

**ENDÜSTRİYEL BİR YARI OTOJEN ÖĞÜTME
DEVRESİNİN PERFORMANSININ
DEĞERLENDİRİLMESİ**

**EVALUATION OF THE PERFORMANCE OF AN
INDUSTRIAL SAG MILL GRINDING CIRCUIT**

ZAFER DEMİRTAŞ

PROF. DR Ş. LEVENT ERGÜN

Tez Danışmanı

Hacettepe Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim - Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin

Maden Mühendisliği Anabilim Dalı için Öngördüğü

YÜKSEK LİSANS TEZİ

olarak hazırlanmıştır.

ÖZET

ENDÜSTRİYEL BİR YARI OTOJEN ÖĞÜTME DEVRESİ PERFORMANSININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Zafer Demirtaş

Yüksek Lisans, Maden Mühendisliği Bölümü

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Ş. Levent Ergün

Mayıs 2022, 59 sayfa

Bu tez çalışması kapsamında, endüstriyel yarı otojen öğütme devresinden alınan numuneler ile performans değerlendirme çalışması gerçekleştirilmiştir. Öğütme devresinde yarı otojen değirmen ve bilyalı değirmen ile kapalı devre çalışan olmak üzere iki farklı hidrosiklon grubu bulunmaktadır. Tesisten alınan numuneler %katı ve elek analizleri sonrası madde denkliği çalışması gerçekleştirilmiştir. Alınan numuneler ile cevherin öğütülebilirlik parametrelerini belirlemek üzere ağırlık düşürme, aşınma ve Bond testi gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen ağırlık düşürme ve aşınma sonucunda testi A, b ve ta parametreleri sırasıyla 63.26, 1.33, 0.44 olarak bulunmuştur. Bond iş indeksi değeri ise 13.77 kWs/t olarak hesaplanmıştır. Birinci hidrosiklon grubunda kaçak malzeme miktarı %62 olarak hesaplanırken, bilyalı değirmen ile kapalı devre çalışan hidrosiklon grubunda ise bu değer %30 olarak hesaplanmıştır. Yarı otojen değirmende bulunan kapasite artışı için yeterli marj ve bilyalı değirmen devreden yükünün artırılması ile tüm devrenin kapasitesinin artırabileceği tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Öğütme, Yarı Otojen Değirmen, Performans Değerlendirme

ABSTRACT

EVALUATION OF THE PERFORMANCE OF AN INDUSTRIAL SAG MILL GRINDING CIRCUIT

Zafer Demirtaş

Master of Science, Department of Mining Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Ş. Levent Ergün

May 2022, 59 pages

Within the scope of this study, a performance evaluation was carried out with the samples obtained from the industrial semi-autogenous grinding circuit. There are two different hydrocyclones groups in the grinding circuit operating with semi-autogenous mill and ball mill as closed circuit. The samples taken from the grinding circuit were analyzed in terms of solid percentage (%) and particle size distribution as well as for the mass balance studies. In order to determine the grindability parameters of the studied samples, drop weight, abrasion and Bond tests were conducted. As a result of weight reduction and wear test, A, b and t_a parameters were found to be 63.26, 1.33, 0.44, respectively. Bond work index value was calculated as 13.77 kWh/t. While the amount of bypass material was calculated as 62% in the first hydrocyclones group, this value was calculated as 30% in the hydrocyclones group operating in a closed circuit with a ball mill. It has been determined that the capacity of the entire circuit can be increased by increasing the ball mill rotating load and sufficient margin for the capacity increase in the semi-autogenous mill.

Keywords: Grinding, SAG Mill, Performance Analysis.

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam boyunca bilgi, ve tecrübesiyle yol göstermiş, karşılaştığım tüm zorlukların üstesinden gelmem için desteğini esirgememiş olan tez danışmanım Sayın Prof. Dr. Ş. Levent Ergün'e

Numune alma aşamasından başlamak üzere tez çalışmamın her aşamasında bana yardımcı olan, desteğini her fırsatta sunan ve yol gösteren kıymetli hocalarım Sayın Doç. Dr. Özgür Özcan'a ve Öğr. Gör. Dr. E. Caner Orhan'a

Tez çalışmamda kullanmış olduğum numunenin temini ve tesis çalışmalarındaki tüm katkılarından dolayı Zenit Madencilik A.Ş. Balıkesir Sındırgı işletmesindeki tüm yönetici ve çalışan kadrolarına,

