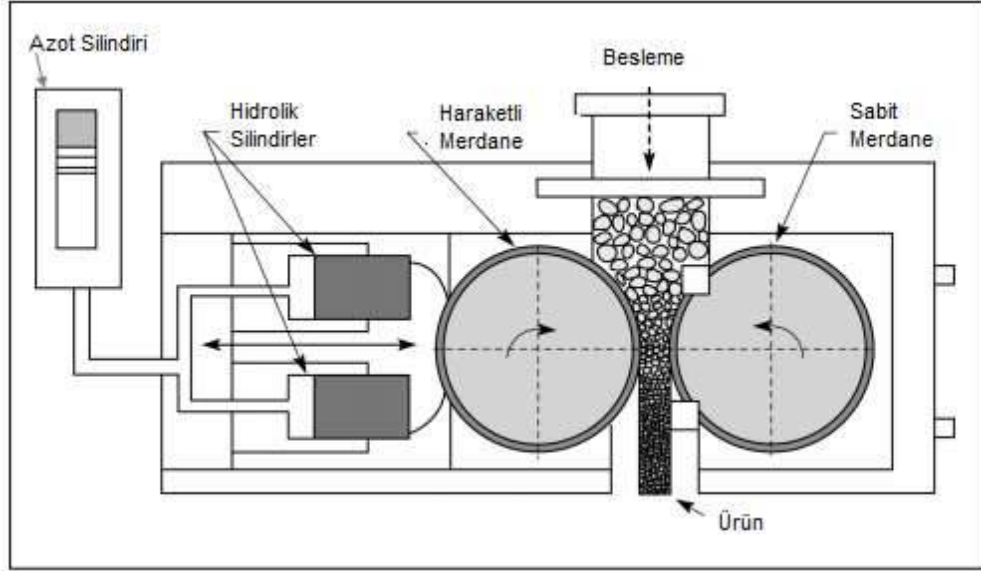
Çimento sektöründe geçen 10 yıl süre boyunca belirlenmiş bir standart üretim dizaynına ulaşılmış, ve geliştirilen akım şemaları ile kapalı devre olarak konfigüre edilebilmektedirler.

HPGR çimento sektöründeki başarısına rağmen 1985-1990 yılları arasında cevher işleme alanında daha yavaş kabul görmüştür. 1987 yılında Güney Afrika'daki Premier Elmas madenine De Beers firması tarafından kurulan HPGR ile kimberlit cevheri kırılmış ve sonuçları analiz edildiğinde daha hassas mikro çatlakların oluştuğu, elmasın serbestleşme sırasında hasar almadığı ve enerji tüketimini düşürdüğü görülmüştür [46]. Bu avantajlar görüldüğünde HPGR teknolojisinin geliştirme çalışmalarına devam edilmiş standart astar yerine çivili astar yapıları geliştirilerek astar aşınma ömrü artırılmıştır. Astar ömründeki bu artışla elmas madenlerinde lamproit gibi daha sert madenlerin kırılmasına öncülük etmiştir.

Elmas sektöründeki başarısından sonra 1990'lı yıllarda demir cevheri ile yaygınlaşmaya başlamış 2000'li yıllarda bakır ve altın gibi çok daha sert cevherlerde kullanılmaya başlamıştır [4, 7, 8, 14, 16, 20, 21, 23, 25, 26, 29, 33, 34].

### 3.1.1. HPGR Teknolojisi

En temel anlamda karşılıklı dönen iki silindirin arasında cevherin geçirilmesi ile yapılan öğütmedir. Burada cevher iki silindirin arasını yer çekimi etkisiyle hızlı dolduracak şekilde bir besleme sistemi dizayn edilmelidir, silindirlerden biri sabit diğeri hareketli olup bu ani besleme ile silindirlere temas eden cevher bir karşı basınç oluşturur. Bu etki ile hareketli merdane bir miktar geriye gider sonrasında iki veya dört adet hidrolik silindir yardımıyla öğütme basıncı oluşturulur. Cevherin geçiş evrelerinde önce giriş katmanı oluşur, burada kaba cevher parçalarının arasına ince cevher parçaları girerek bir tabaka oluşturur, sonrasında öğütme işleminin yapıldığı silindirlerin birbirine en yakın olduğu öğütme bölgesinde geçer, bu bölgedeki basınç ile sıkışmış cevher adeta bir kek parçasına dönüşür. Sisteme ait yapı Şekil 13 de gösterilmiştir [47].



Şekil 13. HPGR' ait ana parçalar

Yapısal olarak bir HPGR şu ana bölümlerden oluşur;

- Biri sabit diğeri hareketli iki adet merdane
- Merdanelerin montaj edildiği ana gövde
- Merdaneleri tahrik eden 2 adet dişli kutusu
- Dişli kutularını tahrik eden 2 adet elektrik motoru
- Öğütme basıncını sağlayan hidrolik silindirler
- Hidrolik silindirlere güç veren bir basınç pompa sistemi
- Darbe emilimi sağlamak amaçlı azot silindir sistemi
- Hızlı beslemenin yapıldığı ön bunker
- Astar değişimi için bakım platformu

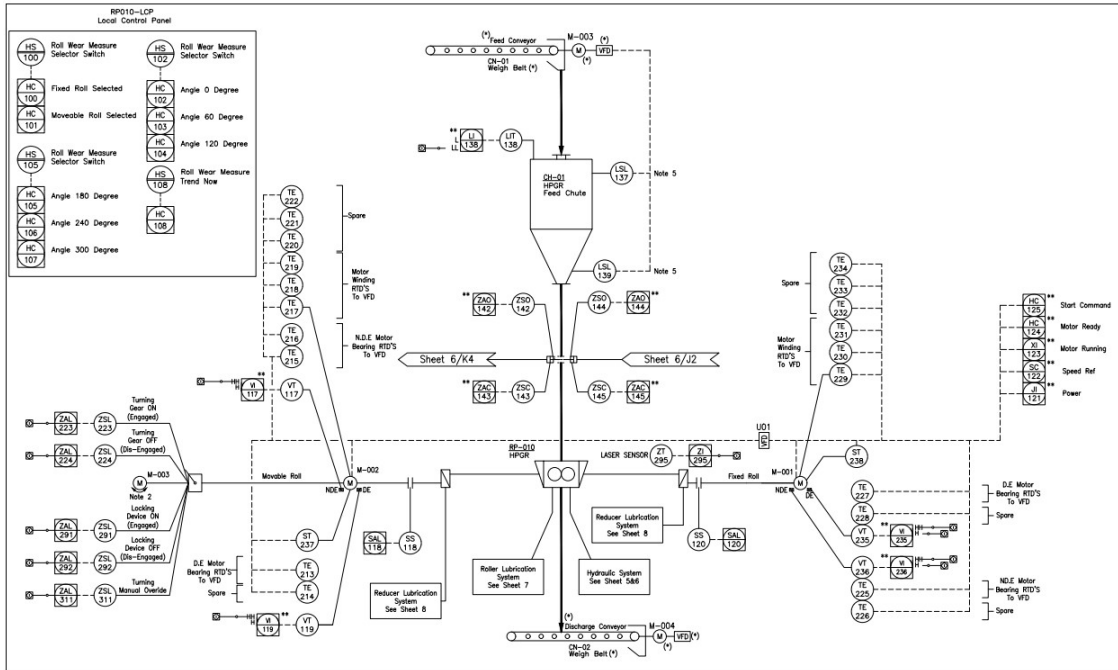


**Şekil 14.** HPGR genel görüşünü

HPGR çalışma filozofisi; ilk olarak ekipman yağlama sistemleri çalıştırılır, yağ akışları ve yatak sıcaklıkları uygun değerlere ulaştığında ana tahrik motorları devreye alınır, başlangıç hızı değişkenlik gösterebilir. Sistem dönmeye başladığında hidrolik sistem basınçlandırılır ve merdanelerin başlangıç pozisyonuna geldiği gözlemlenir. Ön basınçlandırma öğütme basıncının %50 ile %75'i arasında olmalıdır ve cevher tipi ile tonaja göre devreye alma çalışmalarında net olarak belirlenmelidir. Ön basınçlandırmanın ana nedeni cevher beslemeye başladığında cevherin merdanelere çarpması sonucu bir karşı basınç oluşturmasıdır, eğer öğütme basınç ile ilk besleme yapılır ise bu çarpmanın etkisi ile oluşan karşı basınç hidrolik sistem güvenlik basıncına ulaşma ihtimali getirerek tüm sistemi devreden çıkarır. Ön basınçlandırma sonrası cevher beslemesi yapılır, cevherin merdanelere teması sonucu oluşan toplam basınç set edilen öğütme basıncına ulaşır ve devamlı öğütme döngüsüne başlar. Bu döngüde set edilen öğütme basıncının  $\pm 10$  bar seviyesinde tutmaya çalışan bir hidrolik güç ünitesi bulunmaktadır. Basınç düşerse pompalar ile yükseltilir, basınç artar ise boşaltma valfleri ile düşürülür. (Bu çalışma filozofisi yüksek lisans çalışması için kullanılan HPGR talimatlarının yorumlanması ile tarafımdan oluşturulmuştur.)



Sistem devrede iken en çok karşılaşılan operasyonel sıkıntı merdanelerin paralel duruşunun bozulmasıdır, bu kayma olayı ana yapının gerilmesine ve kalıcı hasarlara yol açmasına neden olabilir. Bunu engellemek için çalışma filozofisinde iki seçenek bulunmaktadır. Birincisi kaymanın hesaplanmasından sonra geride kalan tarafı hidrolik gücü artırarak ileri gitmesinin sağlanması, ikinci yöntem ise hesaplanan kayma limitinde önde olan tarafın boşaltma valfini kullanarak bir miktar geriye çekilmesidir. Bu filozofiyi prosesin ve cevherin tipine göre HPGR dizayn ekipleri belirlemektedir. Şekil 15 de bir HPGR üzerinde bulunan sensör yapısı gösterilmektedir.



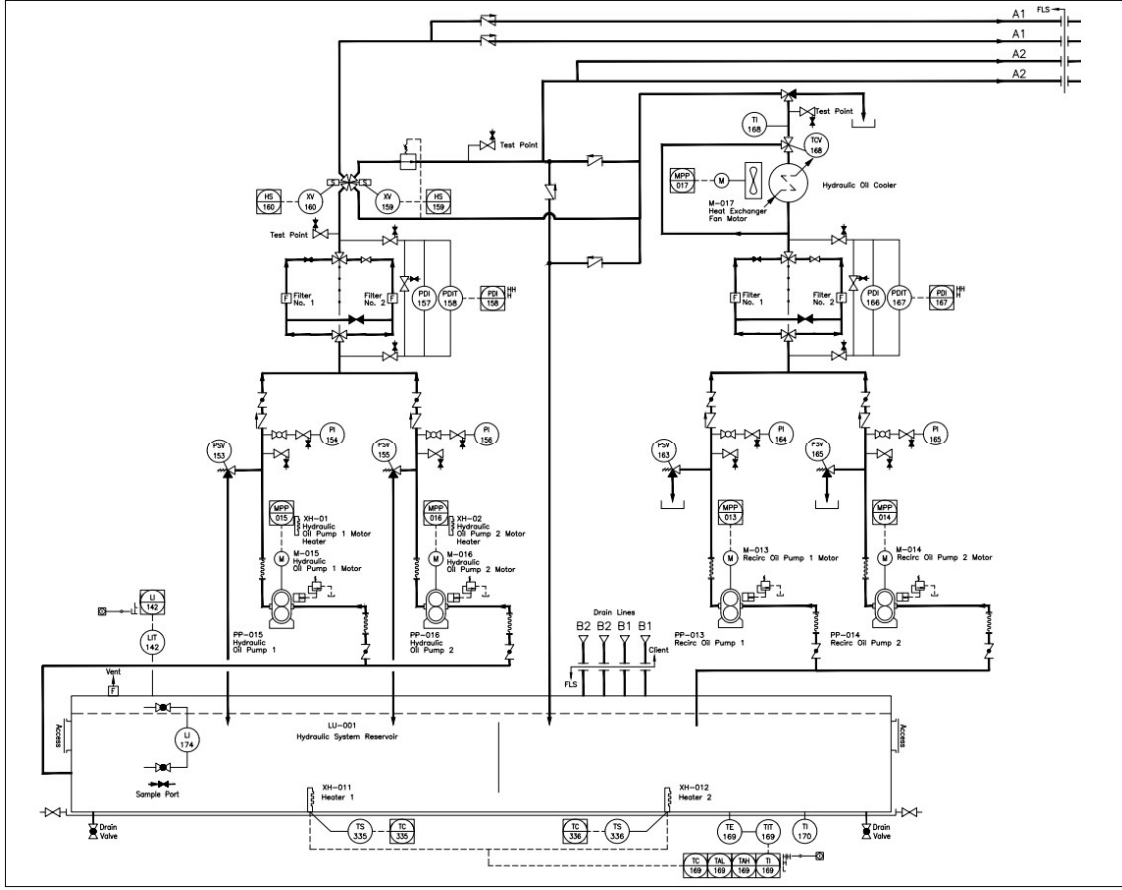
Şekil 15. HPGR temel P&ID şeması

Şekil 15 de gösterilen P&ID şemasında sistemin çalışması için gerekli ekipman ve sensörler gösterilmiştir. Aşağıdan yukarı doğru şemada gösterilen ekipman ve sensörler şunlardır;

Ürün çıkışı için bir konveyör bant ve tartım sistemi kullanılmıştır. HPGR merdanelerinde öğütme basıncını oluşturmak için bir hidrolik sistem ve bu sisteme ait basınç, sıcaklık, seviye, mesafe sensörleri uygun yerlere montajlanmıştır. Aşırı basıncı engellemek amaçlı basınç limit anahtarı hat üzerine konulmuştur. Merdanelerin yataklaması amaçlı kullanılan rulmanların yağlanması için

gerekli basınç, akış ve sıcaklık sensörleri ihtiva eden bir yağlama sistemi kullanılmıştır. Merdaneleri tahrik edebilmek için bir motor-dışli kutusu çifti kullanılmış ve bu ekipmanların üzerine sıcaklık, devir bilgisi, tork metre, güç analizörü montaj edilmiştir. Merdanelerin hızını ayarlayarak tonajı kontrol edebilmek için bu tahrik motorlarına frekans invertörü bağlanmıştır. HPGR ekipmanı şok besleme ile start edildiğinden bunu sağlamak amaçlı bir adet hidrolik tahrikli giyotin bıçaklı klape konuşlandırılmış, konumunu izlemek amaçlı açık ve kapalı sensörler takılmıştır. Beslemenin stabil yapılabilmesi için giyotin klapenin üzerine bir şut konulmuş ve bu şut içindeki malzeme seviyesinin devamlı izlenebilmesi için bir adet seviye ölçer konulmuştur. Şut içindeki malzemenin stabil seviyede kalması için bu şutu besleyecek devir ayarlı bir besleme bandı seviye sensöründen gelen bilgiye göre hızını ayarlarak bu şutu beslemesi için kullanılmıştır. Malzemenin tamamen bitmesi yada şutun tamamen dolmasını önlemek amaçlı limit seviye anahtarları konulmuştur.

Bu sensörlerden edinilen bilgilerin otomasyon sistemine bağlandığı ve limit değerlerin bu sistemden konfigüre edildiği gösterilmiştir. Ayrıca sistemi lokal olarak yerinde çalıştırıp durdurabilmek amaçlı bir kontrol kutusu ve butonların ekipman yakınına montajlamak gerektiği gösterilmiştir.



Şekil 16. HPGR hidrolik devre şeması

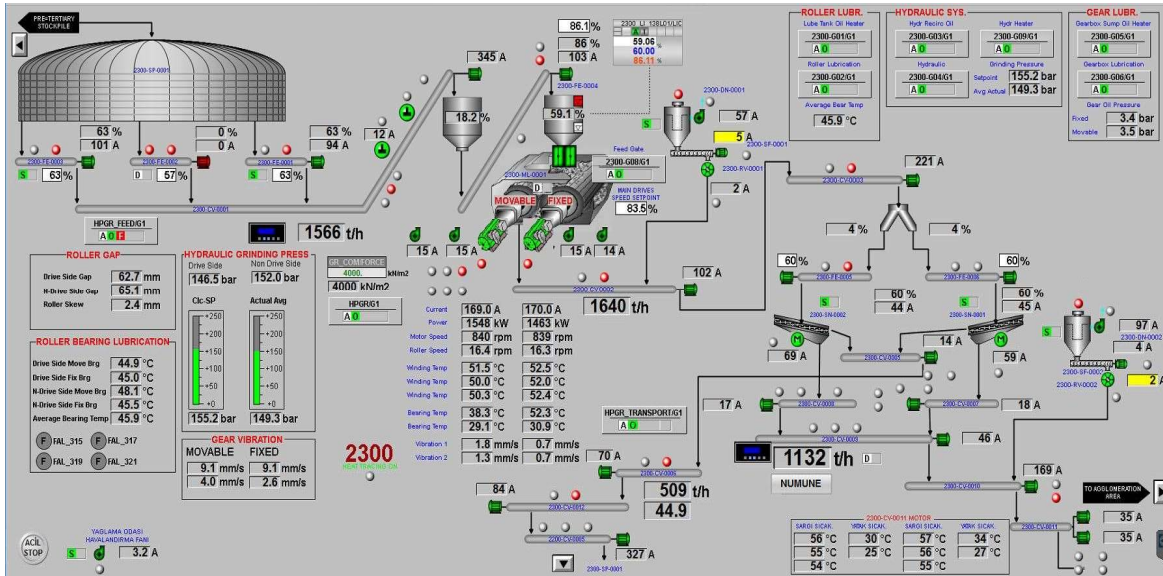
HPGR merdanelerinde öğütme basıncı için kullanılan hidrolik güç ünitesine ait şema Şekil 16 da gösterilmektedir. Bir merdane sabit yataklanmış ve diğer merdanede hareketli yataklama sistemi kullanılmış olup burada oluşturulan hidrolik kuvvet ile hareketli merdane sabit merdaneye doğru itilmek sureti ile öğütme basıncı oluşturulmaktadır. Bu hareketli merdanenin sağ ve sol tarafına ikişer adet hidrolik silindir konularak toplamda dört adet hidrolik silindir ile merdane üzerine basınç aktarılmıştır. Basınç oluşturmak amaçlı bir ana ve bir yedek hidrolik basınç pompası kullanılmıştır, pompadan çıkan yağ filtrelenmesi için yedekli filtre sisteminden geçirilmiş sonrasında yağın hidrolik pistonlara yönlendirilmesi sağlamak amaçlı yüksek basınçlı elektrikli vanalar kullanılmıştır. Hattın başında ve sonunda hidrolik yağ basıncı ölçümü için basınç ölçüm sensörleri takılmıştır. Sistemin sağlıklı çalışması tank üzerine yerleştirilen sıcaklık ve seviye sensörleri ile sağlanmıştır. Doğru yağ sıcaklığında çalışabilmesi için iki takım ısıtıcı ve iki set fanlı radyatör soğutucu tank üzerine yerleştirilmiştir. Yüksek basıncı engellemek amaçlı hattın başına

ve sonuna basınç emniyet vanası takılmış ve bu vanaların çıkışları tekrar tanka yönlendirilmiştir. Tüm yedek pompaların hızlı devreye alınmasını sağlamak üzere her pompanın çıkışına birer adet çekvalf vana montaj edilmiştir.

Hidrolik güç ünitesine ait sensör verileri otomasyon sistemine bağlanmış, operatörün belirlediği spesifik öğütme basıncını üretmek amaçlı girilen parametrelere göre bu otomasyon sistemi pompa ve vanaları kontrol etmek suretiyle istenilen aralıktaki basıncı sağlamaktadır. Ayrıca filtre gibi ekipmanların üzerine takılan filtre basınç anahtarları ile bakım gereklilikleri kontrol edilmektedir.

Güvenlik ve kontrol amaçlı her ekipmanın yanına birer adet kontrol ve kumanda panosu yerleştirilmiştir.

HPGR filozofisinin kompleks yapısından dolayı bu sistemler yüksek donanımlı PLC sistemleri ile kontrol edilmektedir. Bu çalışmada kullanılan sisteme ait işletme ekran çıktısı Şekil 17 de gösterilmektedir.



Şekil 17. HPGR işletme ekran görüntüsü (Tümad Madencilik, İvrindi, 2019)

İşletme operatörü bu ekran üzerinden tüm HPGR öğütme devresini kontrol etmektedir. Çalışma talimatlarına göre sırasıyla önce nakil bantlarını sonra HPGR ekipmanını devreye almakta ve stabil hıza ulaştığında besleme sistemini aktive etmektedir. PLC sistemi ile kontrol edilen HPGR sıcaklık, vibrasyon, basınç, güç, merdane kayma mesafesi, ekipmanların sıralı çalışma şartlarını sürekli olarak izlemekte ve parametrelerden biri dahi limiti aşarsa sistemi direkt olarak durdurmaktadır. Operatör tüm sistemi hedeflenen tonaj ve spesifik öğütme basıncı parametrelerine göre çalıştırmaktadır.

Öğütmenin yapıldığı merdaneler metal madenciliğinde çiviler ile donatılmıştır. Bu çivilerin şekilleri ve yerleşim paternleri çok önemlidir. En çok kullanılan iki çivi tipi sırasıyla yuvarlak ve altıgendir. Bu çivi paterninin önemi arasında oluşturacağı öğütme tabakasıdır. Eğer bu öğütme tabakası sağlanamaz ise astar aşınmaları çok artar ve ekonomik olarak tercih edilmesini engelleyecektir. Oluşması gereken tabakaya ait örnek Şekil 18 de gösterilmiştir.



**Şekil 18.** HPGR öğütücü merdane yüzey görüntüsü

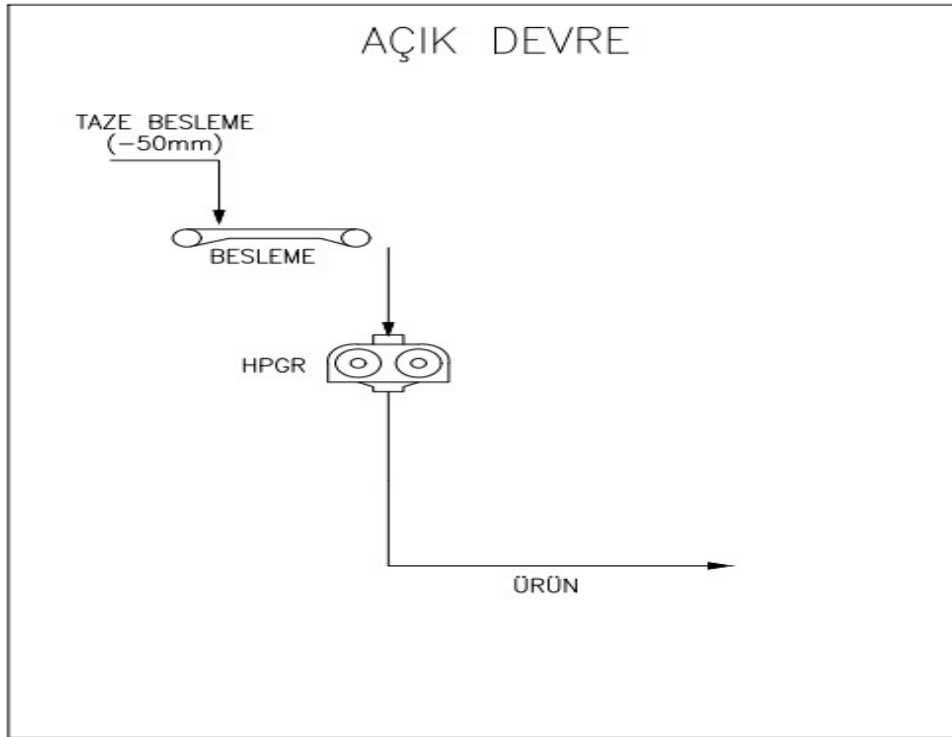
Öğütmedeki bir diğer etken ise merdaneler kenarında bulunan kenar plakalarıdır. Yapılan çalışmalarda HPGR öğütmesinin en iyi olduğu bölgenin merdanelerin ortaları olduğu ve kenarlara

doğru öğütmenin azaldığı gözlemlenmiştir. Buna “kenar etkisi” denilmektedir. Kenar plakalarının dizaynı ve malzeme seçimi ile bu etki firmalar tarafından minimum düzeye indirilmeye çalışılmaktadır. Son yıllarda bu etkiyi daha da azaltmak için merdanelerinin kenar aşınmaz plakalarını uzatmak yoluyla arada oluşacak yatağın daha dengeli olmasını sağlamak ve aynı zamanda öğütme veriminin artışından dolayı devreden yükün düşürülerek enerji tasarrufu sağlanması amaçlanmıştır.

### 3.2. Endüstride Kullanılan HPGR Devreleri

#### 3.2.1. Açık HPGR Devresi

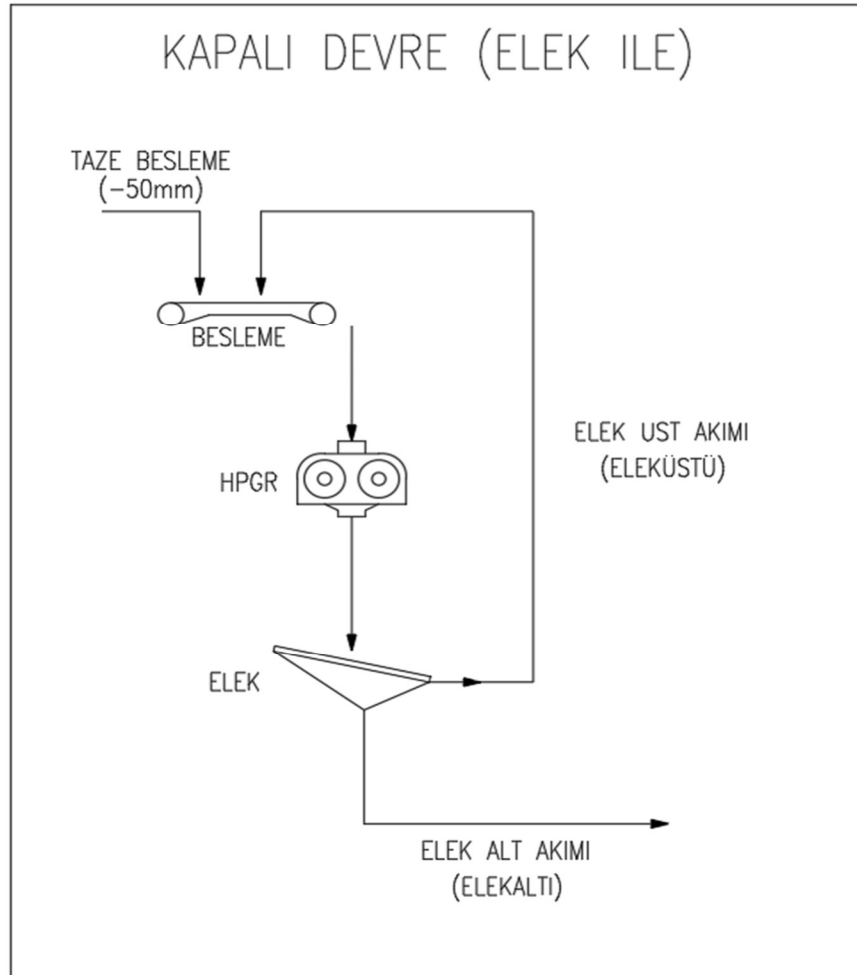
Genel kullanım amacı sonrasında bulunan değirmen devrelerinin kapasitesini artırmak amaçlı ön ezici olarak kullanılmaktadır, özellikle çimento tesislerinde kapasite artışı amaçlı tercih edilmektedir. Bu sayede hem kapasite artışı sağlanır hem de devredeki toplam enerji maliyetleri azaltılmaktadır. Polimetal madencilikte cevher hazırlamada benzer amaçla değirmen devrelerinin öncesinde kullanılmaktadır.



Şekil 19. Açık devre HPGR akış şeması

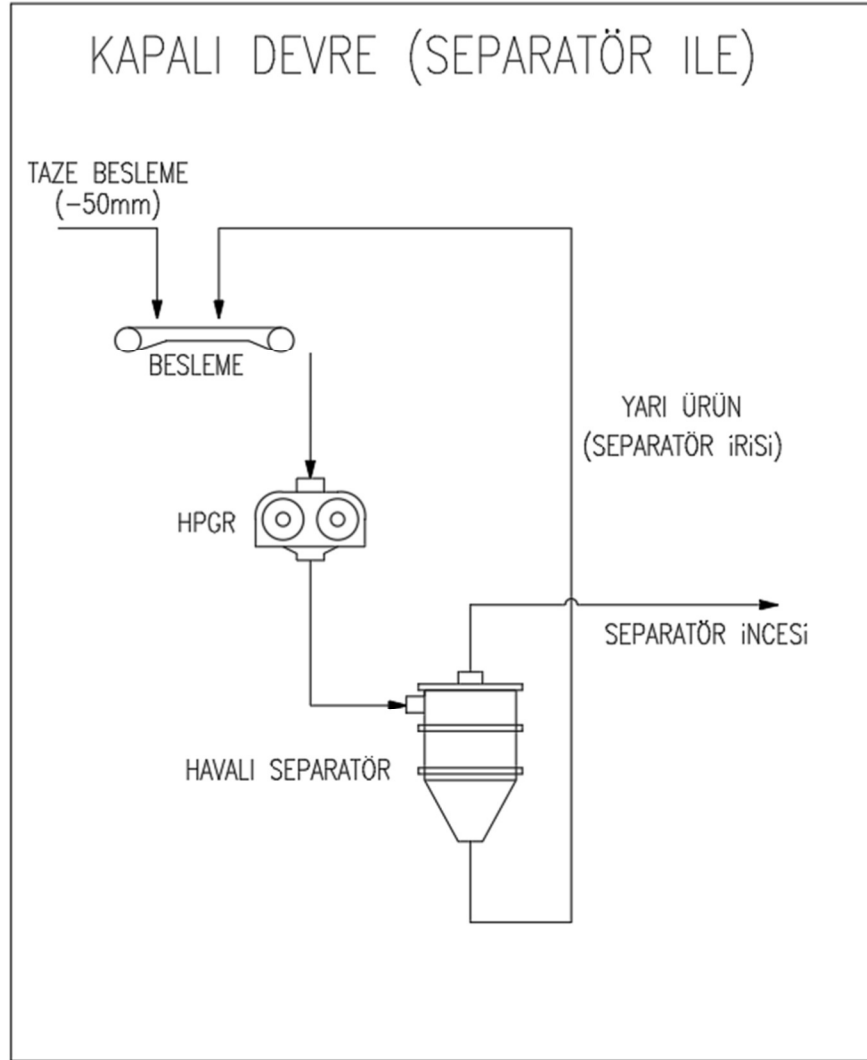
### 3.2.2. Kapalı HPGR Devreleri

Özellikle metal madenciliğinde cevher hazırlama için dizayn edilen kırma eleme devresinde final ürünün elde edilmesi amacıyla bir elek kullanılarak kapalı devre final ürün elde edilir. Özellikle son yıllarda artan enerji ve bakım maliyetlerini düşürmek için HPGR bu tip devrelerde kullanılmaktadır. Geleneksel konik kırıcı ile yapılan üçüncül kırma burada HPGR ile yapılmaktadır. En büyük avantajı kapasitesine göre yatırım, bakım ve işletme maliyetleridir. Bu tez içerisinde yapılan çalışmalar aşağıdaki gibi elek ile kapalı devre olarak çalışan bir HPGR ünitesidir. Referans olarak bu yüksek lisans çalışması için kullanılan Tümad Madencilik firmasına ait İvrindi Altın ve Gümüş Zenginleştirme tesislerinde kullanılan ve kapalı devre olarak tasarlanmış HPGR kırma eleme devresi verilebilir.



Şekil 20. Kapalı devre HPGR akış şeması

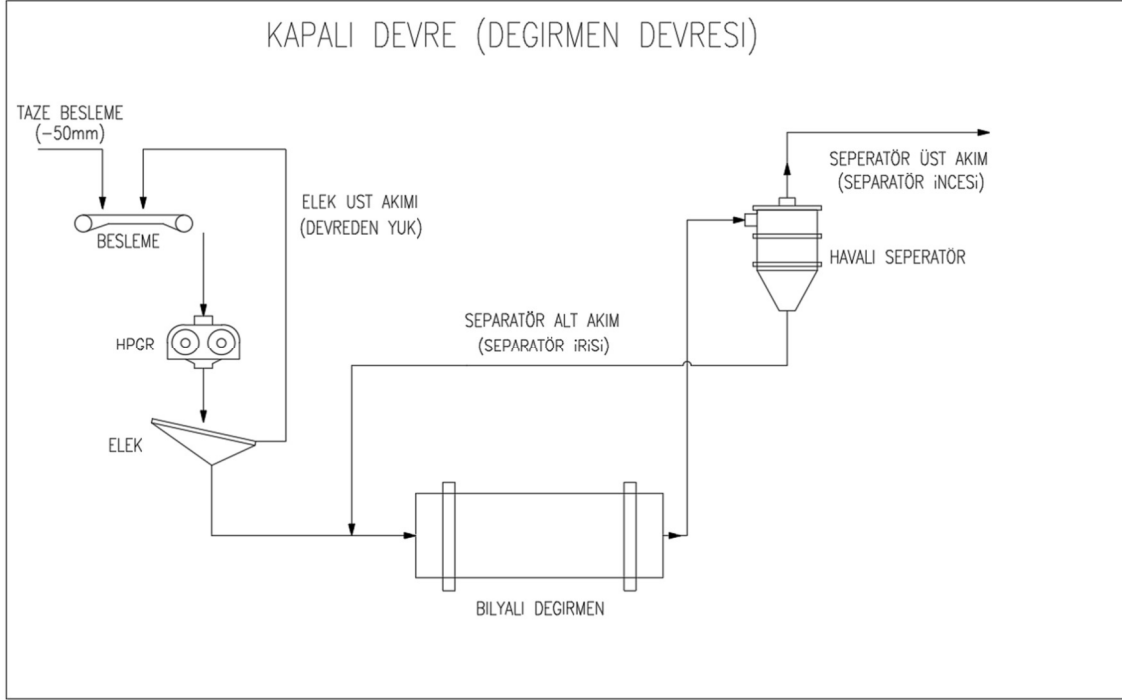
2000 yılları sonrası çimento tesislerinde açık devre olarak kullanılan HPGR bir havalı seperatör ile kullanılmaya başlanmış ve bu sayede değirmen devresinin toplamında kapasite ve enerji kullanımlarında optimizasyon yapılmıştır. Ürün bilyalı değirmenlere beslenmektedir.



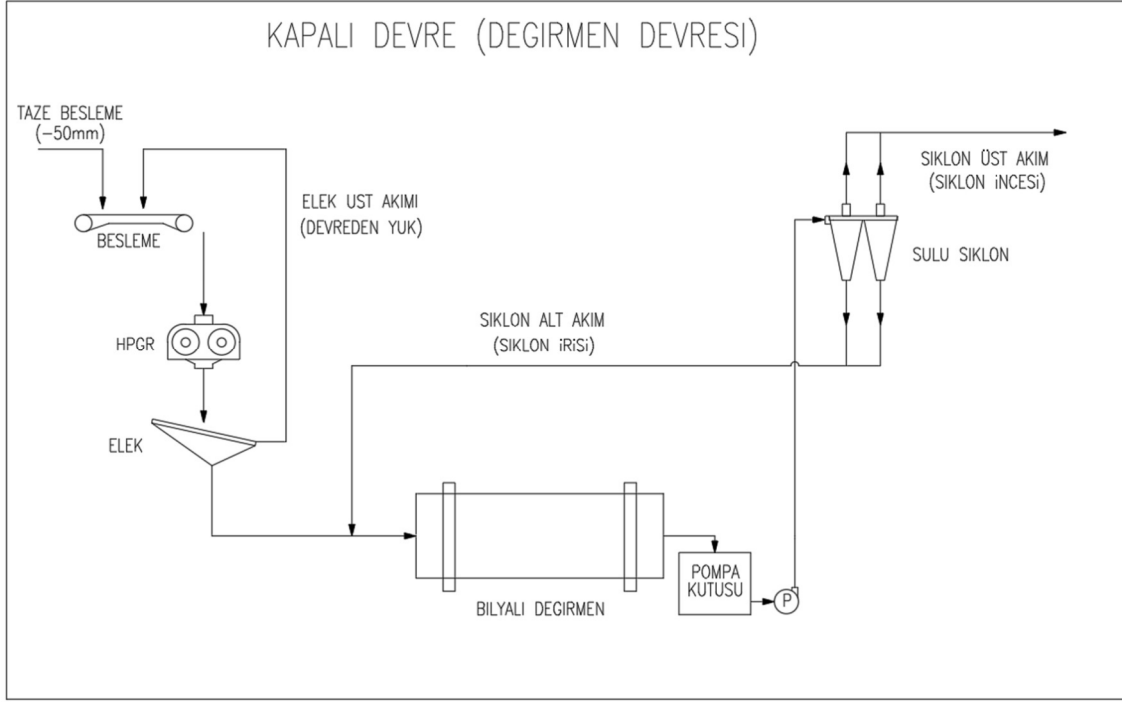
**Şekil 21.** Kapalı devre HPGR akış şeması (seperatör ile)



Mevcut çimento öğütme işletmelerinin çoğunda HPGR değirmen öncesinde bir elek yada benzer ekipmanlar ile kapalı devre olarak kullanılırken havalı seperatör değirmen sonrasında ana ürünü elde etmek amaçlı kullanılmaktadır. Örnek olarak Adoçim Çimento, Akçansa Çimento tesisleri verilebilir.



**Şekil 22.** Kapalı devre HPGR akış şeması (değirmen devresi, havalı seperatör ile)



**Şekil 23.** Kapalı devre HPGR akış şeması (değirmen devresi, sulu siklon ile)

Şekil 23 de kullanılan HPGR devresine referans olarak Southern Copper Corporation şirketine ait Cuajone işletmesi verilebilir.

## 4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR VE SONUÇLAR

### 4.1. İşletmenin Tanımı

Bu tez çalışmasında Tümad Madencilik Balıkesir ili İvrindi ilçesinde bulunan İvrindi Altın ve Gümüş Zenginleştirme tesisinde cevher hazırlama için kullanılan kırma eleme devresi verileri kullanılmıştır. İşletmede üç aşamalı kırma eleme devresi ile cevher hazırlanmakta sonrasında bir ara stokhole gönderilmektedir. Bu stokholden besleyici bantlar yardımıyla alınan cevhere su ve çimento ilave edilerek iki adet aglomerasyon tamburundan geçirilmekte ve mobil ekipmanlar ile yığın liçi alanına serilmektedir. Yığın liçinde her katman 10 metre yükseklikte olacak şekilde toplam 12 katman yığın liçi planlanmaktadır. Günlük 23.000 ton cevher bu alana serilmektedir. Bu alanda siyanür liçi ile altın ve gümüş kazanımı amaçlı hazırlanan solüsyon damlama boruları ile tüm alana verilmektedir. Sonrasında sıvı faza geçen metal CIC devresi ile karbona aktarılmakta ve basınçlı Zadra prosesi devresi ile karbon üzerindeki altın kazanılmaktadır. Sonrasında elektroliz yöntemi ile kazanılan metal indüksiyon potası ile külçe haline getirilmektedir.

### 4.2. HPGR Devre Özeti

Kırma eleme devresi 3 aşamalı kırma ve iki aşamalı eleme sistemi ile kapalı devre olarak çalışmaktadır. Ocaklardan elde edilen 1000mm ölçüsündeki tüvenan cevher ilk olarak birincil kırıcı olarak kullanılan 1900mm ağız açıklığına sahip çeneli kırıcıya bir apron besleyici ve elek yardımı ile beslenmektedir. Kırıcıdan çıkan 200mm üst boyutlu ara ürün ikincil elek ile -45mm boyutları elde etmek amacıyla elenmekte elek üstü konik kırıcıya beslenmektedir. Konik kırıcı çıkışı çeneli kırıcı çıkışı ile birleşmekte ve tekrar ikincil eleğe beslenerek kapalı devre olarak çalıştırılmaktadır. İkincil elek alt akımı bir stokhole aktarılarak bir sonraki kırma aşamasında kullanılmaktadır. Üçüncül kırıcı olarak 2.2m çapında ve 1.5m genişliğinde ağız açıklığına sahip bir HPGR kullanılmaktadır. HPGR a stokholden gelen malzeme bir ara bunkere alınmakta ve bu bunker altında bir besleyici bant ile HPGR düzenli olarak beslenmektedir. HPGR çıkış ara ürün bir transfer bandı yardımıyla 2 adet üçüncül eleğe beslenmekte ve burada kırma eleme devresinden elde edilmek istenen -6mm ürün elek altından alınmaktadır. Elek üstü uygun olmayan ara ürün tekrar stokhole gitmekte ve taze cevher ile homojen olarak birleştirilerek tekrar stok sistemine giriş yapmaktadır. Devreden yükün önemi HPGR sisteminin performansının artırılması amaçlı beslenen

cevher ürün tane dağılımını optimize etmektedir. Final ürün yığın liçinde kullanılmak üzere aglomerasyon ve mobil ekipmanların bulunduğu bir sonraki devreye gönderilmektedir.

### 4.3. Akım Şeması ve Örnekleme Noktaları

Akım şeması aşağıda gösterilmiştir. Beş noktadan numune alımı yapılmıştır. Her numune alımında önce HPGR devresi stabil üretim tonajında en az bir saat çalıştırılmış ve nominal tonajda sistem yüklü olarak durdurulmuştur. Numuneler Şekil 24 de gösterilen noktalardan bant kesme yöntemi kullanılarak, belirlenen 1 metrelik alanda bant üzerindeki tüm malzeme alınmıştır ve laboratuvara kapaklı variller ile sevk edilmiştir. Numune noktaları ve isimleri aşağıdaki şekilde belirtilmiştir. Devre ürünü için kullanılan 2 eleğin alt akımı bir toplama bandında birleştiğinden, numune tüm sistemi temsil etmesi için toplama bantının sonundan alınmıştır. Elek verimlerinin kendi içinde farklı olabileceği düşünülerek bu nokta belirlenmiştir.

Test numunelerinin alındığı tesise ait fizibilite raporunda bulunan multi element analiz sonucu ve öğütme parametreleri aşağıda Çizelge 1 ve Çizelge 2 de gösterilmiştir.