Deneysel çalışmalarım için laboratuvar imkanlarını sunan ve çalışmam boyunca destek olan Ersel Ağır Makina A.Ş. yönetici ve çalışanlarına,

Her zaman yanımda olan ve tüm eğitim hayatım boyunca destek olan, yanımda benimle birlikte olduklarını bildiğim annem Şerife Demirtaş'a ve babam Orhan Demirtaş'a

Çok değerli arkadaşlarım Gizem Aslan, Melis Baydar, Mert Aytaç ve Furkan Şahin Şahiner'e her zaman her koşulda yanımda oldukları ve desteklerini hiçbir zaman esirgemedikleri için

En içten duygularıyla teşekkürü bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER.....	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vi
ÇİZELGELER DİZİNİ	vii
1. GİRİŞ	1
2. Literatür.....	5
2.1. Döner Değirmenler.....	6
2.1.1 Çubuklu Değirmenler	8
2.1.2. Bilyalı Değirmenler.....	9
2.1.3. Otojen/Yarı Otojen Değirmenler.....	10
2.1.4. Çakıl Değirmenler	13
2.2. Karıştırmalı Değirmenler	14
2.3. Sınıflandırıcılar.....	15
2.4. Öğütme Devreleri.....	18
2.5. Performans Değerlendirme	20
2.5.1. İş İndeksi Verimliliği	20
2.5.2. Ağırlık Düşürme Yöntemi.....	21
2.5.3. SMC Test Yöntemi.....	23
3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR VE SONUÇLAR	27
3.1. Numune Alma Çalışmaları.....	27
3.2. Madde Denkliği Çalışmaları	31
3.3. Ağırlık Düşürme Testi.....	36
3.4. Aşınma Testi	41
3.5. Bond Öğütülebilirlik Testi	42
4. SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ.....	44
4.1. Yarı Otojen Değirmen Performans Değerlendirmesi.....	44

4.2. Bilyalı Değirmen Performans Değerlendirmesi	46
4.3. Hidrosiklonların Performans Değerlendirmesi	47
5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	50
6. KAYNAKLAR	51
EKLER.....	56
ÖZGEÇMİŞ	60

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1 Öğütme Tarihi (25)	5
Şekil 2.2 Cevher hazırlamada ana akım teknolojilerin boyut küçültme aralığı (26).....	6
Şekil 2.3 Değirmen içerisindeki bilya hareketi (29)	7
Şekil 2.4 Tipik bir yarı otojen değirmen şematik gösterimi (40).....	13
Şekil 2.5 Hidrosiklon alt akış a) şemsiye b) ip şeklinde akış.....	17
Şekil 2.6 Kapalı devre yarı otojen değirmen devresi	19
Şekil 2.7 JKMRC ağırlık düşürme test cihazı (17)	21
Şekil 2.8 t10 ve Ecs arasındaki ilişki.....	23
Şekil 2.9 Hidrosiklon performans eğrisi	25
Şekil 3.1 Tesis akım şeması ve numune alma noktaları.....	27
Şekil 3.2 Numune alma işlemi sırasında yarı otojen değirmen besleme miktarı	29
Şekil 3.3 C'nin değerlerine karşı bileşen hatalarının karelerinin toplamının grafiği (54)	32
Şekil 3.4 Madde denkliği çalışması sonuçlarının akışlar üzerinde gösterimi	32
Şekil 3.5 Yarı otojen değirmen ölçüm ve denkleştirilmiş boyut dağılımları	33
Şekil 3.6 Birincil siklon ölçüm ve denkleştirilmiş tane boyu dağılımları	34
Şekil 3.7 Bilyalı değirmen ölçüm ve denkleştirilmiş tane boyu dağılımları	34
Şekil 3.8 İkincil siklon ölçüm ve denkleştirilmiş tane boyu dağılımları.....	35
Şekil 3.9 Siklon üst akımları ve devre ürünü ölçüm ve denkleştirilmiş tane boyu dağılımları	36
Şekil 3.10 Ağırlık düşürme test cihazı (Ersel Ağır Makina A.Ş.).....	37
Şekil 3.11 Ağırlık düşürme testi sonucunda elde edilen ürün tane boyu dağılımları.....	39
Şekil 3.12 tn(%) ve t10(%) ilişkisi	40
Şekil 3.13 t10(%) ve Ecs (kWs/t) ilişkisi	41
Şekil 3.14 Aşınma testi sonucu elde edilen tane boyu dağılımı ve t10(%) değeri.....	42
Şekil 4.1 Yarı otojen değirmen besleme teorik ve tesis karşılaştırılması.....	44
Şekil 4.2 Axb değerinin JKTech veritabanındaki frekans dağılımı (58).....	45
Şekil 4.3 ta değerinin JKTech veritabanındaki frekans dağılımı (58).....	45
Şekil 4.4 Birincil siklon gerçek ve düzeltilmiş performans eğrisi	48
Şekil 4.5 İkincil siklon gerçek ve düzeltilmiş performans eğrisi	49