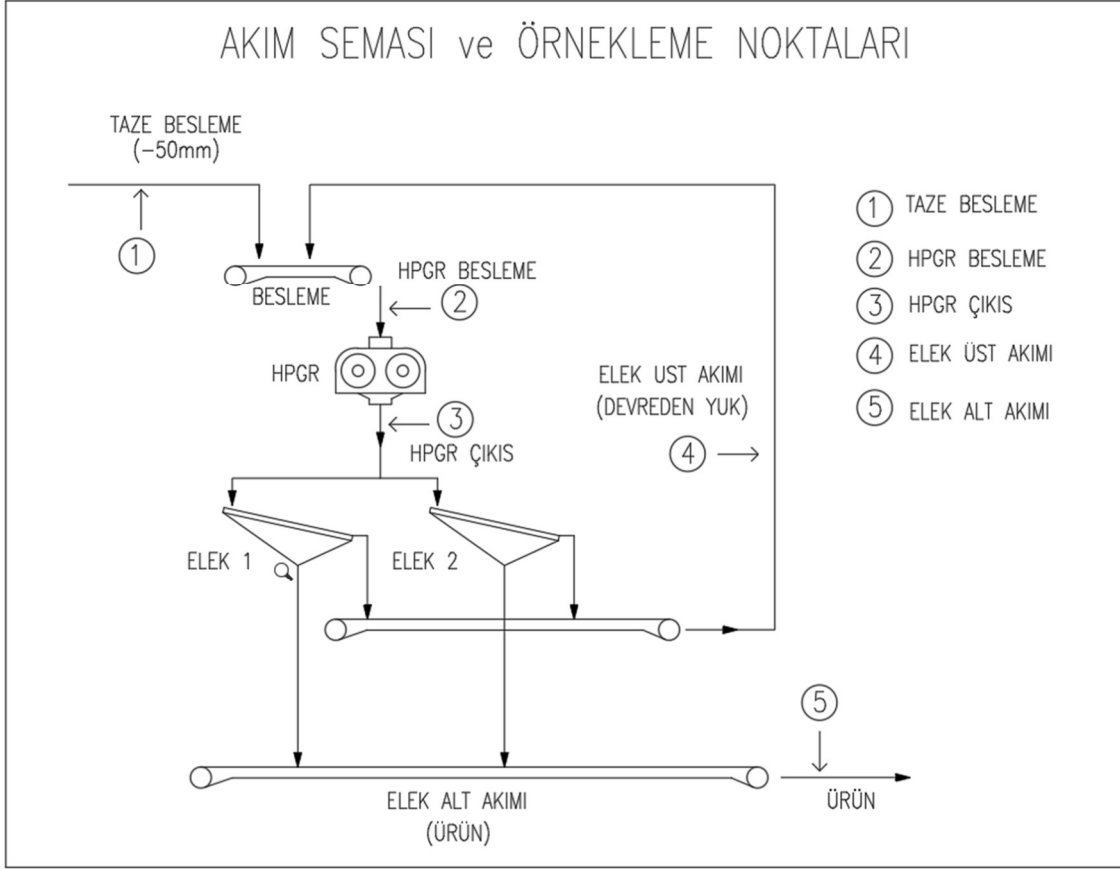
Multi Element Analizi		
Al	6.35	%
As	21	mg/kg
Ba	1135	mg/kg
Bi	<2	mg/kg
C - Toplam	0.25	%
Carbon - Organik	0.04	%
Carbon - Inorganic	0.2	%
Ca	0.7	%
Cd	3	mg/kg
Co	9	mg/kg
Cr	73	mg/kg
Cu - Total	31	mg/kg
Cu- Cyanide soluble	2.57	mg/kg
Fe	2.39	%
Hg	<0.02	mg/kg

K	5.27	%
Mg	0.32	%
Mn	380	mg/kg
Mo	1	mg/kg
Na	0.18	%
Ni	26	mg/kg
Pb	31	mg/kg
S - Total	0.06	%
Sulfur - sulfide	<0.01	%
S- sulfate	0.06	%
Sb	4	mg/kg
Se	<5	mg/kg
Sr	155	mg/kg
Te	4	mg/kg
Ti	0.13	%
V	65	mg/kg
W	<10	mg/kg
Zn	48	mg/kg

Çizelge 1. Taze Cevher Multi-Element Analizi

<b>Öğütme Özellikleri</b>		
Bond Ball Mill WI	16.8	kW-hr/tonne
Bond Rod Mill WI	16.5	kW-hr/tonne
Bond Abrasion Index	0.169	TEC
BondLow Impact Crusher WI		
Min	2.6	kWhr/tonne
Average	8.5	kWhr/tonne
Max	14.6	kWhr/tonne
ATWAL - HPGR Tests		
Abrasion at 3.15mm Feed size & 1.0% moisture	16.37	g/t
Abrasion at 3.15mm Feed size & 3.0% moisture	21.16	g/t

Çizelge 2. Taze Cevher Öğütme Özellikleri



**Şekil 24.** Örnekleme noktaları (grafiksel)



**Şekil 25.** Örnekleme noktaları (tesis)

Çalışma sürecinde bant üzerinden alınan numuneler için kullanılan ölçekli aparat Şekil 26 da gösterilmiştir.



**Şekil 26.** Numune alma aparatı

Bant ani olarak örnekleme amaçlı durdurulduğunda gerekli önlemler alınarak numune alma aparatı Şekil 27 deki gibi bant üzerine yerleştirilir.



**Şekil 27.** Numune alma aparatı kullanımı



**Şekil 28.** Numune alma işlemi





**Şekil 29.** Numune alma aparatı kullanımı ile numunenin alınması  
Numune arasındaki tüm cevher alınarak belirlenmiş numune taşıma kabına konulur.

Kullanılan ana ekipman özellikler;

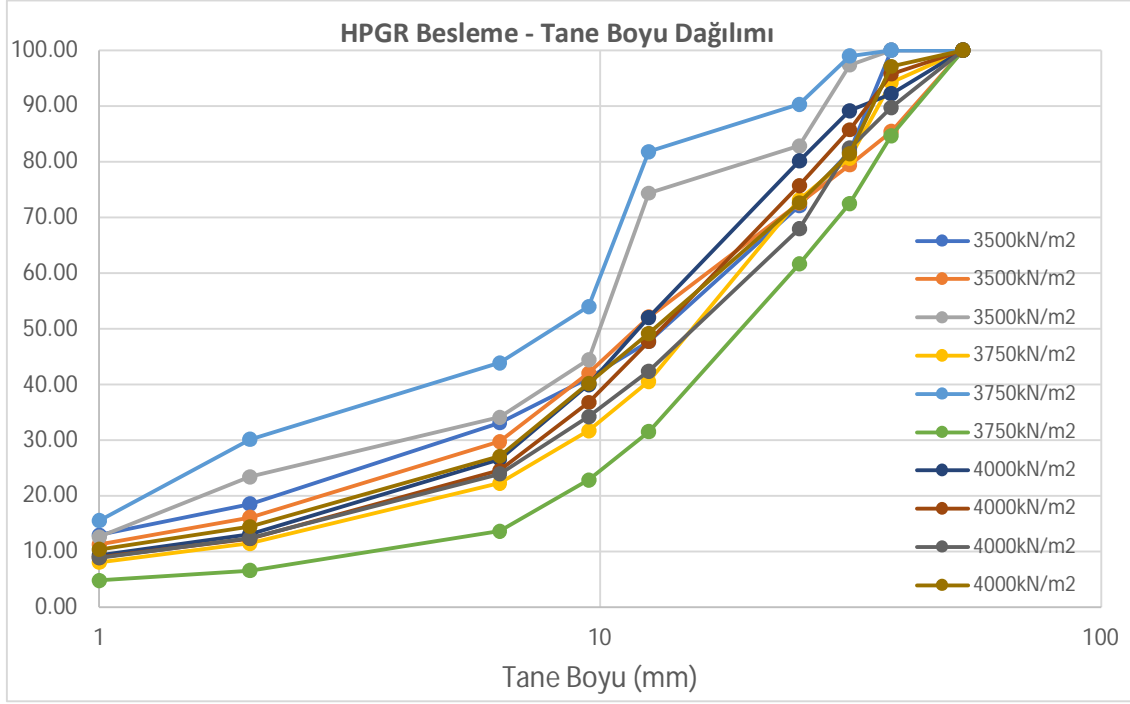
- HPGR :
  - Silindir Tip : Paslanmaz çelik teker üzerinde tungsten karpit uçlar montajlı silindir
  - Silindir Çap : 2200mm
  - Silindir Genişlik : 1500mm
  - Spesifik Öğütme Basıncı : 2800 – 4500kN / m<sup>2</sup>
  - Sistem Max Basınç : 175 bar
  - Kurulu Gücü : 2 x 2000kW
  - Silindir Max. Hızı : 19.5 rpm
  - Nominal Kapasitesi : 990 ton / saat
  - Dizayn Kapasitesi : 1139 ton / saat
  - Devreden Yük : %65
  - Spesifik Enerji : ~1.35 kWh/ton
  - Besleme Boyu (P100) : 45 mm
  - Besleme Boyu (P80) : 40 mm
  
- Üçüncül Elek
  - Elek Tipi : Muz
  - Elek Eni : 3.6 m
  - Elek Boyu : 7.3 m
  - Elek Kat Sayısı : 2 kat
  - Elek Gücü : 75 kW
  - Elek Hareketi Mesafesi : 9.6 mm (890 rpm devirde)
  - Elek Üst Kat Göz Aralığı : 12 mm
  - Elek Alt Kat Göz Aralığı : 6 mm
  - Elek içi açılar : 28°, 20°, 16°, 12°, 8° (Girişten - Çıkışa)

#### 4.4. Boyut Dağılımlarının Belirlenmesi

Farklı öğütme basıncında alınan örneklere ait tane boyutu belirlemesi işletmenin laboratuvarlarında yapılmıştır. Toplam 10 adet örnekleme yapılmış, örneklere ait kodlama Çizelge 3 de verilmektedir. Örnekleme tesisin aktif olarak çalışmasından dolayı farklı günlerde yapılmıştır. Her bir koşulda, farklı akışların boyut dağılımları toplu olarak Şekil 30 - 33 de verilmiştir. Detaylı örnekleme koşulları ve boyut dağılımları ise ekler dizininde sunulmaktadır.

Örnekleme	Spesifik Öğütme Basıncı (kN/m <sup>2</sup> )	HPGR besleme tonajı (ton/saat)
1	3500	1410
2	3500	1583
3	3500	1649
4	3750	1731
5	3750	1752
6	3750	1553
7	4000	1628
8	4000	1649
9	4000	1634
10	4000	1590

Çizelge 3. Örneklere ait spesifik güç ve tonajları

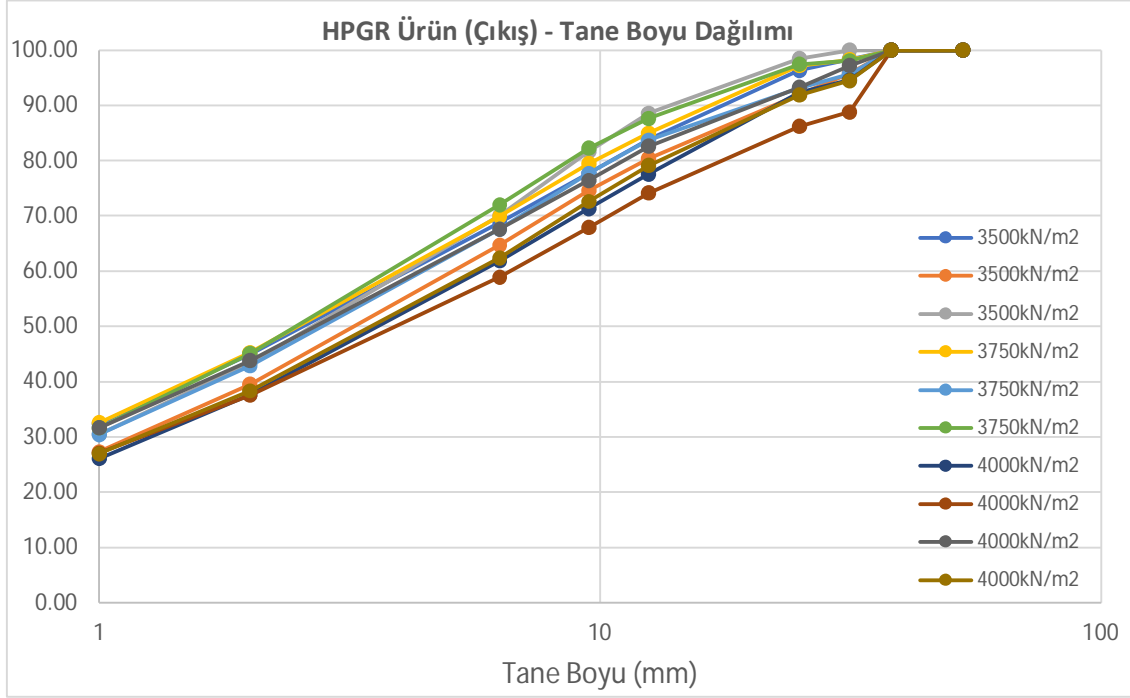


**Şekil 30.** HPGR besleme numuneleri tane boyu dağılımları

Örnekleme tesis aktif çalışması esnasında en ideal anlarda yapılmaya çalışılmış olsada numune alım anında olası besleme sorunları yaşanırda sistemde bulunan yedek besleyiciler çalıştırılmaktadır. Bu esnada alınan örneklerde tane boyutunda yüksek miktarda sapmalar gözlemlenmiştir. Devreden yükün gün boyu çalışma koşullarına göre değiştiğinden bazı besleme numunelerinin beklenenden daha ince yada iri olduğu gözlemlenmiştir.

HPGR besleme örneklemelerine ait P:50 ve P:80 ortalamaları aşağıdaki gibidir.

- 3500 kN/m<sup>2</sup> örnekleme için ortalama P50: 11.87 mm , P80: 27.77 mm dir.
- 3750 kN/m<sup>2</sup> örnekleme için ortalama P50: 14.84 mm , P80: 26.29 mm dir.
- 4000 kN/m<sup>2</sup> örnekleme için ortalama P50: 13.68 mm , P80: 28.40 mm dir.

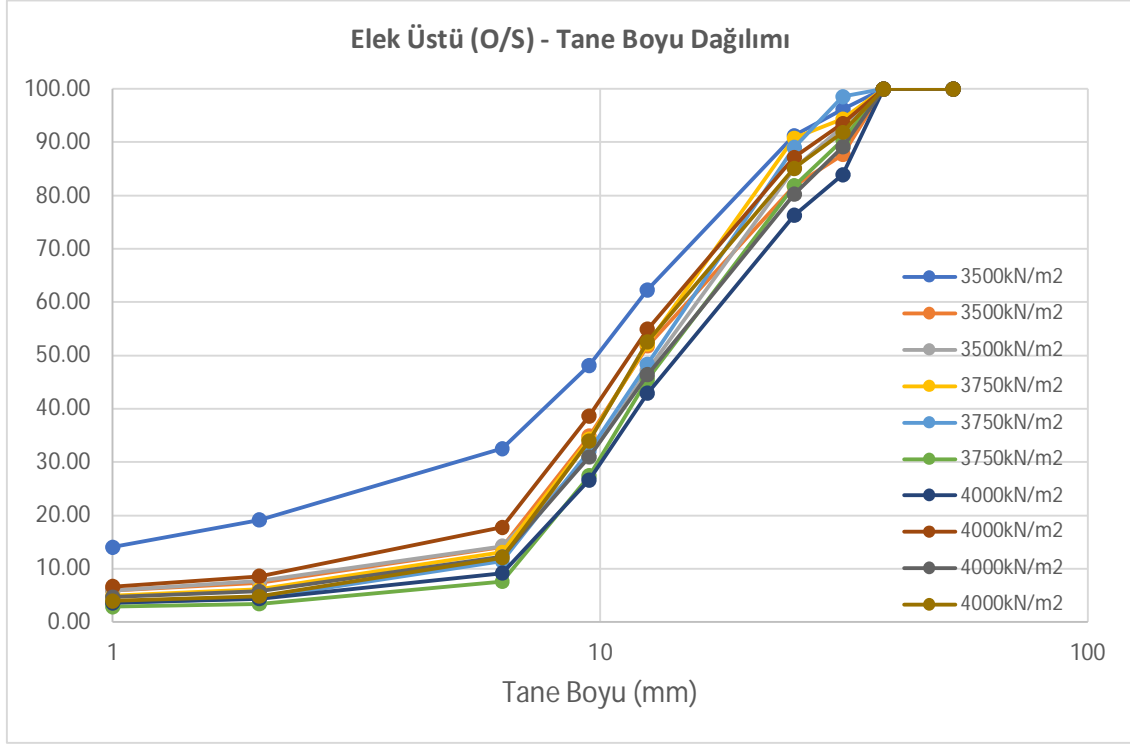


**Şekil 31.** HPGR çıkışı numuneleri tane boyu dağılımları

HPGR çıkış numunelerinde tane boyu dağılımları daha dar bir aralık dağılımında olduğu yukarıdaki grafikte gözükmektedir. Spesifik öğütme basıncının artmasına HPGR çıkış cevher boyutunda ince malzemenin artırdığı gözükmektedir. Aşırı miktarda basınç artırıldığında bir seviyeden sonra -1mm malzemenin %50 den fazla artmadığı ama çıkış numunesinin genel olarak öğütme oranının arttığı gözlemlenmiştir. Lakin doğru şekilde ve minimum enerji ile boyut küçültme işleminin yapılabilmesi için dengeli bir besleme tane boyutu gerekmektedir.

HPGR çıkış örneklemelerine ait P:50 ve P:80 ortalamaları aşağıdaki gibidir.

- 3500 kN/m<sup>2</sup> örnekleme için ortalama P50: 3.26 mm , P80: 10.66 mm dir.
- 3750 kN/m<sup>2</sup> örnekleme için ortalama P50: 2.95 mm , P80: 9.76 mm dir.
- 4000 kN/m<sup>2</sup> örnekleme için ortalama P50: 3.97 mm , P80: 14.43 mm dir.

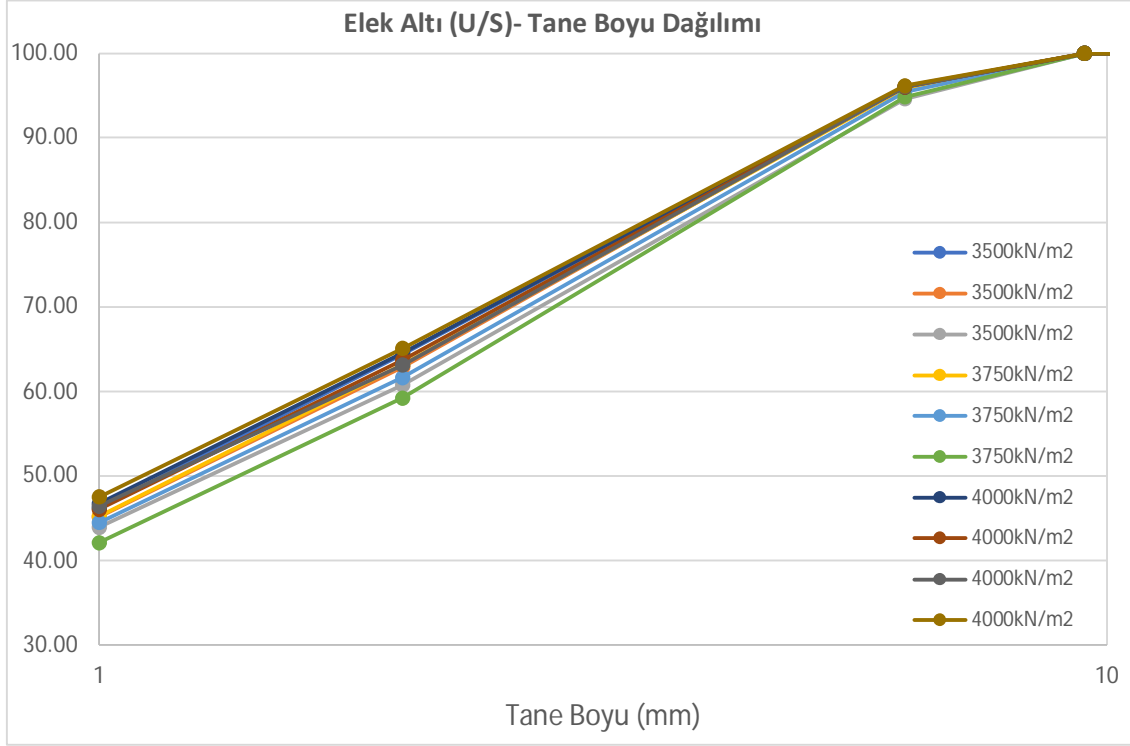


**Şekil 32.** Elek üstü numuneleri tane boyu dağılımları

Elek üstü numunenin elek medyasının sabit olmasından dolayı birbirine yakın olması beklenirken arada oluşan iri cevherin nedeni HPGR çalışma filozofisinden kaynaklıdır. Bu filozofide sistemde olası bir kaymada sistem kendini düzeltmeye çalışırken öğütme performansı düşmekte ve yüksek miktarda az öğütülmüş malzeme HPGR sisteminden geçmekte ve eleklerle gitmektedir. Bu esnada elek üst akımında iri malzeme artmaktadır. Bir diğer sapmada çalışma esnasında cevher içindeki nemden dolayı üçüncül eleme sisteminin ara ara tıkanıdığı bu esnada elek verimi düştüğü ve elek üstüne daha fazla ince cevherin gittiği gözlemlenmiştir. İlgili tesis bunu engellemek amaçlı her vardiyada bir kez elek temizliği yapmaktadır.

HPGR elek üst akımı örneklemelerine ait P:50 ve P:80 ortalamaları aşağıdaki gibidir.

- 3500 kN/m<sup>2</sup> örnekleme için ortalama P50: 11.70 mm , P80: 22.58 mm dir.
- 3750 kN/m<sup>2</sup> örnekleme için ortalama P50: 13.06 mm , P80: 22.70 mm dir.
- 4000 kN/m<sup>2</sup> örnekleme için ortalama P50: 13.17 mm , P80: 24.38 mm dir.



**Şekil 33.** Elek altı numuneleri tane boyu dağılımları

Elek altı malzeme yukarıdaki grafikte görüldüğü gibi çok dar bir aralıkta boyutlanmaktadır. Burada spesifik güç artışı -1.18 mm malzemedeki büyük miktarda artış sağlamazken genel olarak daha ince cevher üretilmesini sağlamaktadır. Tesise ait performans hedefi -1,18 mm ince cevher miktarının %50 civarında olmasını sağlamaktır.

HPGR elek altı akımı örneklemelerine ait P:50 ve P:80 ortalamaları aşağıdaki gibidir.

- 3500 kN/m<sup>2</sup> örnekleme için ortalama P50: 1.28 mm , P80: 4.26 mm dir.
- 3750 kN/m<sup>2</sup> örnekleme için ortalama P50: 1.34 mm , P80: 4.35 mm dir.
- 4000 kN/m<sup>2</sup> örnekleme için ortalama P50: 1.19 mm , P80: 4.14 mm dir.

#### 4.5. Madde Denkliği Çalışmaları

Ölçülen boyut dağılımları ve besleme tonajı değerleri kullanılarak madde denkliği çalışmaları yürütülmüştür. Bu çalışmalarda JKSimMet yazılımı kullanılmıştır. Madde denkliği sonucu hesaplanan tonaj değerleri Çizelge 4 de gösterilmiştir

Örnekleme	Spesifik Öğütme Kuvveti (kN/m <sup>2</sup> )	HPGR besleme tonajı (ton/saat)	Eleküstü tonajı (ton/saat)	Elekaltı=ürün tonajı (ton/saat)
1	3500	1411	605	806
2	3500	1544	456	1088
3	3500	1649	510	1138
4	3750	1731	555	1176
5	3750	1752	565	1187
6	3750	1568	495	1073
7	4000	1619	525	1094
8	4000	1639	549	1090
9	4000	1632	535	1097
10	4000	1578	512	1066

Çizelge 4. JKSimMet hesaplarına ait spesifik güç ve tonajlar

Örneklemelelerde genel olarak birbirine benzemekte iken arada karşılaşılan sapmaların iki ana nedeni olmaktadır. Birinci ana nedeninin eleklerin cevher içindeki nem etkisi ile tıkanması ve elek üst akımına ince cevherin kaçmasıdır, ikinci neden ise HPGR çalışma esnasında merdanelerin yatay ekseninde farklı kaymasından dolayı düzeltme fonksiyonunun devreye girmesi ve bu esnada



daha az öğünmüş cevherin HPGR dan geçerek elek sistemine gitmesidir. Birinci olayda elek üst akımında daha fazla ince cevher gözükmürken ikinci olayda elek üstünde beslemeye yakın tane boyutları gözlemlenmiştir. Aşağıdaki grafiklerde olası sapmalarda bu iki olay göz önüne alınmalıdır. Son olarak sistem filozofisi incelendiğinde basınç düzenleme parametresi +/-%10 olarak ayarlandığı gözlemlenmiştir. Sınır değere ulaşmadan basınç düzenleme fonksiyonu devreye girmediğinden, bu fonksiyon nedenli dönemsel olarak (5-10 dk) cevherin daha ince yada iri gitmesine neden olmaktadır.

Bu düzeltmeler kapalı sistemde final tonajı etkilemekte olup final ürün tane dağılımını büyük miktarda değiştirmedeği gözlemlenmiştir. Düzeltmeler devreden yükün miktarının değişmesine neden olurken, devreden yükün bir stokholde taze besleme ile birleşmesinden dolayı etkileri 7-8 saat sonra HPGR da gözükmetedir. Örneklemeler aktif olarak çalışan tesiste yapıldığından HPGR besleme numunelerinde alınan sonuçlara göre çıkan tane boyu dağılımlarında devreden yükün etkisinin anlık olarak etkilediği kabul edilmiştir.

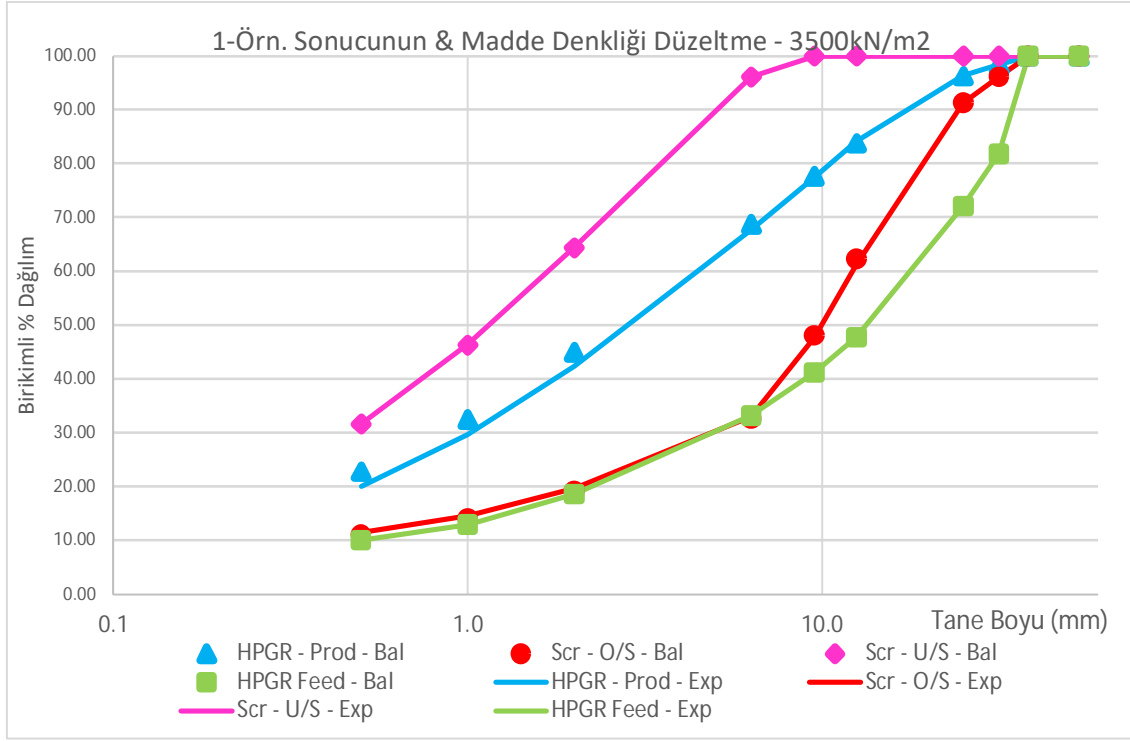
HPGR örneklemelerinin değerlendirilmesi amaçlı HPGR sistemini besleyen kırılmış cevhere (taze besleme) ait tane boyu dağılımı Şekil 34 de gösterilmiştir.



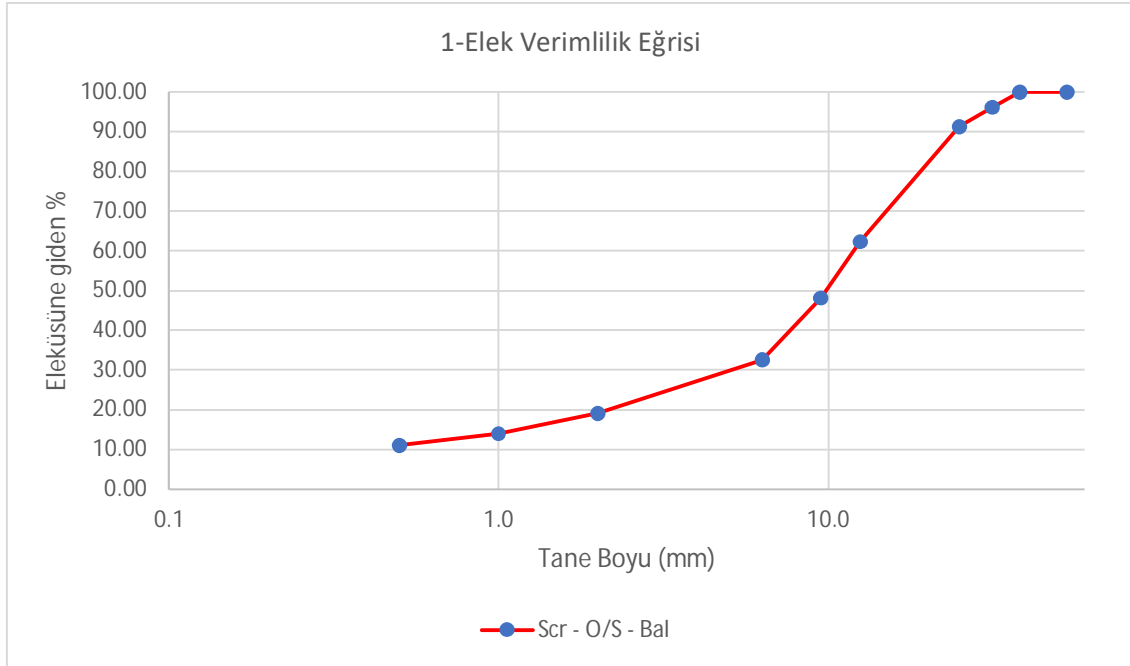
**Şekil 34.** HPGR devresi taze cevher besleme tane boyu dağılımı

Taze besleme; birincil (Çeneli kırıcı) ve ikincil (Konik kırıcı) kırıcıların bir ikincil elek ile kapalı devre olarak çalışan bir kırma eleme devresinden sağlanmaktadır. Burada elek gözenekleri -45mm olarak belirlenmiş ve kullanılmıştır. HPGR beslemesi için kullanılan bu cevherin P80 tane boyutu 35.45 mm olduğu hesaplanmıştır.

-Birinci örnekleme koşulunda ölçülen ve madde denklığı sonrası düzeltilen boyut dağılımları ve elek verimi aşağıda gösterilmiştir.

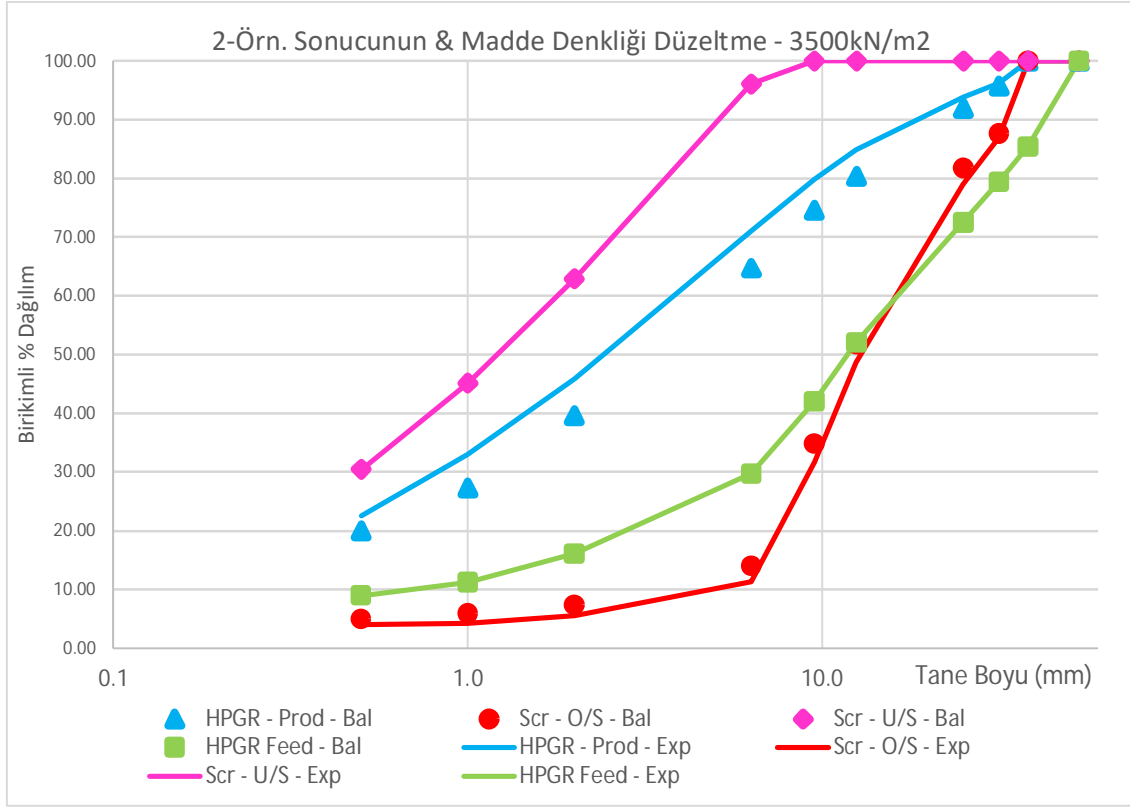


Şekil 35. Birinci örneklemenin ölçülen ve denklik sonrası durumu

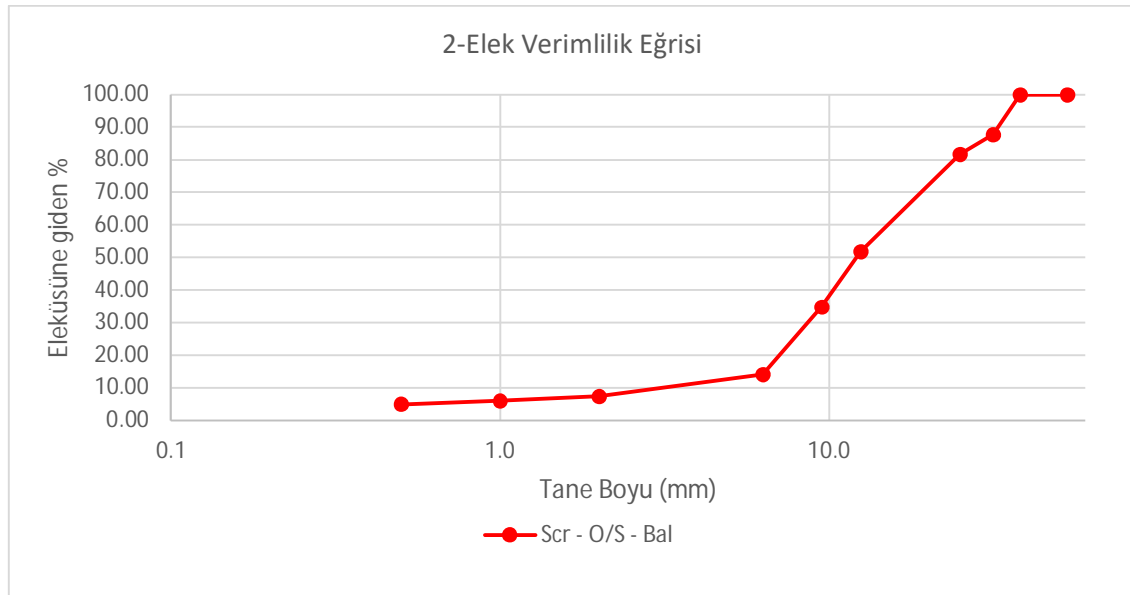


Şekil 36. Birinci örnekleme elek verim eğrisi

-İkinci örnekleme koşulunda ölçülen ve madde denkliği sonrası düzeltilen boyut dağılımları ve elek verimi aşağıda gösterilmiştir.

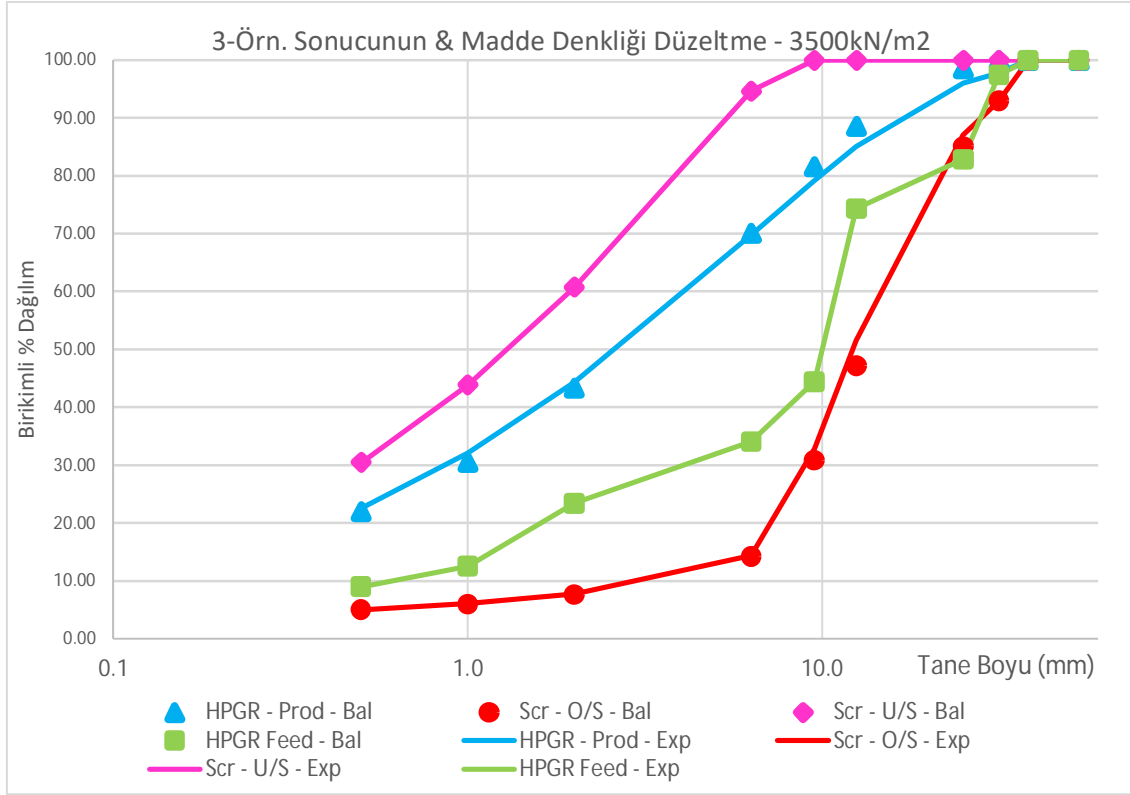


Şekil 37. İkinci örnekleme ölçülen ve denklik sonrası durumu

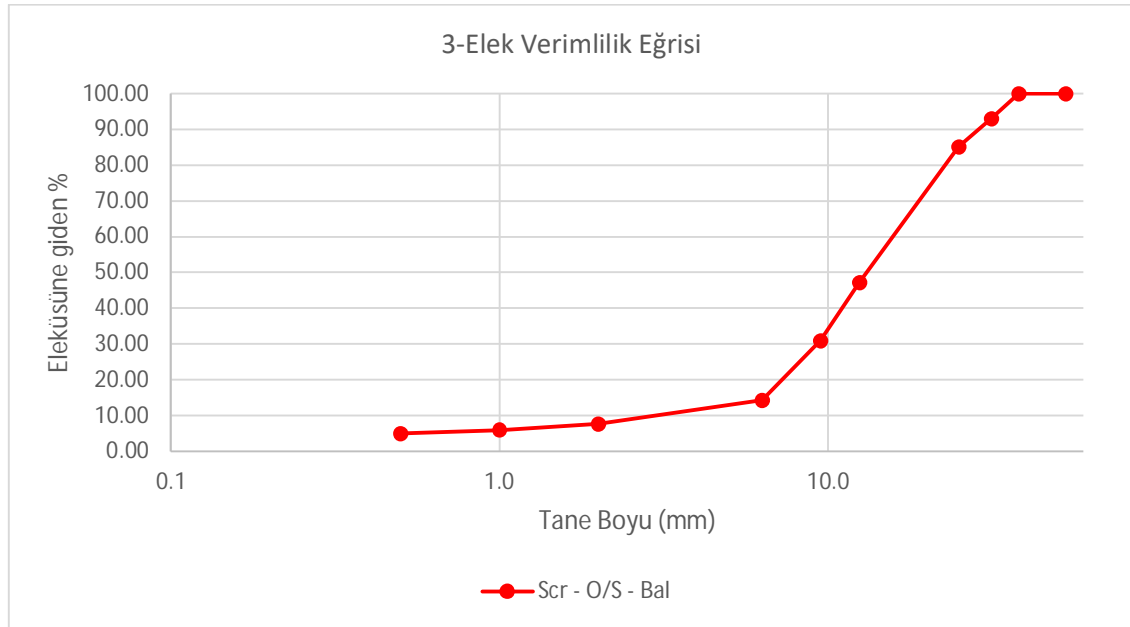


Şekil 38. İkinci örnekleme elek verim eğrisi

-Üçüncü örnekleme koşulunda ölçülen ve madde denkliği sonrası düzeltilen boyut dağılımları ve elek verimi aşağıda gösterilmiştir.