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1 Bilyalı değirmen performansına tasarım ve işletme değişkenlerinin etkisi (31)	9
Çizelge 2.2 Hidrosiklon tasarım değişkenleri siklon çapı ilişkisi.....	17
Çizelge 2.3 Ağırlık düşürme testinden JKMRC tarafından kullanılan boyut aralıkları ve enerji seviyeleri.....	22
Çizelge 3.1 Numune alma noktaları	28
Çizelge 3.2 Değirmenlerin teknik özellikleri.....	28
Çizelge 3.3 Hidrosiklonların geometrik özellikleri	29
Çizelge 3.4 Yarı otojen devresi akış bilgileri	30
Çizelge 3.5 Bilyalı değirmen devresi akış bilgileri.....	30
Çizelge 3.6 Yarı otojen devresi yaş kuru tartım sonuçları.....	30
Çizelge 3.7 Bilyalı değirmen devresi yaş kuru tartım sonuçları.....	30
Çizelge 3.8 Denkleştirilmiş yarı otojen devresi akış bilgileri.....	33
Çizelge 3.9 Denkleştirilmiş bilyalı değirmen devresi akış bilgileri.....	33
Çizelge 3.10 Ağırlık düşürme test parametreleri	38
Çizelge 3.11 Bond öğütülebilirlik deneyinden elde edilen parametreler.....	43
Çizelge 3.12 Bond iş indeksi hesaplamasında kullanılan parametreler ve iş indeksi değeri	43
Çizelge 4.1 İşletme iş indeksi hesaplamasında kullanılan parametreler.....	46

1. GİRİŞ

Boyut küçültme, özellikle öğütme, pek çok metalin ve emtianın üretiminde enerji tüketiminin yüksek olduğu bir prosestir. Dünya enerji tüketiminin yaklaşık %1-2'sini boyut küçültmenin oluşturduğu bilinmektedir (1). Cevher hazırlama tesislerinde enerji tüketimi %80'e varan oranlarda boyut küçültmeden kaynaklanmaktadır. Tüketilen enerjinin büyük bir kısmı elektrik enerjisi olarak bilyalı ve yarı otojen değirmenler gibi değirmenler tarafından tüketilmektedir (2). Boyut küçültme yüksek miktarda enerji gerektirmez ve bu enerjinin tümünün efektif olarak boyut küçültmeye harcanmadığı bilinmektedir. Hatta bazı durumlarda boyut küçültmeye harcanan enerji, toplam harcanan enerjinin %1'ine karşılık gelebilmektedir. (3). Bu kadar büyük bir enerji tüketiminin gerçekleştiği öğütme devrelerinde yatırım ve özellikle işletme maliyetlerinde sağlanacak en küçük bir iyileştirme genel proje ekonomisine büyük katkı sağlamaktadır.

Yüksek tenörlü cevherlerin giderek azalması, artan enerji ve işletme maliyetleri ile birlikte öğütme devreleri tasarımında yatırım ve işletme maliyetlerinin önemi giderek artmaktadır. Cevherin belirli bir boyuttan istenilen boyuta öğütülmesi için farklı devre alternatifleri bulunmaktadır. Bu birbirinden farklı boyut küçültme alternatifleri, farklı enerji verimliliği (4) ve değişken ekonomik çıktılarla sonuçlanmaktadır. Alternatifler arasında teknik açıdan bir fark olmadığı durumlar da ise tasarımlar yatırım ve işletme maliyetleri açısından değerlendirilmektedir (5). Diğer bir deyişle, tüm teknik değerlendirmelerin yanı sıra tasarım projeleri ekonomik olarak da değerlendirilmektedir.