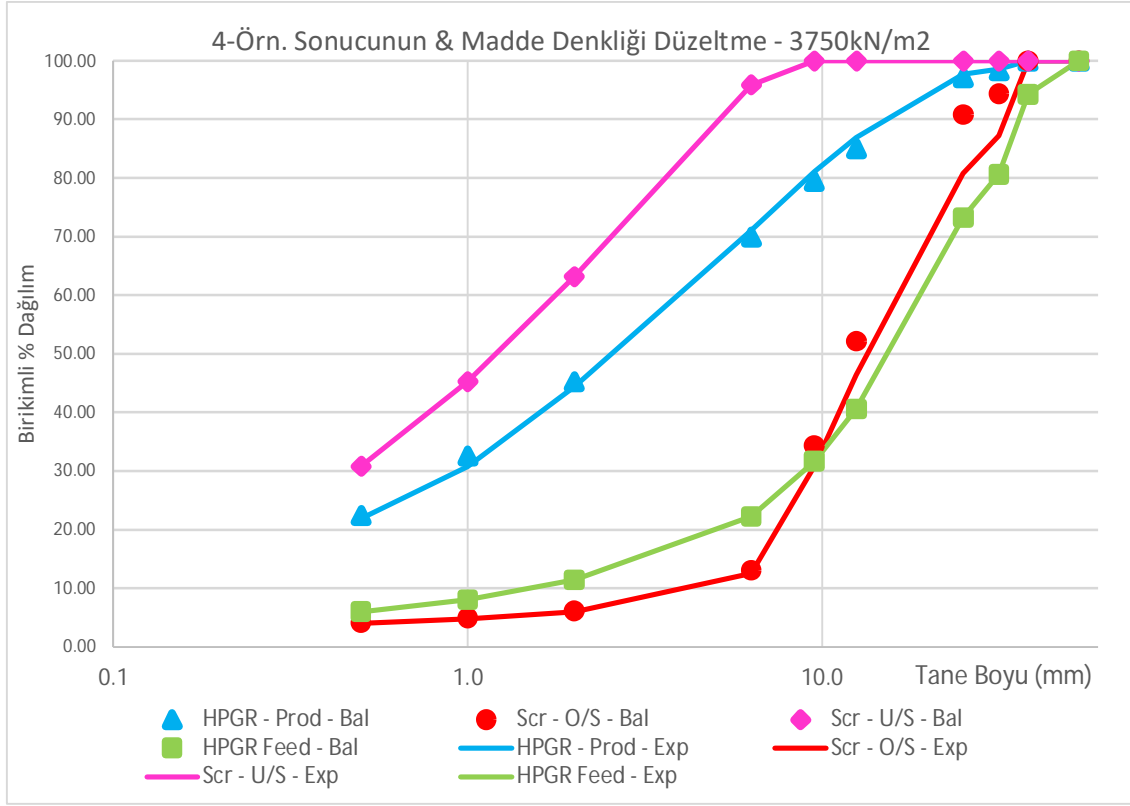


Şekil 39. Üçüncü örneklemenin ölçülen ve denklik sonrası durumu

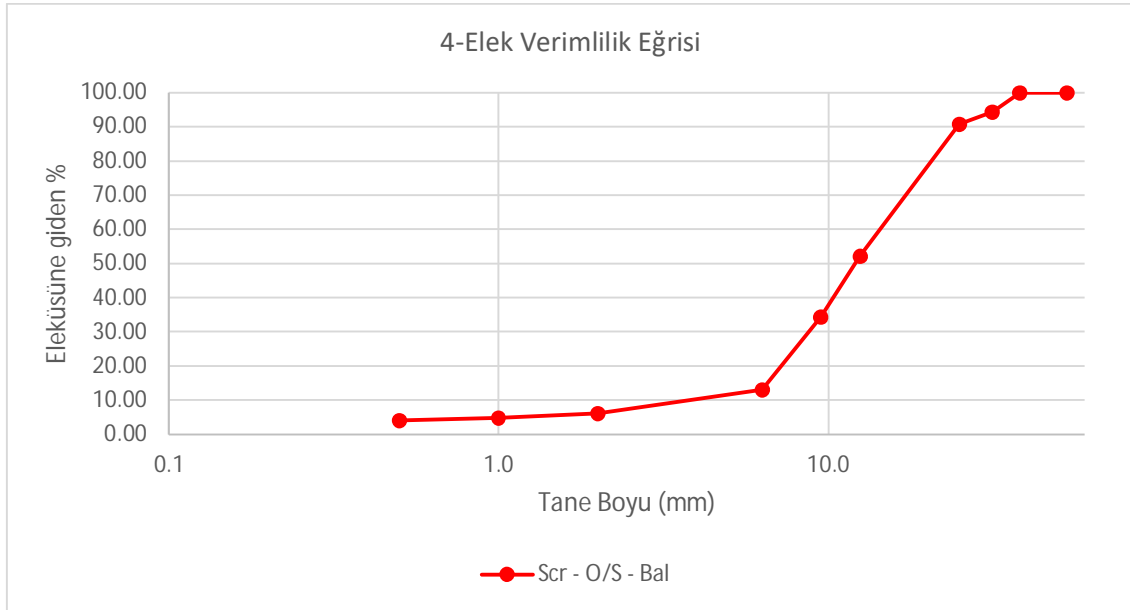


Şekil 40. Üçüncü örnekleme elek verim eğrisi

-Dördüncü örnekleme koşulunda ölçülen ve madde denkliği sonrası düzeltilen boyut dağılımları ve elek verimi aşağıda gösterilmiştir.

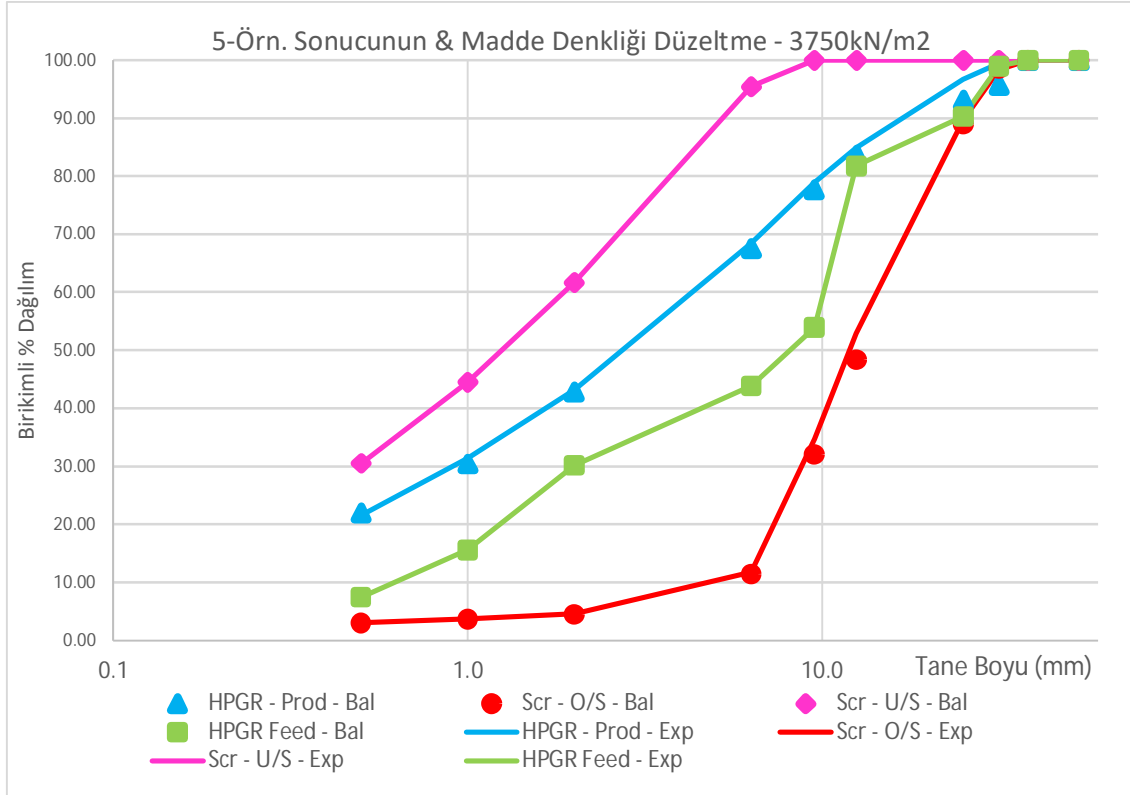


Şekil 41. Dördüncü örneklemenin ölçülen ve denklik sonrası durumu

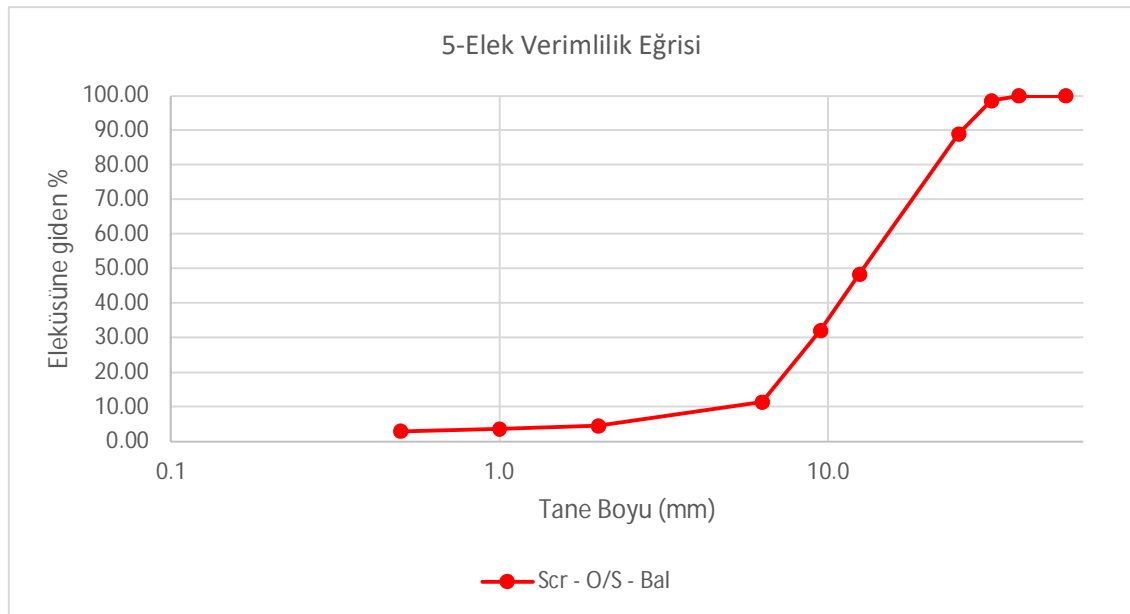


Şekil 42. Dördüncü örnekleme elek verim eğrisi

-Beşinci örnekleme koşulunda ölçülen ve madde denklığı sonrası düzeltilen boyut dağılımları ve elek verimi aşağıda gösterilmiştir.

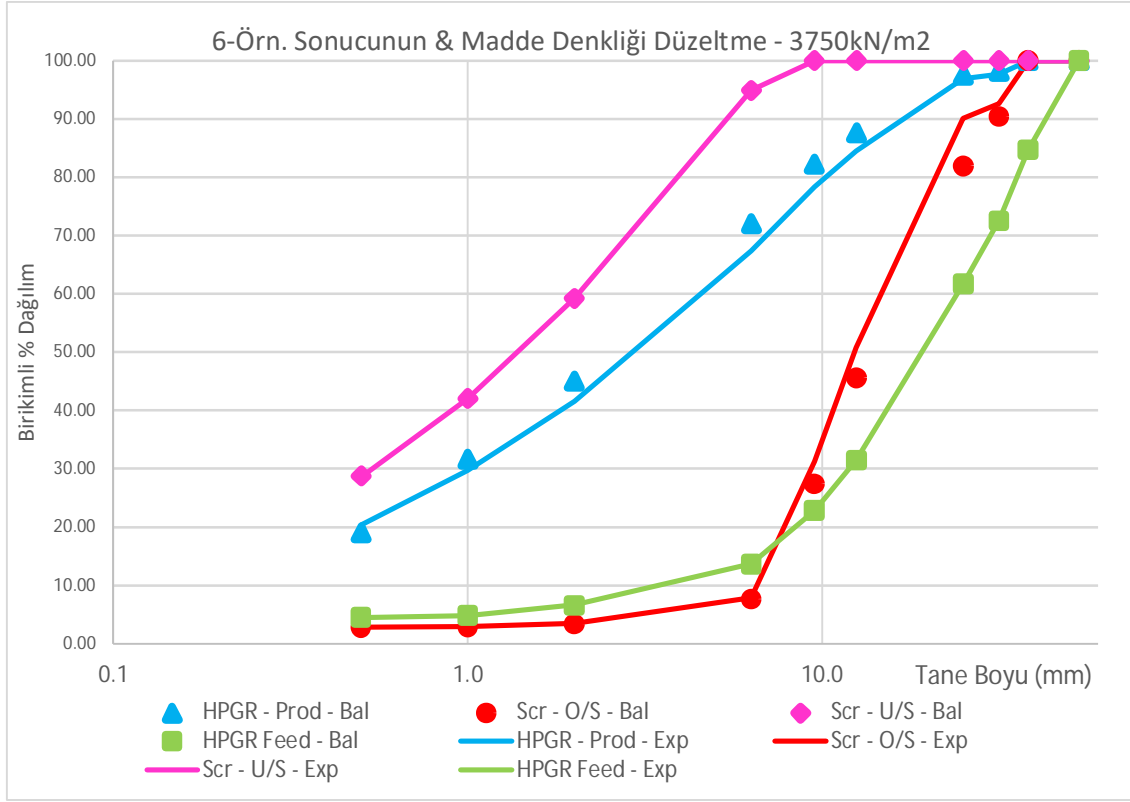


Şekil 43. Beşinci örneklemenin ölçülen ve denklik sonrası durumu

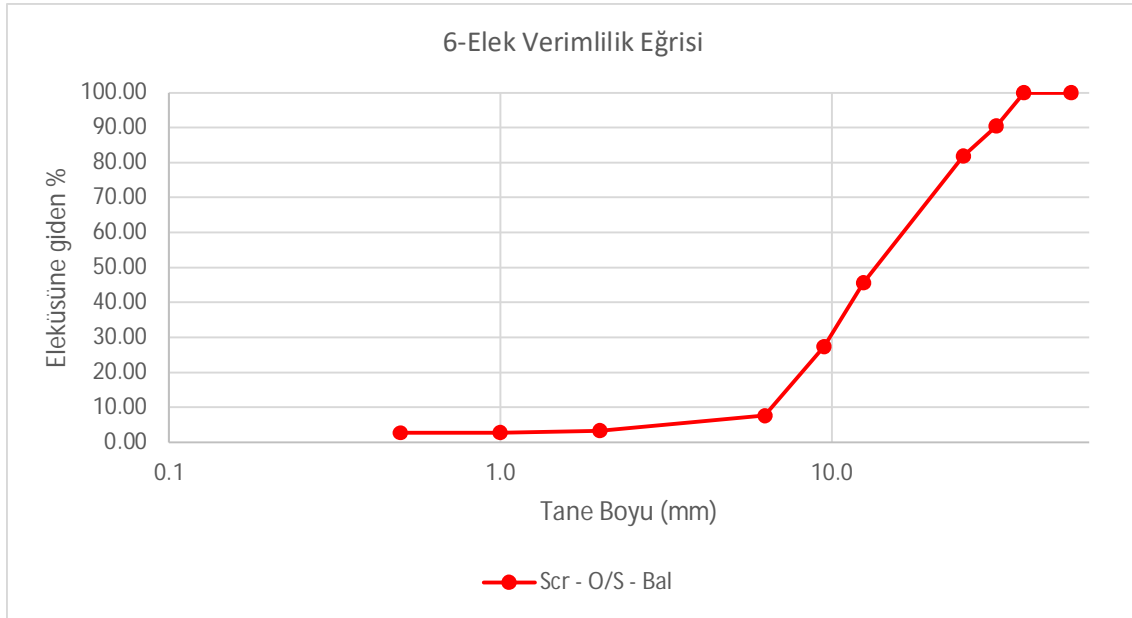


Şekil 44. Beşinci örnekleme elek verim eğrisi

-Altıncı örnekleme koşulunda ölçülen ve madde denklığı sonrası düzeltilen boyut dağılımları ve elek verimi aşağıda gösterilmiştir.



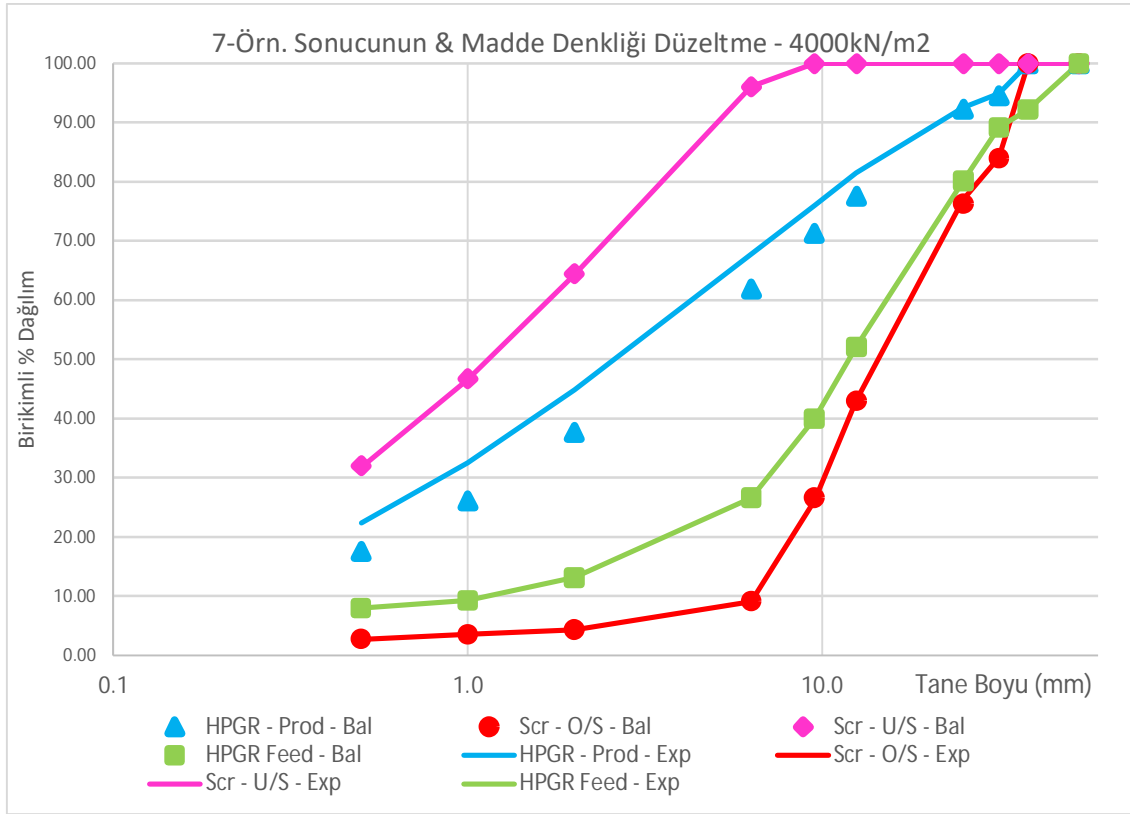
Şekil 45. Altıncı örneklemenin ölçülen ve denklik sonrası durumu



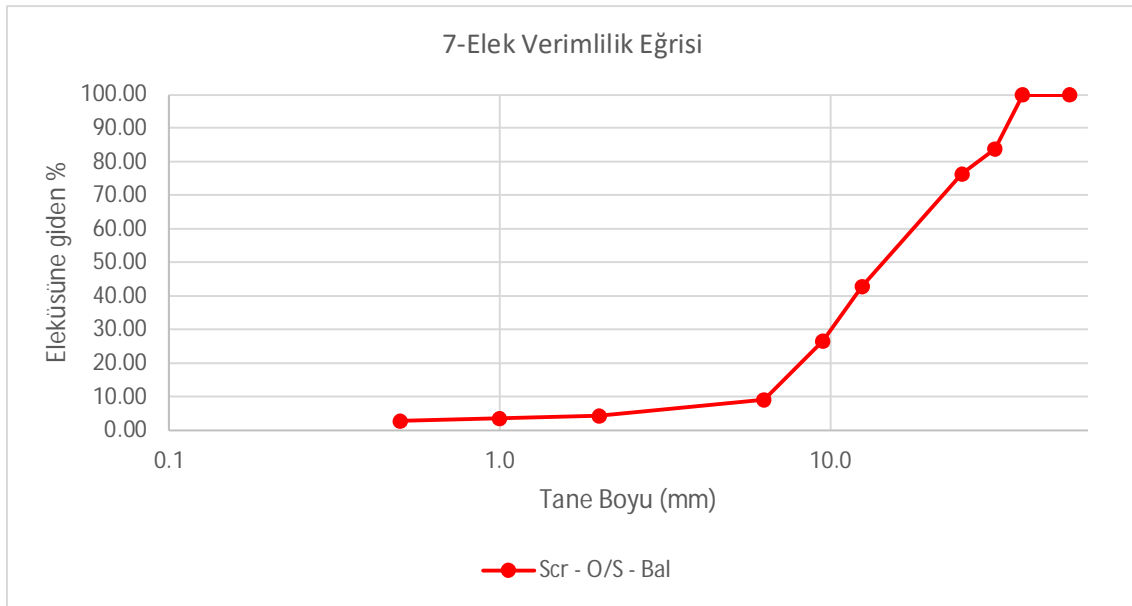
Şekil 46. Altıncı örnekleme elek verim eğrisi



-Yedinci örnekleme koşulunda ölçülen ve madde denkliği sonrası düzeltilen boyut dağılımları ve elek verimi aşağıda gösterilmiştir.

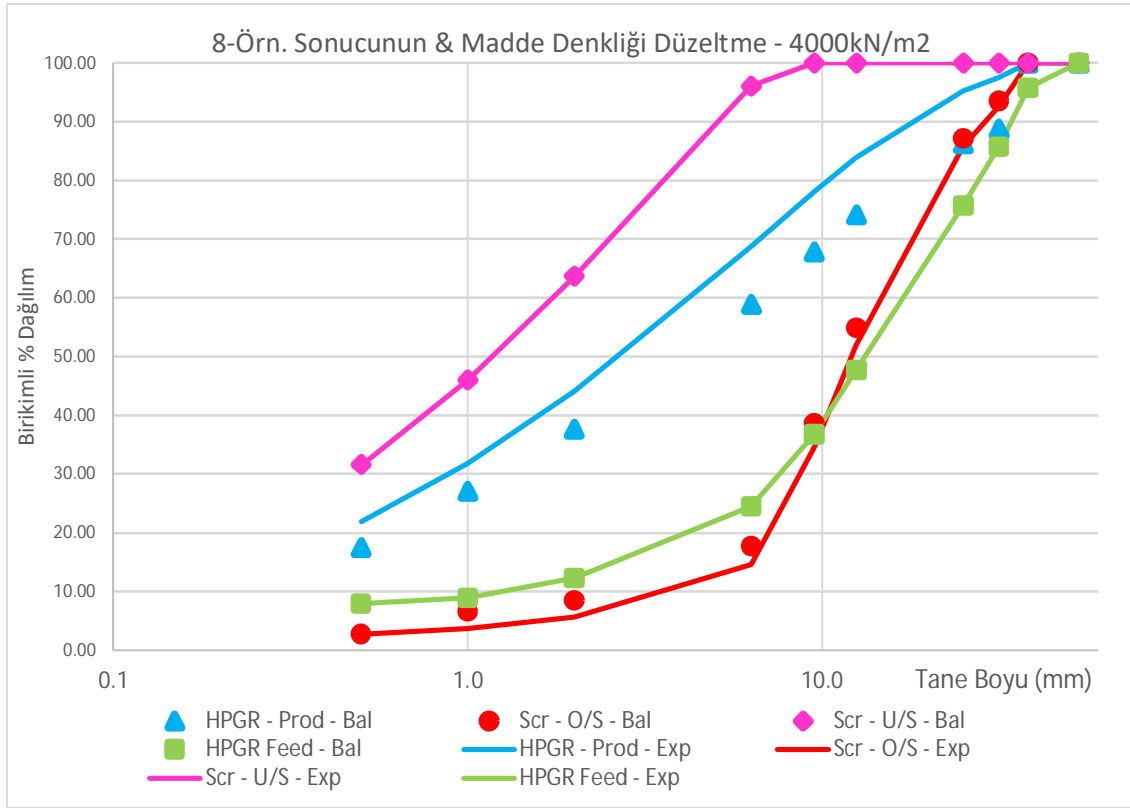


Şekil 47. Yedinci örneklemenin ölçülen ve denklik sonrası durumu

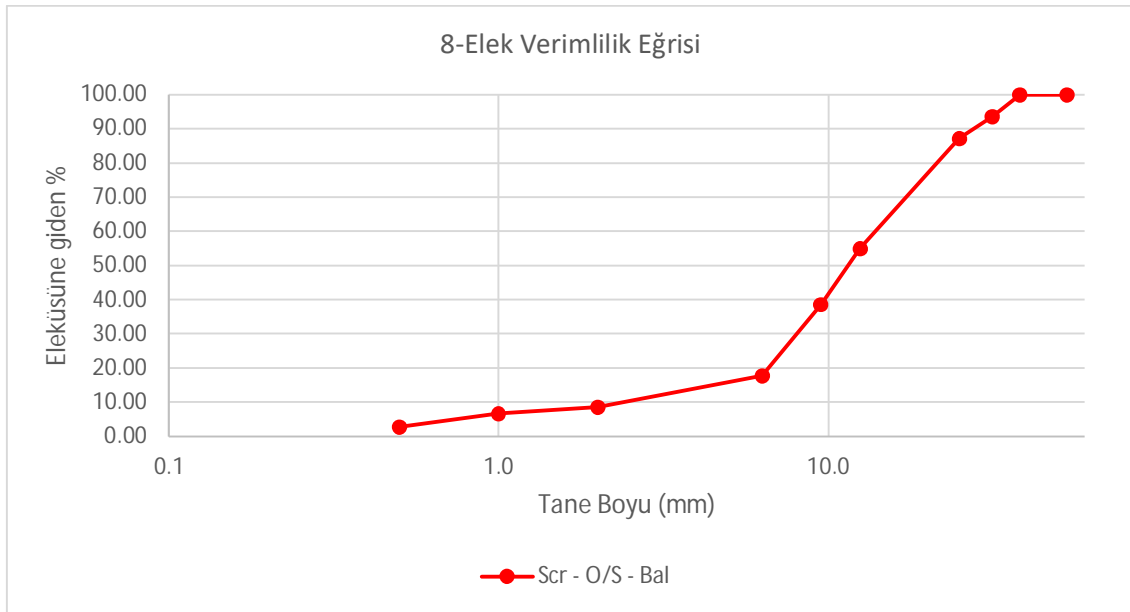


Şekil 48. Yedinci örnekleme elek verim eğrisi

-Sekizinci örnekleme koşulunda ölçülen ve madde denkliği sonrası düzeltilen boyut dağılımları ve elek verimi aşağıda gösterilmiştir.

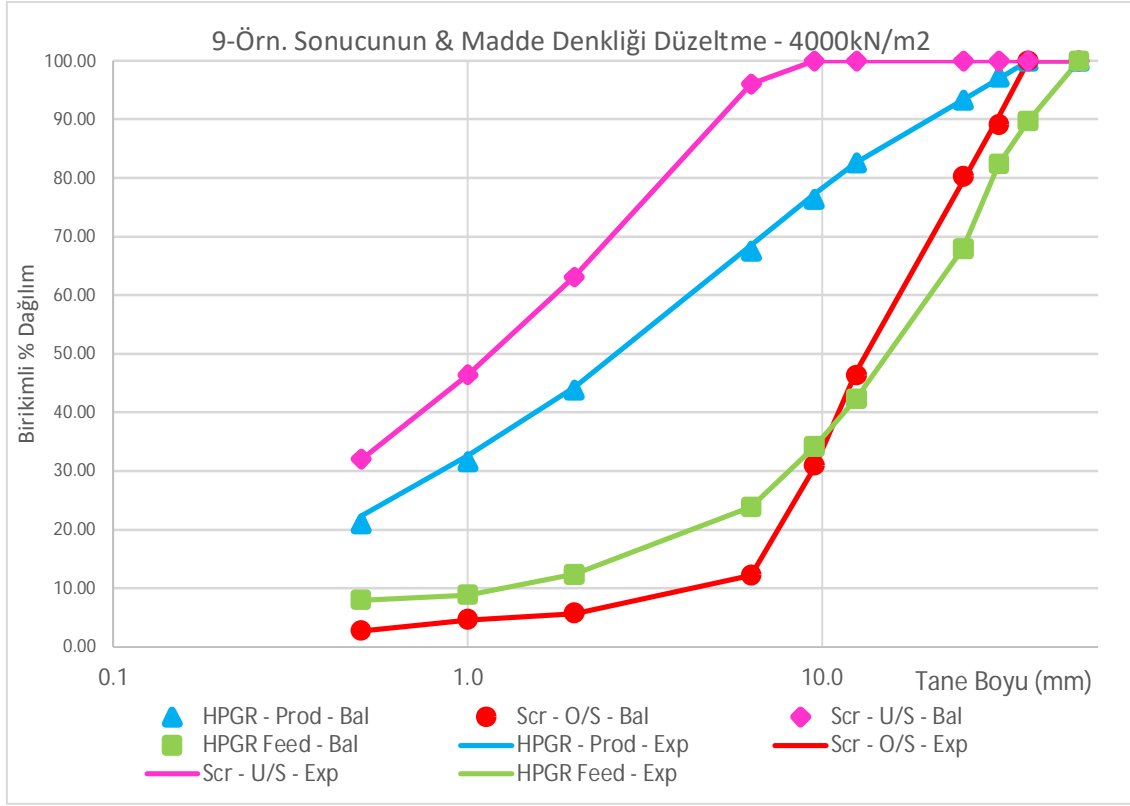


Şekil 49. Sekizinci örneklemenin ölçülen ve denklik sonrası durumu

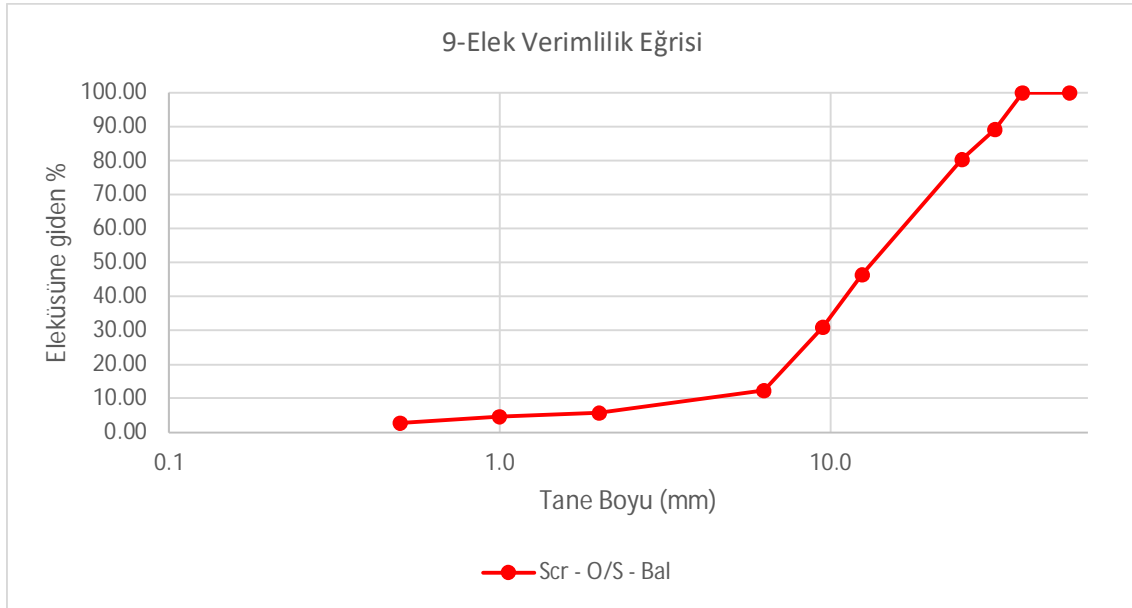


Şekil 50. Sekizinci örnekleme elek verim eğrisi

-Dokuzuncu örnekleme koşulunda ölçülen ve madde denkliği sonrası düzeltilen boyut dağılımları ve elek verimi aşağıda gösterilmiştir.

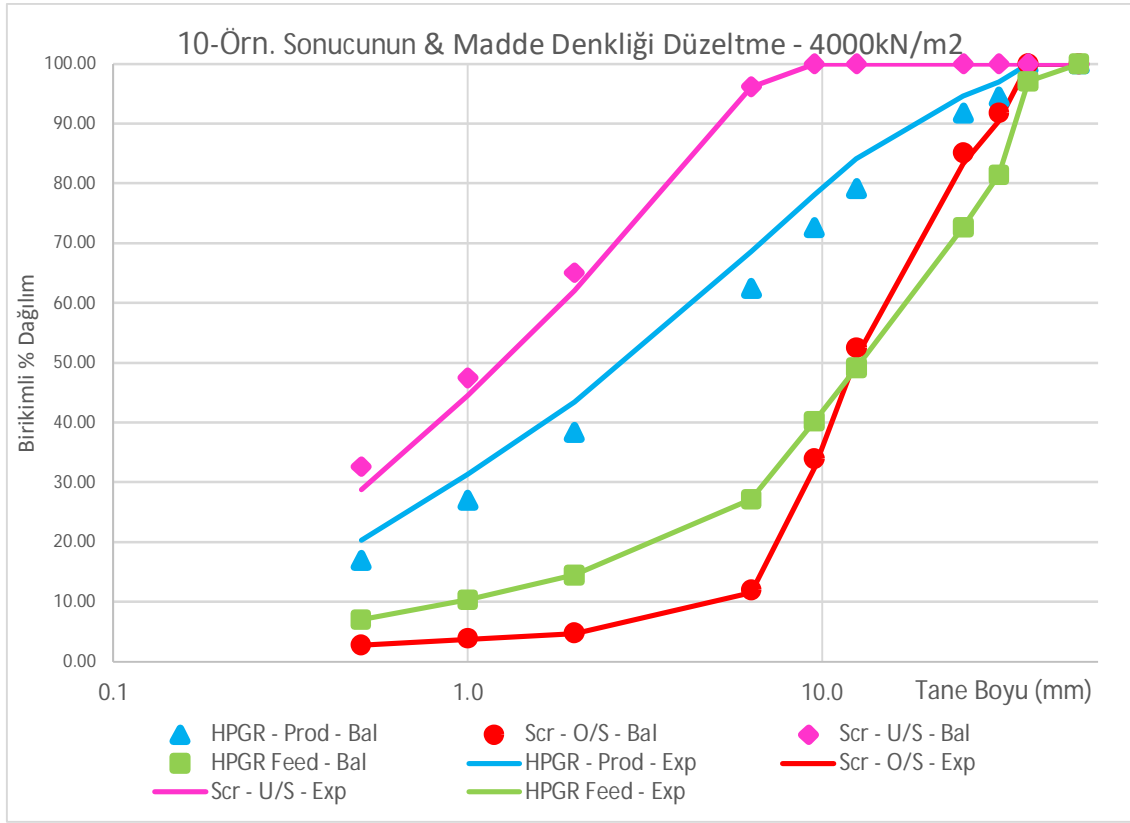


Şekil 51. Dokuzuncu örneklemenin ölçülen ve denklik sonrası durumu

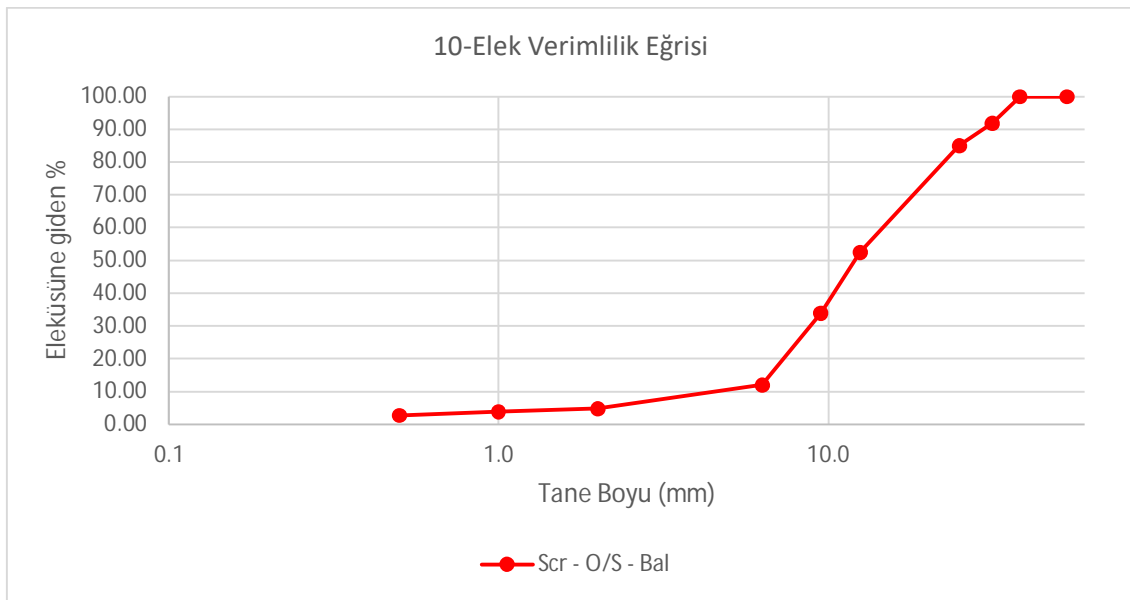


Şekil 52. Dokuzuncu örnekleme elek verim eğrisi

-Onuncu örnekleme koşulunda ölçülen ve madde denkliği sonrası düzeltilen boyut dağılımları ve elek verimi aşağıda gösterilmiştir.

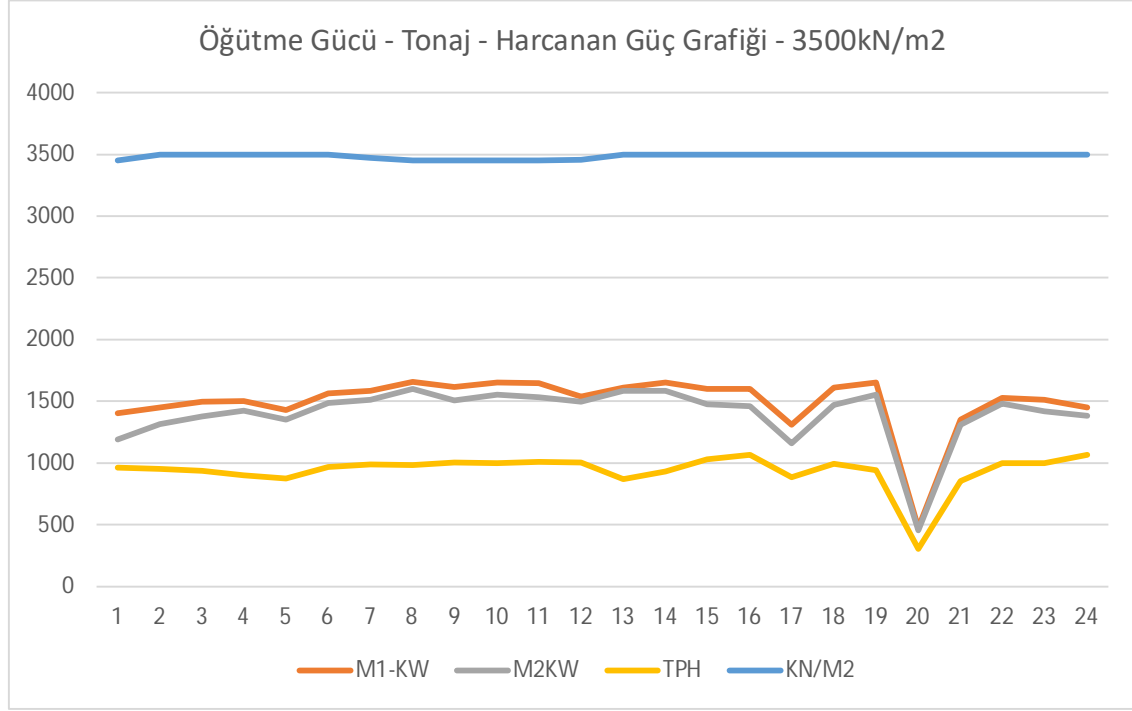


Şekil 53. Onuncu örneklemenin ölçülen ve denklik sonrası durumu



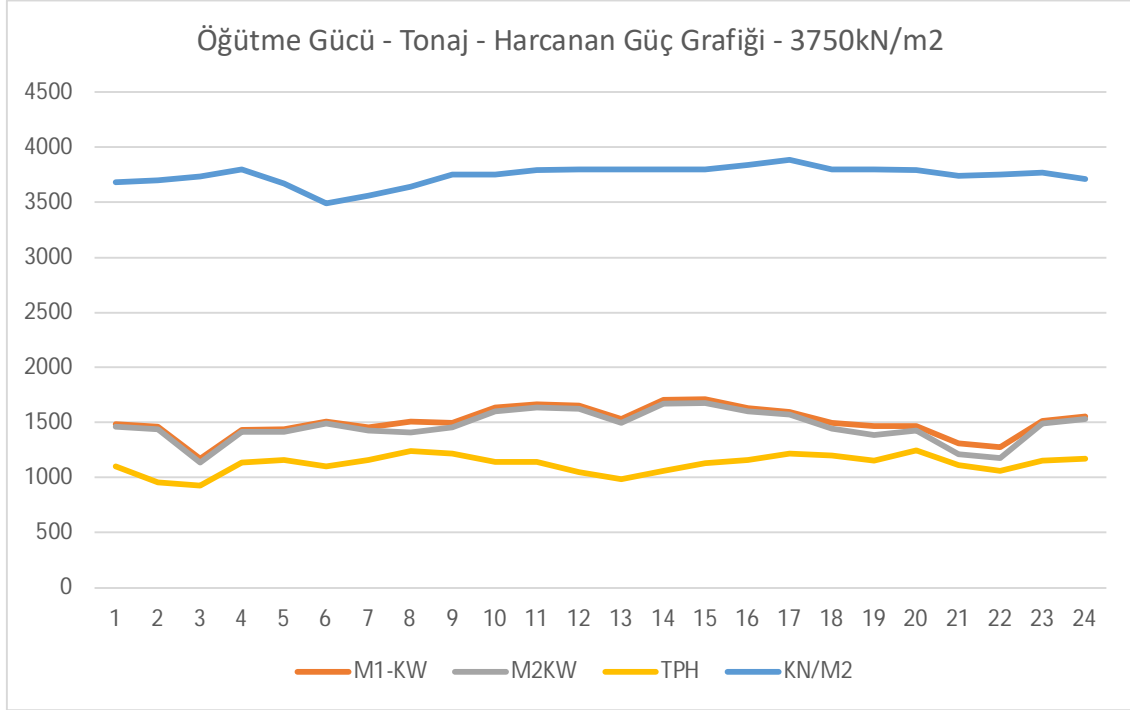
Şekil 54. Onuncu örnekleme elek verim eğrisi

10 adet örnekleme alındığı günlere ait HPGR a ait şu verilerin kayıtları otomasyon sisteminden alınmıştır. Veriler ilgili otomasyon sisteminde hergün için 86376 satır olarak çıktı alınabildiğinden bu veriler önce dakikalara göre ortalamaları alınmıştır, sonrasında saatlik bazda ortalamaları alınarak günlük trend grafiği çizilmiştir. Her spesifik basınç değerine ait bir gün belirlenerek; 3500kN/m<sup>2</sup>, 3750kN/m<sup>2</sup>, 4000kN/m<sup>2</sup> olmak üzere 3 farklı gün verileri incelenmiştir.