Bilindiği üzere optimizasyon kelime anlamı ile bir fonksiyonu, belli bir aralıkta girdi değerleri yaratarak maksimize veya minimize etmek demektir. Şüphesiz bu sistematik bir uğraştır. Cevher hazırlama mühendisliğinde ise optimizasyon; tesis işletme veya tasarım parametrelerini amaçladığımız değere yaklaşmak için sistematik olarak belli bir aralıkta değiştirmek demektir. Değişen parametreler ve etkileri oldukça karmaşıktır. Öğütme özelinde anlatmak gerekir ise, en-boy, cevher-su besleme miktarı, güç tüketimi ve ürün boyut dağılımını belirlemektedir. Bu anlamda en uygun elastik-plastik koşulları yaratmak suretiyle, cevhere özgü “en iyi” ürün dağılımını veren %katı miktarının belirlenmesi ve belirlendikten sonra bu değere ulaşılması için izlenmesi gereken yollar, %katı optimizasyonunun iki aşamasıdır.

Yukarıda bahsedilen %katı, optimizasyon sırasında, takip edilen proses performans parametresidir. Anahtar proses göstergesi olarak adlandırdığımız bu parametreler:

Kırmada ve öğütmede:

- toplam kırma/öğütme enerjisi,
- final ürün boyut dağılımı,
- her aşamanın spesifik enerji gereksinimi,
- boyut küçültme oranı / enerji tüketimi (6),

siklonda:

- roping noktası (7),
- siklon çapı,
- apeks çapı,

gibi çeşitlendirilir. Anahtar proses göstergesi veya kontrol parametresi olarak isimlendirdiğimiz bu parametrelerin fiziksel sistemde olan gerçekliği en basit şekilde temsil etmesi gerekir. Karmaşık etkiler mühendisleri trendler üzerinden konuşmak zorunda bırakmıştır çoğu zaman. Bilinen trendler yerine optimizasyonun başarısını anlatan somut katsayılar ile konuşabilmek proses iyileştirmesi için büyük bir avantaj olmuştur. Yine öğütmeye dönmek gerekir ise, bunun en güzel örneklerinden bir tanesi “fonksiyonel performans katsayısı”dır. Bu katsayının artması demek “sisteme verilen enerjiye” karşılık alınan “ faydalı ürünün” artması anlamına gelmiştir (6, 8, 9, 10). Bu anlamda proses optimizasyonunda bilinen gerçekleri (trendleri) değişen parametreler ile somutlayacak “temsili katsayılar” kullanmak proses mühendislerinin faydasına olacaktır.

Performans iyileştirme çalışmalarında, yüksek miktarda enerji gerektiren ve düşük verimle çalışan öğütme devrelerinde enerji tüketiminde ve ekonomik açıdan tasarruf elde etme mümkündür (11). Öğütme devrelerinde gerçekleştirilecek performans iyileştirmeleri, proje ekonomisine önemli ölçüde katkı sağlamaktadır (12). Performans iyileştirme çalışmalarında öncelikli olarak, mevcut sistemde işleyen tesisin durumu ortaya konulmaktadır. Tesiste bulunan ekipmanlarla ne kadar iş yapıldığı ve maksimum ne kadar yapılabileceği belirlenerek tesisin performansını belirlenmektedir.

Öğütme devrelerinin performansını belirlemede kullanılan uygulanabilir yöntemlerden biri iş indeksi verimliliğidir (Wief). Wief değeri, laboratuvar ortamında hesaplanan

standart Bond iş indeksi (W_i) değerinin endüstriyel bir öğütme devresi için hesaplanan işletme iş indeksi (W_{iop}) değerine oranıdır (13). Bu yöntem mevcut öğütme devrelerinin performansını belirlemede yaygın olarak kullanılmaktadır. (14, 15)

Öğütme devrelerinin performansını belirlemede kullanılan alternatif yöntemlerden bir diğeri de SMC (16) testidir. Bu test, konvansiyonel kırıcılar, çubuklu, bilyalı, otojen, yarı otojen değirmenler ve yüksek basınçlı değirmenlerin spesifik enerji gereksinimi belirlemek için geliştirilmiştir. Test sonucunda elde edilen parametrelerin tesis koşullarına en yakın sonucu sağlaması için yöntem veri tabanındaki gerçek sonuçlar ile kıyaslanarak ampirik olarak kalibre edilmektedir.

Otojen ve yarı otojen değirmenlerin tasarımında ve optimizasyonunda kullanılmak üzere Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre (JKMRC) tarafından geliştirilmiş ağırlık düşürme ve aşınma testi bulunmaktadır. Deneylerden elde edilen parametreler ile cevher öğünme parametreleri bulunmakta ve JKSimMet yazılımı ile performans belirleme çalışmalarında kullanılmaktadır (17).

Öğütme devreleri genellikle sınıflandırma ekipmanları (elekler, hidrosiklonlar vb.) ile çalışmaktadır. Temel amaçları hedeflenen boyuta öğütülmüş malzemeyi devreden uzaklaştırarak fazla öğütme ile oluşacak ince malzeme oluşumunu, dolayısıyla gereksiz enerji tüketimini ve değerli mineralin kaybını engellemektir. Elek ve hidrosiklon gibi sınıflandırma ekipmanlarının performansı genellikle partiyon eğrileri ile belirlenmektedir. Partiyon eğrileri performans eğrisi olarak da adlandırılmaktadır (18).

Cevher hazırlamada performans belirlemek için birçok araştırmacı tarafından güç temelli modeller (16, 19, 20, 21) geliştirilmiştir. Geliştirilen bu modeller ampirik yaklaşımlar olup performans değerlendirmede yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu ve benzeri pek çok modeli bir arada kullanan proses simülatörleri bulunmaktadır. Bunlardan yaygın olarak kullanılanlar; JKSimMet (22), USIMPAC (23), MODSIM (24). Simülatörler işletme ya da tasarım değişkenlerinin prosese, ekipman performansına ve tüm devreye etkisini anlamada kullanılan önemli araçlardır.

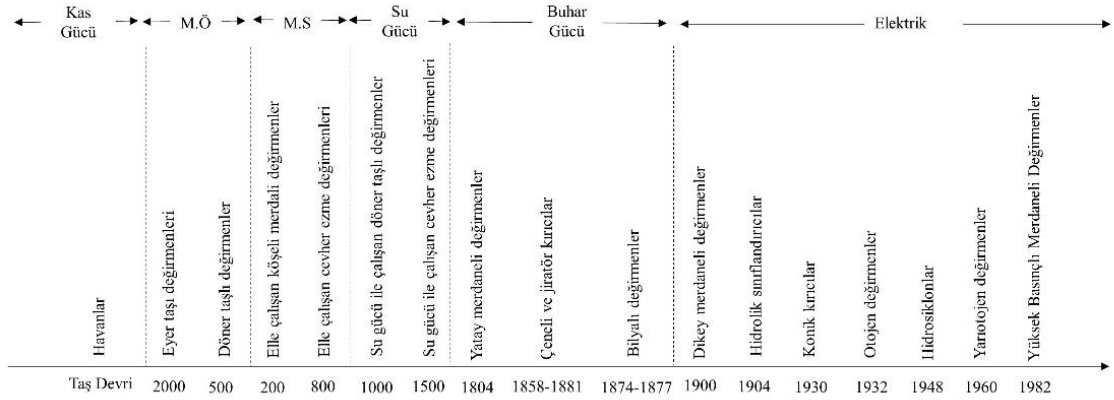
İlk otojen uygulamaları 1970 ve 1980'lerde Karadeniz bakır işletmeleri Murgul İşletmeleri ve Samsun İzabede kurulmuştur. Yarı otojen değirmen uygulamaları ise ilk olarak Efemçukuru altın madeninde kurulmuştur. Bu anlamda ülkemizde yarı otojen değirmen uygulamaları oldukça yenidir. Bu tez çalışması kapsamında bir yarı otojen

öğütme devresinin performansının değerlendirilmesi gerçekleştirilmiştir. Çalışma kapsamında Balıkesir ili Sındırgı ilçesinde bulunan Zenit Madencilik A.Ş. ye ait altın madenin öğütme devresinden numune alma ve veri alma çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Alınan numuneler üzerinde %katı belirleme, elek analizleri, nem analizi gerçekleştirilmiştir. Cevher öğütülebilirlik parametrelerinin belirlenmesi için alınan numunelerle Bond testi, ağırlık düşürme testi ve aşınma testi gerçekleştirilmiştir. Elde edilen parametreler performans değerlendirme çalışmasında kullanılmıştır. Öğütme devresinde yer alan hidrosiklon gruplarından alınan numuneler ile de Hidrosiklonların performans değerlendirme çalışması gerçekleştirilmiştir.