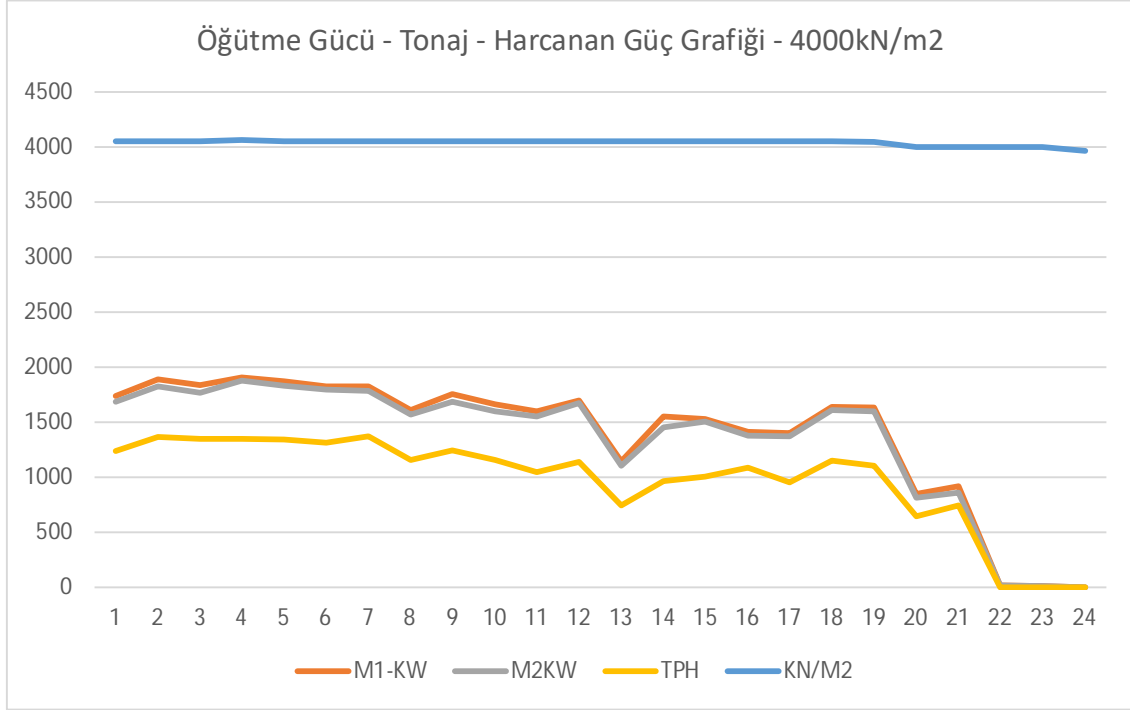
Şekil 55. 3500 kN/m<sup>2</sup> öğütme basıncında güç-tonaj grafiği

3500kN/m<sup>2</sup> spesifik öğütme basıncı ile HPGR ortalamada elek altından 938 ton/h cevher alınırken 1449 kW/h arasında bir enerji tüketmiştir. HPGR spesifik enerji tüketimi 1.54 kW/ton olarak ampirik olarak hesaplanmıştır. Bu hesaplamada ideal çalışma aralığında kalan kısımlar kullanılmış, fonksiyonel düzeltme yaptığı zaman periyotları ihmal edilmiştir.



**Şekil 56.** 3750 kN/m<sup>2</sup> öğütme basıncında güç-tonaj grafiği

3750kN/m<sup>2</sup> spesifik öğütme basıncı ile HPGR ortalamada elek altından 1148 ton/h cevher alınırken 1534 kW/h arasında bir enerji tüketmiştir. Spesifik enerji tüketimi 1.34 kW/ton olarak ampirik olarak hesaplanmıştır. Bu hesaplamada ideal çalışma aralığında kalan kısımlar kullanılmış, fonksiyonel düzeltme yaptığı zaman periyotları ihmal edilmiştir.



**Şekil 57.** 4000 kN/m<sup>2</sup> öğütme basıncında güç-tonaj grafiği

4000kN/m<sup>2</sup> spesifik öğütme basıncı ile HPGR ortalamada elek altından 1223 ton/h cevher alınırken 1714 kW/h arasında bir enerji tüketmiştir. Spesifik enerji tüketimi 1.40 kW/ton olarak ampirik olarak hesaplanmıştır. Bu hesaplamada ideal çalışma aralığında kalan kısımlar kullanılmış, fonksiyonel düzeltme yaptığı zaman periyotları ihmal edilmiştir.

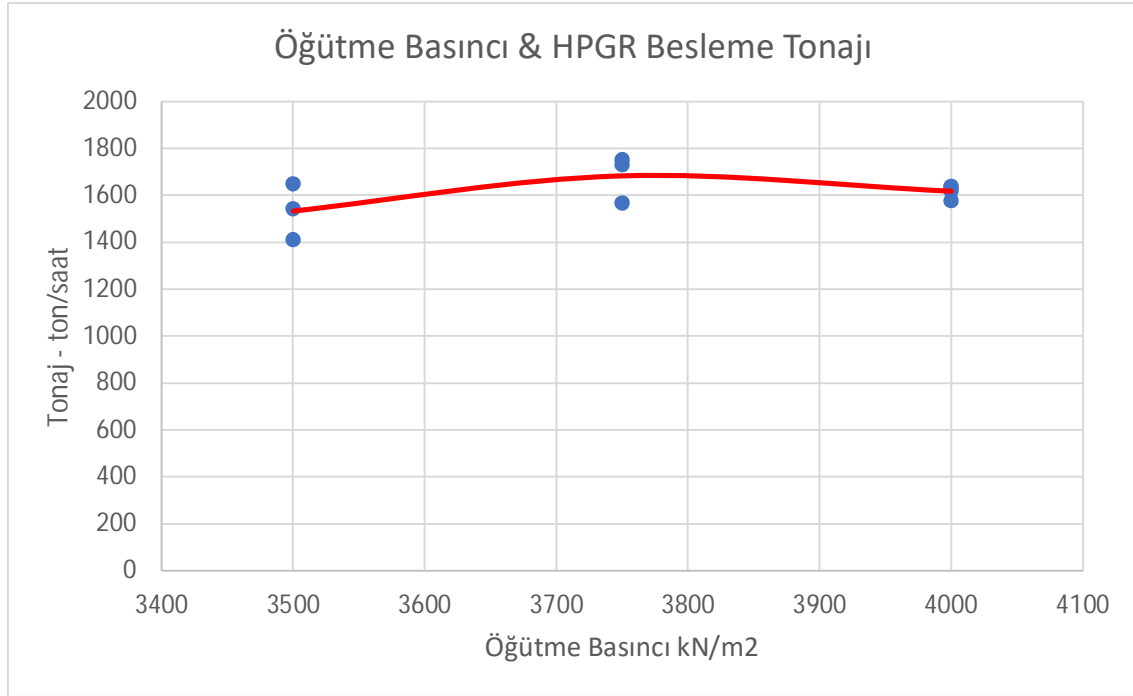
## 5. SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ

Fizibilite çalışmalarında yapılan testlerde, %50 -1,18mm boyutuna indirgenen cevherin siyanür liçi veriminin %70, tersiyer konik kırıcı ile kırılan cevherin %66 verim ile kazanıldığı tespit edilmiştir [48]. Hedef üretim, -1,18mm boyutlu ürünün maksimum olacağı çalışılabilir en yüksek kapasite değerinin sağlanması şeklinde düzenlenmektedir.

Tüm örneklemeler birlikte değerlendirildiğinde, öğütme basıncına karşı HPGR besleme tonajı ve elekaltı (ürün) tonajı Şekil 58 ve 59’da verilmektedir.

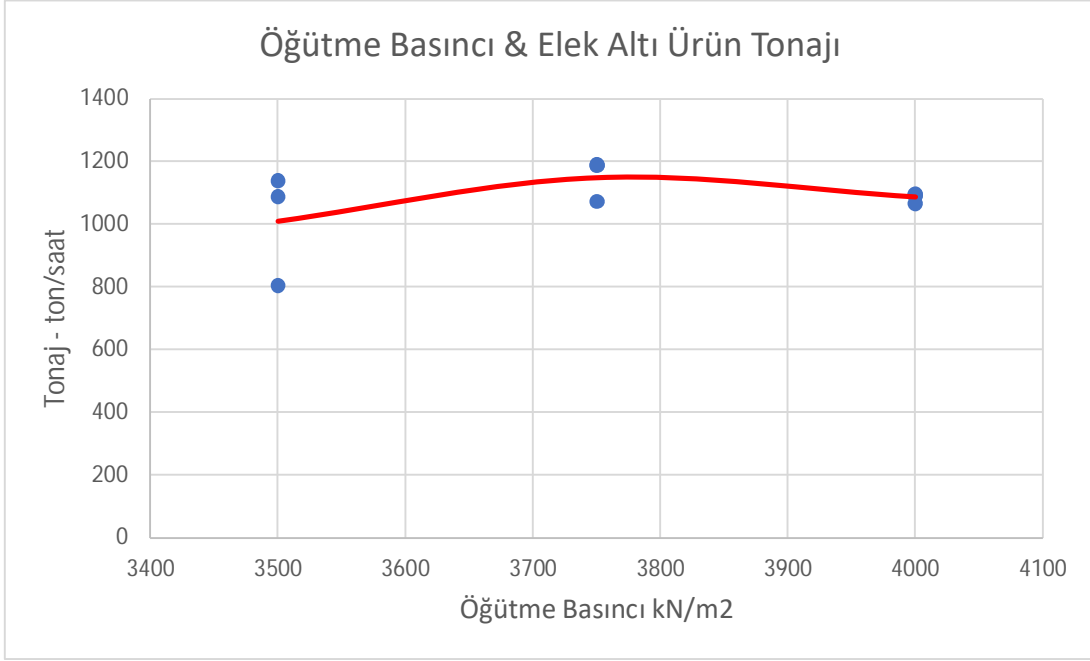
Şekiller incelendiğinde, 3750 kN/m<sup>2</sup> değerinde en yüksek kapasite değeri elde edilmektedir. Bu değer kapasite açısından optimum görünmektedir. Basıncın artışıyla, rulolar arası açıklık azaldığından, 4000 kN/m<sup>2</sup> değerinde kapasite düşmektedir.

Yüksek spesifik öğütme basıncı ile düşen tonajın hedef değere getirilmesi için merdanelerin hızlarının artırılması gerekir, lakin ana tahrik sisteminin kurulu gücü bu artışı sınırlamaktadır. Bu nedenden dolayı tonajda düşme eğilimi başlamaktadır.



Şekil 58. Öğütme basıncının HPGR besleme tonajına etkisi

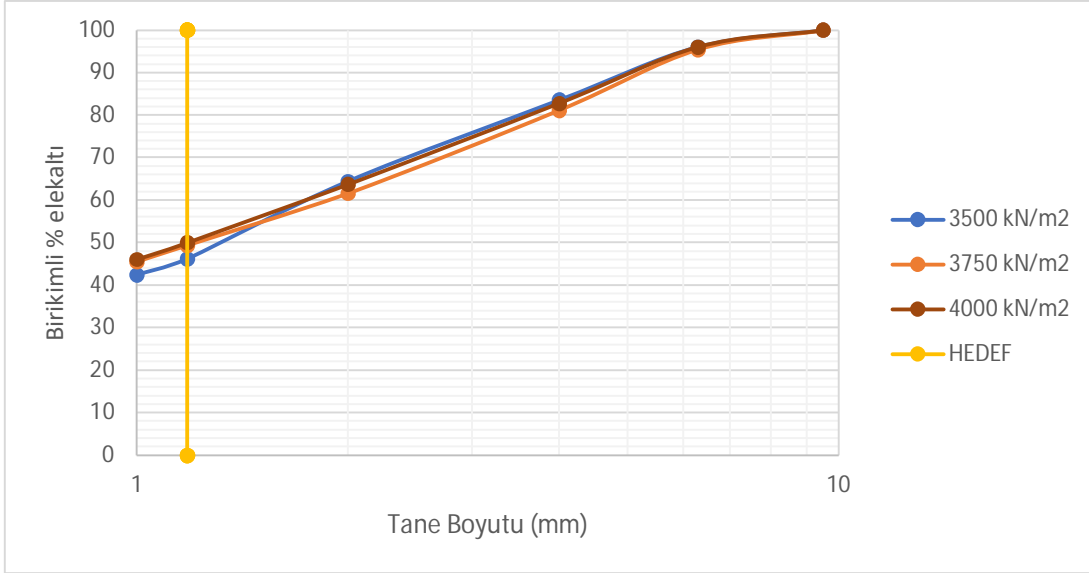




**Şekil 59.** Öğütme basıncının elek altı (ürün) tonajına etkisi

Spesifik öğütme basıncındaki artış elek altı malzemenin artmasını sağlar iken bu basıncın artması HPGR gücünüde lineer olarak artırmaktadır. Kurulu gücün yüksek basınç değerlerinde merdane hızlarının daha fazla artmasını limitlediği için 3850kN/m<sup>2</sup> spesifik öğütme basıncından sonra sınırdaki kalan sistem gücünden dolayı merdane hızlarının artırılmaması kaynaklı elek altında ince malzeme tonajının düştüğü gözlemlenmiştir. 4000kN/m<sup>2</sup> öğütme basıncında güç limitlemesinden dolayı merdane hızı düşürülmekte ve bu düşme ile ton başına harcanan enerji miktarında %5 civarında bir artış olmaktadır.

Farklı spesifik öğütme basıncı değerlerinde elde edilen elekaltı=devre ürünü boyut dağılımları Şekil 60'da verilmektedir.



Şekil 60. Farklı öğütme basıncında alınan ürüne ait tane boyut dağılımları

Elek altı ince ürün tane boyu dağılımı Şekil 60 da görüldüğü gibi dar bir aralıkta değişim göstermektedir. Basıncın artırılması elek altı -1.18mm malzeme boyutunda büyük bir artışa neden olmaz iken harcanan enerjinin artmasına ve bu sebele sistem kurulu gücünden dolayı final ürün tonajını sınırlamaktadır.

## 6. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

- Yapılan testler sonucunda 3750 kN/m<sup>2</sup> öğütme gücünde ~%50 oranında -1,18mm ürün boyutuna ulaşılmış ve öğütme gücünün daha fazla artırılması istenilen tane boyutunda malzeme miktarını artırmamış, aksine güç tüketiminin artmasına neden olmuştur.
- Optimum öğütme gücünün en büyük etkilerinden biri devreden yükün miktarı olmuştur, devreden yükün optimum düzeyde olması HPGR devresinde besleme tane boyut dağılımına gösterdiği etkiden dolayı sistem çalışırken daha az kayma ve düşük vibrasyon değerlerinde çalıştığı tespit edilmiştir.
- Öğütme gücünün optimum değerden yukarı tutulması yüksek devreden yük oluşumuna sebep olmuş ve ton başına harcanan toplam enerjinin arttığı gözlemlenmiştir.
- Öğütme gücünün artışı sistemi tahrik eden dişli kutuları üzerindeki vibrasyon değerlerinin paralel olarak arttırdığı gözlemlenmiştir. Nominal değer üzerindeki vibrasyonla çalışmanın ekipman ömrü üzerinde negatif etkisi olacağı görüldüğünden belirlenecek optimum öğütme gücü ile çalışılmalıdır.
- Ocaklardan sağlanan cevher özellikleri homojen olmadığından cevher sertliğinin değiştiği dönemlerde bu testler yenilenerek optimum çalışma gücü belirlenmelidir.
- Testler esnasında filtre sisteminde tıkanmalar gözlemlenmiş, yaptığım incelemede ezme gücü ile metal silindirlerin 40 derece üzerine çıktığı gözlemlenmiş ve bu sıcaklığı cevher içerisindeki nemi buhara çevirdiği tespit edilmiştir. Ortaya çıkan buhar toz filtre hatlarında ısı farktan dolayı yoğuşma yaparak toz emiş hatlarını tıkadığı görülmüştür.
- HPGR devrelerinde toz emiş sistemlerinde izolasyon ve belirli noktalara yoğuşma kabı ilave edilmesi gereklidir.
- Öğütme esnasında ekipman tasarımcısının belirlediği -45mm tane boyutunda daha büyük parçalar geldiğinde HPGR ekipmanın sağ sol baskı sisteminde izin verilen kaymada daha fazla miktara ulaşarak sistemi devreden çıkarmakta ve ekipman kullanılabilirlik değerinin çok düştüğü görülmüştür. Ekipmanın düzenli çalışabilmesi için homojen ve belirlenen boyutta cevher gelmesi gereklidir.
- Cevher içindeki nem arttığında HPGR üzerindeki ön haznedeki silindirler arasında akışın homojen olmadığı ve bu nedenle hareketli silindirin eşik değerlerinin üstünde kaydığı

görmüştür. %5-6 nem üzeri çalışmalarda HPGR kullanılabilirlik değerinin %80 altına düştüğü gözlemlenmiştir.

## KAYNAKLAR

- [1] Aydođan, N., Yüksek basınçlı merdaneli değirmenlerin çimento endüstrisinde performanslarının incelenmesi, Doktora Tezi, Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2006.
- [2] Aydođan, N., Ergün, L., Circuit high pressure grinding rolls (HPGR) in a cement grinding plant. Part 2: Effect of operating parameters, ZKG International, 2011.
- [3] Dündar, H., Yüksek basınçlı merdaneli değirmenlerin mineral endüstrisinde cevher öğütme performanslarının incelenmesi, Doktora Tezi, Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2012.
- [4] Aydođan, N. A., Ergün, L., & Benzer, H. , High pressure grinding rolls (HPGR) applications in the cement industry. Minerals Engineering, 2006.
- [5] Dunne, R., Maxton, D., Morrell, S., & Lane, G. , HPGR—The Australian Experience. Improving and Optimizing Operations: Things That Actually Work!, Plant Operators' Forum, 2004.
- [6] Klymowsky, R., Patzelt, N., Knecht, J., & Burchardt, E., Selection and sizing of high pressure grinding rolls. Mineral Processing Plant Design, Practice and Control Proceedings, 2002.
- [7] Makni, S., Lapointe, R., Croteau, C., & Sato, D. , Selection of HPGR Technology for the Côté Gold Project: Evaluation of the Impact on Cost and Metallurgy. SAG Conference Vancouver, Canada, 2019.
- [8] Morley, C., High pressure grinding rolls: a technology review, 3rd International Symposium Advances in Comminution, Society for Mining, Metallurgy and Exploration (SME), USA, 118-127, 2006.
- [9] Edited by Professor Alban Lynch, Comminution Handbook, The Australasian Institute of Mining and Metallurgy, Specturum Series 21, Chapter 6, 2015.
- [10] Metso:Outotec, Nordberg C Series Jaw Crusher Brochure, page 11, 2021.
- [11] Schönert, K., A first survey of grinding with high-compression roller mills. International Journal of Mineral Processing, 401–412, 1998.
- [12] Metso:Outotec, HP Series & Mp Series Cone Crusher Brochure, 6-15, 2022.

- [13] van der Meer, F. P., & Gruendken, A. , Minerals Engineering: Flowsheet considerations for optimal use of high pressure grinding rolls., Elsevier, Chapter 9, 2010
- [14] van der Meer, F. P., & Maphosa, W. , High pressure grinding moving ahead in copper, iron, and gold processing. Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 637-647, 2012.
- [15] Vanderbeek, J. L., Linde, T. B., Brack, W. S., & Marsden, J. O. , HPGR implementation at Cerro Verde. Proceedings of the SAG Conference, 27-27 September 2006, Vancouver, 45–61, 2006.
- [16] Wills, B. A. Mineral processing technology: an introduction to the practical aspects of ore treatment and mineral recovery, Elsevier , Chapter 6, 2006.
- [17] Wang, C., Nadolski, S., Mejia, O., Drozdiak, J., & Klein, B. , Energy and Cost Comparisons of HPGR-based Circuits. Engineering and Mining Journal, 102-103, 2013.
- [18] Wüstner, H. , Energy saving with the roller press comminution process. World Cement, 94-96, 1986.
- [19] Esna-Ashari & Kellerwessel, H (1988), Roller Press Comminution Improves Heap Leach Recovery. Randol Perth International Gold Conference, 28 October- 1 November 1988, Perth, 50-53, 1988.
- [20] Patzelt, Norbert, Knecht, Hans and Baum W, Advances in POLYCOM High- Pressure Roll, Grinding of Refractory Gold Ores. Randol Gold Forum, 14-17 March 1995, Perth, 107-123, 1995.
- [21] Baum W, Patzelt N, and Knecht, Johann, Metallurgical Benefits of High Pressure Roll Grinding for Gold and Copper Recovery, SME, Denver, 111-116, 1977.
- [22] Scott T , HPGR for Heap Leach at St Ives, Randol Innovative Metallurgy Forum, Perth , 21-24 August 2005, Perth, 31-39, 2005.
- [23] Klingerman, H Lutz, HPGR Benefits at Golden Queen Soledad Mountain Gold Heap Leaching Project. Randol Innovative Metallurgy Forum, Perth, August 21 – 24, 2005.
- [24] Baum, Wolfgang, Patzelt, N. and Knecht, Johann "The use of HPGR for optimization of copper leaching", SME, Phoenix, 96-98, 1996.

- [25] Vanderbeek, J.L., Linde, T.B., Brack, W.S., Marsden, J.O., 2006, HPGR implementation at Cerro Verde, SAG 2006 Conference, Vancouver, 45-61, 2006.
- [26] Esna-Ashari, M. and Kellerwessel, H. Interparticle crushing of gold ore improves leaching. Randol Gold Forum, 23-24 January 1988, Scottsdale, 141-146, 1988.
- [27] Esna-Ashari, M. and Kellerwessel, H., Roller press comminution improves heap leach recovery. Randol Perth International Gold Conference, Perth, 28 October – 1 November 1988, Perth, 50-53, 1988.
- [28] Klingmann, H. Lutz, HPGR benefits at Golden Queen Soledad Mountain gold heap leaching project. Randol Innovative Metallurgy Forum, Perth, 21-24 August 2005, Perth, 2005.
- [29] Knecht, J. , High pressure grinding rolls – Adding value to the platinum industry, 3-7 October 2004, Sun City - South Africa, 2004.
- [30] Mosher, John, PT Freeport Indonesia – HPGR Project. Mini presentation & panel discussion, Randol HPGR Workshop, Perth - W. Australia, 22 August 2005, Perth - W. Australia, 2005.
- [31] Stephen Juras, Richard Miller, Paul Skayman, Technical Report for the Kışladağ Gold Mine, Turkey, Eldorado Gold, Chapter 19, 2010.
- [32] Eldorado Gold Corporation, Technical Report for the Kışladağ Gold Mine, Turkey, Eldorado Gold, Chapter 20, 2020.
- [33] Kellerwessel, H., High pressure material bed comminution in practice, Zement-Kalk-Gips, 57-64, 1990.
- [34] Otte, O., Polycor high pressure grinding principles and industrial application, Proc. of the Third Mill Operator's Conference, Australia, 131-136, 1988.
- [35] Parker, B., Rowe, P., Lane, G., Morrell, S., The decision of opt for high- pressure grinding rolls for the Boddington expansion, SAG 2001 , Vancouver, 93-106, 2001.
- [36] Alacer Gold, Çöpler Mine Technical Report Erzincan Province, Turkey, Alacer Gold, Chapter 17, 2016.
- [37] Srk Consulting, Himmetdede Resources and Rezerves Volume 6, Koza Altın İşletmeleri A.Ş. , Chapter 2, 2015.

- [38] PT Merdeka Copper Gold Tbk., Tujuh Bukit Oxide Heap Leach Project Update: Metallurgy & Ore Processing , PT Merdeka Copper Gold Tbk. , Chapter 5, 2015.
- [39] M3 Engineering & Technology of Tucson, AZ, NI 43-101 Technical Report Preliminary Feasibility Study , St. Augustine Gold & Copper , Chapter 17, 2013.
- [40] Schönert, K., Aspects of the physics of breakage relevant to comminution, Fourth Tewksbury Symposium, University of Melbourne, 12-14 February 1979, Melbourne, 3.1-3.30, 1979.
- [41] Rock Solid Resources (RPA), TECHNICAL REPORT ON THE LAGUNAS NORTE MINE, LA LIBERTAD REGION, PERU (NI 43-101 Report), Barrick Gold Corporation , Chapter 17, 2016.
- [42] Michael McClintock, "Validation of Methodologies for Sizing a High Pressure Grinding Roll", Master Thesis, University of Nevada, Reno, 2011.
- [43] Schönert, K., Lubjuhn, U., Angle of compression and throughput in high- pressure grinding, Zement-Kalk-Gips, 34-39, 1993.
- [44] Schönert, K., The influence of particle bed configurations and confinements on particle breakage, Int.J. of Mineral Processing, 1-16, 1996.
- [45] Schönert, K, Sander, U, 2002, Shear stresses and material slip in high pressure roller mills, Powder Technology, 136-144, 2002.
- [46] Tulio Junqueira Marques, Assessment and Modelling of Quaternary and Quinary HPGR Performance for Iron Ore Applications, Doktora Tezi, THE UNIVERSITY OF BRITISH COLUMBIA THE FACULTY OF GRADUATE AND POSTDOCTORAL STUDIES , Vancouver, 2020.
- [47] Persio Pellegrini Rosario, Comminution Circuit Design and Simulation for the Development of a Novel High Pressure Grinding Roll Circuit, Master Tezi, The University of British Columbia The Faculty of Graduate Studies -Mining Engineering, Vancouver, 2010.
- [48] Kappes, Cassidy & Associates NI43-101 Feasibility Study of the İvrindi Gold Project, İvrindi, Turkey, Tümad Madencilik ve Ticaret A.Ş. , Chapter 13, 2016.



## EKLER

Ek 1. 1.Numune: 3500 kN/m<sup>2</sup> öğütme gücünde alınan numunenin elek analizi

Size (mm)	HPGR - Prod	Scr - O/S	Scr - U/S	HPGR Feed
53	100,00	100,00	100,00	100,00
38,1	100,00	100,00	100,00	100,00
31,5	98,34	96,14	100,00	81,78
25	96,24	91,26	100,00	72,06
12,5	83,79	62,31	100,00	47,71
9,5	77,69	48,11	100,00	41,14
6,3	68,76	32,56	96,06	33,12
2	44,91	19,15	64,34	18,56
1	32,39	14,04	46,24	12,94
0,5	22,75	11,05	31,58	10,00

Ek 2. 2.Numune: 3500 kN/m<sup>2</sup> öğütme gücünde alınan numunenin elek analizi

Size (mm)	HPGR - Prod	Scr - O/S	Scr - U/S	HPGR Feed
53	100,00	100,00	100,00	100,00
38,1	100,00	100,00	100,00	85,46
31,5	95,68	87,66	100,00	79,43
25	91,96	81,75	100,00	72,51
12,5	80,40	51,78	100,00	52,10
9,5	74,60	34,86	100,00	42,03
6,3	64,73	14,09	96,08	29,74
2	39,57	7,38	62,90	16,14
1	27,36	5,96	45,19	11,28
0,5	20,00	5,00	30,50	9,00

Ek 3. 3.Numune: 3500 kN/m<sup>2</sup> öğütme gücünde alınan numunenin elek analizi

Size (mm)	HPGR - Prod	Scr - O/S	Scr - U/S	HPGR Feed
53	100,00	100,00	100,00	100,00
38,1	100,00	100,00	100,00	100,00
31,5	100,00	92,94	100,00	97,39
25	98,47	85,07	100,00	82,79
12,5	88,52	47,16	100,00	74,32
9,5	81,62	30,90	100,00	44,43

6,3	70,06	14,19	94,61	34,08
2	43,30	7,67	60,76	23,40
1	30,52	5,97	43,91	12,56
0,5	22,00	5,00	30,56	9,03

Ek 4. 4.Numune: 3750 kN/m<sup>2</sup> öğütme gücünde alınan numunenin elek analizi

Size (mm)	HPGR - Prod	Scr - O/S	Scr - U/S	HPGR Feed
53	100,00	100,00	100,00	100,00
38,1	100,00	100,00	100,00	94,23
31,5	98,23	94,36	100,00	80,61
25	97,12	90,80	100,00	73,22
12,5	85,00	52,14	100,00	40,53
9,5	79,43	34,35	100,00	31,68
6,3	69,89	13,04	95,84	22,24
2	45,27	6,14	63,13	11,46
1	32,60	4,89	45,25	8,06
0,5	22,47	4,11	30,85	6,00

Ek 5. 5.Numune: 3750 kN/m<sup>2</sup> öğütme gücünde alınan numunenin elek analizi

Size (mm)	HPGR - Prod	Scr - O/S	Scr - U/S	HPGR Feed
53	100,00	100,00	100,00	100,00
38,1	100,00	100,00	100,00	100,00
31,5	95,62	98,54	100,00	98,97
25	93,09	88,99	100,00	90,29
12,5	83,66	48,35	100,00	81,75
9,5	77,69	32,07	100,00	53,96
6,3	67,58	11,41	95,41	43,84
2	42,90	4,46	61,63	30,16
1	30,43	3,64	44,52	15,57
0,5	22,00	3,00	30,50	7,50

Ek 6. 6.Numune: 3750 kN/m<sup>2</sup> öğütme gücünde alınan numunenin elek analizi

Size (mm)	HPGR - Prod	Scr - O/S	Scr - U/S	HPGR Feed
53	100,00	100,00	100,00	100,00
38,1	100,00	100,00	100,00	84,64
31,5	98,08	90,36	100,00	72,47

25	97,40	81,84	100,00	61,65
12,5	87,65	45,58	100,00	31,49
9,5	82,20	27,40	100,00	22,83
6,3	71,99	7,64	94,85	13,63
2	45,06	3,38	59,20	6,58
1	31,65	2,84	42,08	4,82
0,5	19,00	2,75	28,73	4,50

Ek 7. 7.Numune: 4000 kN/m<sup>2</sup> öğütme gücünde alınan numunenin elek analizi

Size (mm)	HPGR - Prod	Scr - O/S	Scr - U/S	HPGR Feed
53	100,00	100,00	100,00	100,00
38,1	100,00	100,00	100,00	92,16
31,5	94,57	83,93	100,00	89,17
25	92,30	76,26	100,00	80,13
12,5	77,57	42,95	100,00	52,07
9,5	71,28	26,63	100,00	39,95
6,3	61,91	9,20	96,01	26,59
2	37,65	4,33	64,49	13,12
1	26,13	3,55	46,73	9,30
0,5	17,50	2,80	32,05	8,00

Ek 8. 8.Numune: 4000 kN/m<sup>2</sup> öğütme gücünde alınan numunenin elek analizi

Size (mm)	HPGR - Prod	Scr - O/S	Scr - U/S	HPGR Feed
53	100,00	100,00	100,00	100,00
38,1	100,00	100,00	100,00	95,75
31,5	88,76	93,54	100,00	85,72
25	86,19	87,15	100,00	75,69
12,5	74,16	54,95	100,00	47,70
9,5	67,86	38,60	100,00	36,79
6,3	58,87	17,75	96,02	24,53
2	37,61	8,56	63,71	12,32
1	27,11	6,64	46,06	8,94
0,5	17,50	2,80	31,68	8,00

Ek 9. 9.Numune: 4000 kN/m2 öğütme gücünde alınan numunenin elek analizi

Size (mm)	HPGR - Prod	Scr - O/S	Scr - U/S	HPGR Feed
53	100,00	100,00	100,00	100,00
38,1	100,00	100,00	100,00	89,71
31,5	97,18	89,11	100,00	82,38
25	93,24	80,28	100,00	67,95
12,5	82,58	46,37	100,00	42,36
9,5	76,38	30,97	100,00	34,20
6,3	67,57	12,25	96,03	23,89
2	43,80	5,76	63,13	12,38
1	31,65	4,68	46,40	8,87
0,5	21,00	2,80	32,07	8,00

Ek 10. 10.Numune: 4000 kN/m2 öğütme gücünde alınan numunenin elek analizi

Size (mm)	HPGR - Prod	Scr - O/S	Scr - U/S	HPGR Feed
53	100,00	100,00	100,00	100,00
38,1	100,00	100,00	100,00	97,08
31,5	94,42	91,83	100,00	81,46
25	91,81	85,09	100,00	72,65
12,5	79,12	52,52	100,00	49,14
9,5	72,62	33,99	100,00	40,23
6,3	62,43	12,02	96,16	27,13
2	38,36	4,84	65,07	14,48
1	27,01	3,92	47,52	10,37
0,5	17,00	2,80	32,63	7,00

Ek 11. 3500 kN/m2 öğütme gücünde yapılan çalışmaya ait saatlik ortalama çalışma verileri

SAAT	M1-KW	M2KW	TPH	KN/M2	Gap-mm	Bar	Speed	mm-D	mm-ND
1	1404	1190	961	3453	44.34	130.11	14.65	43.08	45.61
2	1450	1317	953	3500	42.26	129.86	14.65	41.06	43.46
3	1495	1379	936	3500	40.38	128.20	14.65	39.21	41.56
4	1504	1422	900	3500	38.74	127.81	14.65	37.57	39.92
5	1431	1351	874	3500	39.46	126.88	14.68	38.54	40.38
6	1562	1487	966	3500	40.70	129.43	15.63	39.46	41.94
7	1583	1514	989	3473	41.12	129.90	15.91	39.83	42.42
8	1658	1603	983	3450	38.89	129.76	16.46	37.85	39.92
9	1613	1505	1006	3450	42.30	129.88	16.05	40.88	43.72
10	1651	1556	998	3450	40.39	129.98	16.26	39.08	41.71
11	1646	1533	1011	3450	42.10	129.86	16.42	40.84	43.36
12	1540	1498	1004	3457	40.19	128.37	16.31	39.21	41.18
13	1610	1585	870	3500	36.32	129.51	15.95	35.32	37.33
14	1651	1585	932	3500	38.30	129.67	16.06	37.24	39.37
15	1598	1477	1028	3500	43.54	129.94	16.36	42.01	45.07
16	1601	1462	1064	3500	43.80	130.00	16.47	42.45	45.15
17	1313	1157	887	3500	41.83	124.22	15.22	40.79	42.86
18	1608	1473	991	3500	40.66	133.60	15.58	39.53	41.79
19	1649	1551	943	3500	36.70	132.39	15.62	35.38	38.02
20	477	455	307	3500	30.11	103.73	13.26	29.81	30.40
21	1351	1312	852	3500	35.87	118.53	14.76	34.72	37.03
22	1529	1481	999	3500	37.00	122.02	15.63	35.67	38.33
23	1511	1419	999	3500	39.61	122.43	15.63	38.25	40.97
24	1449	1384	1069	3500	43.54	122.38	15.82	42.31	44.77

Ek 12. 3750 kN/m<sup>2</sup> öğütme gücünde yapılan çalışmaya ait saatlik ortalama çalışma verileri

SAAT	M1-KW	M2KW	TPH	KN/M2	Gap-mm	Bar	Speed	mm-D	mm-ND
1	1484	1464	1100	3683	48.08	139.71	15.48	46.66	49.50
2	1460	1438	955	3700	41.94	132.62	14.90	40.64	43.24
3	1177	1136	930	3733	50.13	134.17	13.11	49.01	51.25
4	1434	1418	1137	3800	51.99	139.06	15.32	50.53	53.44
5	1437	1418	1161	3673	52.39	141.13	15.82	51.12	53.66
6	1508	1488	1099	3488	47.27	141.06	15.63	46.03	48.52
7	1457	1426	1164	3560	52.21	141.96	15.87	51.20	53.22
8	1509	1413	1244	3643	55.02	142.99	16.09	53.73	56.30
9	1496	1455	1218	3749	51.17	140.91	16.11	49.96	52.38
10	1635	1602	1143	3750	44.19	139.12	16.59	43.13	45.26
11	1663	1638	1138	3794	45.13	139.01	16.62	44.07	46.18
12	1653	1627	1051	3800	42.59	139.32	15.88	41.48	43.71
13	1529	1499	983	3800	42.40	137.53	15.56	41.27	43.52
14	1703	1672	1060	3800	42.51	139.58	16.31	41.67	43.35
15	1712	1680	1129	3800	44.95	139.51	16.77	43.91	46.00
16	1632	1601	1163	3839	48.61	141.12	16.60	47.61	49.61
17	1596	1575	1220	3887	49.20	139.88	16.68	48.21	50.20
18	1495	1448	1205	3800	51.36	137.70	16.61	50.17	52.56
19	1468	1388	1154	3800	50.30	137.33	16.61	49.15	51.45
20	1468	1425	1250	3790	54.49	137.55	16.99	53.50	55.47
21	1315	1215	1112	3739	50.94	135.36	16.60	50.28	51.61
22	1275	1176	1057	3750	50.06	132.77	16.15	49.30	50.81
23	1515	1493	1153	3768	46.62	133.88	16.19	45.37	47.87
24	1554	1534	1175	3714	46.61	133.63	16.82	45.21	48.00

Ek 13. 4000 kN/m<sup>2</sup> öğütme gücünde yapılan çalışmaya ait saatlik ortalama çalışma verileri

SAAT	M1-KW	M2KW	TPH	KN/M2	Gap-mm	Bar	Speed	mm-D	mm-ND
1	1741	1684	1241	4050	39.92	150.45	18.06	38.62	41.22
2	1893	1825	1365	4050	39.12	152.18	18.53	37.67	40.57
3	1839	1771	1347	4050	39.91	152.15	18.43	38.65	41.17
4	1912	1883	1351	4066	37.41	149.77	18.50	36.33	38.50
5	1874	1834	1345	4050	37.71	150.67	18.51	36.34	39.08
6	1828	1800	1317	4050	38.73	151.32	18.24	37.58	39.89
7	1826	1785	1373	4050	41.31	152.05	18.19	40.01	42.61
8	1607	1572	1156	4050	38.34	149.55	16.32	36.96	39.71
9	1756	1687	1243	4050	37.98	150.22	16.99	36.63	39.34
10	1663	1600	1156	4050	35.38	143.23	16.42	34.36	36.39
11	1599	1553	1048	4050	34.85	141.87	15.67	33.82	35.88
12	1697	1672	1136	4050	35.91	142.55	16.80	34.58	37.24
13	1146	1104	747	4050	32.28	124.43	14.39	31.50	33.05
14	1552	1456	967	4050	34.64	139.73	14.93	33.39	35.89
15	1529	1503	1005	4050	36.60	141.35	14.78	35.26	37.95
16	1416	1376	1086	4050	39.86	137.95	16.19	39.11	40.61
17	1402	1375	955	4050	38.18	132.43	15.43	37.38	38.98
18	1641	1613	1152	4050	37.24	136.55	16.97	36.00	38.49
19	1631	1600	1105	4044	35.51	134.53	16.75	34.27	36.74
20	851	814	644	4000	33.01	121.78	13.92	32.21	33.81
21	920	861	746	4000	39.29	130.88	12.44	38.37	40.21
22	16	16	0	4000	27.35	99.01	10.74	27.18	27.52
23	10	11	0	4000	27.83	69.51	6.53	27.32	28.35
24	0	0	0	3967	28.57	18.26	0.00	27.49	29.66

Ek 14. Örneklere ait besleme tonajı, elek üstü tonajı, elek altı tonajına ait tablo

Grinding Pressure	Elek Altı 6mm Yüzdesi	Elek Üstü 6mm Yüzdesi	Elek Altı Küçültme Oranı (P80)	Elek Altı Küçültme Oranı (P50)	HPGR Besleme Tonajı (ton)	Elek Üstü Tonajı (ton)	Elek Altı Tonajı (ton)
3500	7,74046	20,23660	3,35713	2,22751	1410	606,49723	804
3500	10,27690	4,64662	2,98914	1,99485	1544	455,88500	1088
3500	13,12349	6,30517	2,84499	2,01580	1649	510,58607	1138
3750	10,18615	5,76141	3,03926	2,08196	1731	542,52263	1188
3750	10,55465	5,44989	2,99345	2,19795	1752	565,12355	1187
3750	11,54084	3,65421	2,91689	2,12890	1568	495,37130	1073
4000	9,03410	4,26248	3,68604	2,28064	1619	525,32220	1094
4000	9,11368	6,96855	3,26815	2,26253	1639	549,17336	1090
4000	9,13671	5,72425	3,41620	2,27573	1632	535,43376	1097
4000	9,20653	5,37658	3,18795	2,18953	1578	512,02863	1066