2. LİTERATÜR

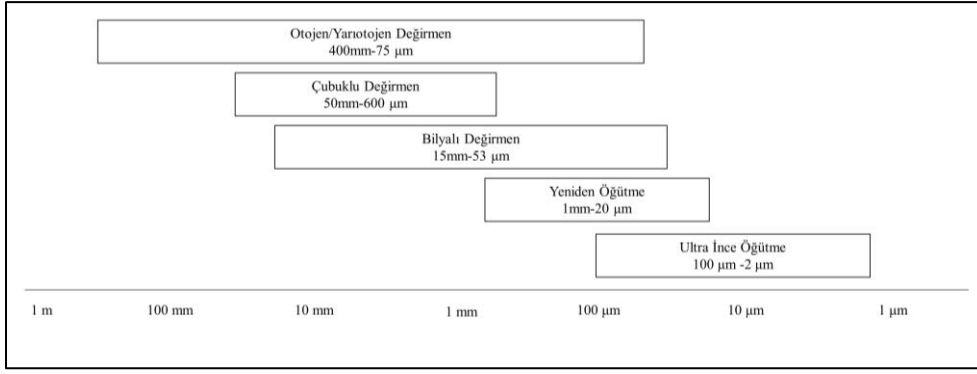
Boyut küçültme, katı tanelerin kırma ve takip eden öğütme işlemlerine tabi tutularak daha küçük boyutlara sahip ürünlere dönüştürülmesidir. Kimya endüstrisinden ilaç endüstrisine, endüstriyel minerallerden metalik cevherlere kadar çeşitli endüstrilerde ve farklı mineral içeriğine sahip cevherlerde istenilen son ürüne ulaşmak için kullanılan en temel fiziksel proseslerden biridir. Örnek olarak, metal madenciliğinde uygulanan boyut küçültme, değerli metalin serbestleşerek takip eden zenginleştirme aşamalarında kazanılmasını sağlamaktır.

Boyut küçültme insanlık tarihinin başlangıcından beri kullanılmaktadır. Taş devrinde hayvanların kas gücüne dayalı olarak yapılan boyut küçültme, teknolojik gelişmelere paralel olarak yerini mekanize ekipmanlara bırakmıştır. Özellikle buhar gücünün kullanımı ve elektriğin keşfi gibi gelişmelerin yaşanmasıyla, insanlar farklı ihtiyaçlarını karşılamak için yeni ekipmanlar geliştirmişlerdir (Şekil 2.1).



Şekil 2.1 Öğütme Tarihi (25)

Başlıca öğütme teknolojileri için uygulamada tane boyutu aralığı ve boyut küçültme oranları Şekil 2.2'de verilmiştir. Şekil göz önüne alındığında, en büyük tane boyutu otojen/yarı otojen değirmenler için 400 mm ile başladığı görülmekte ve ultra ince öğütme ile kabaca 10 mikron altı boyutunda taneler elde edilebileceği anlaşılmaktadır.



Şekil 2.2 Cevher hazırlamada ana akım teknolojilerin boyut küçültme aralığı (26)

Cevher hazırlamada günümüzde kullanılan yaş öğütme teknolojileri döner değirmenler ve karıştırıcılı değirmenler olmak üzere iki kategoride yer almaktadır. Değirmen terimi içerisine konulan malzemeyi geniş bir yelpazede ürün boyutuna öğüten çok çeşitli mekanik cihazlarını tanımlamaktadır. Günümüzde kullanılan bu değirmenler aşağıda sırasıyla özetlenmiştir.

2.1. Döner Değirmenler

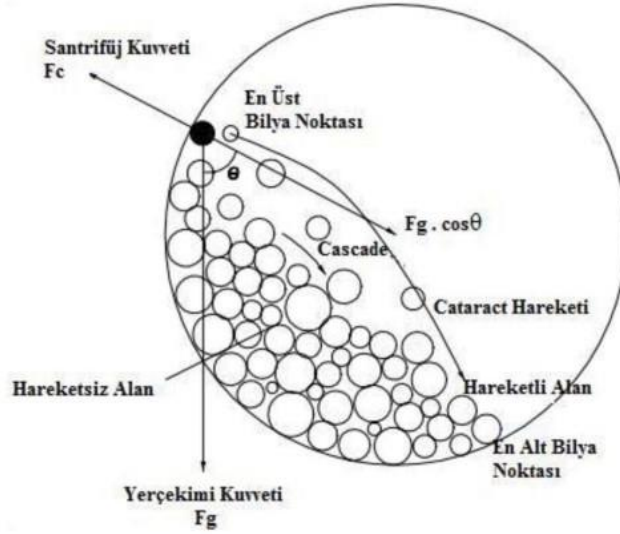
En yaygın olarak kullanılan öğütme teknolojisi dönme hareketi ile cevherin öğütülmesini sağlayan döner değirmenlerdir. Bu kategoride yer alan değirmenler arasında otojen (AG), yarı otojen (SAG), bilyalı, çubuklu ve çakıl değirmenler bulunmaktadır. Bu değirmenler arasındaki boyut ve en boy oranındaki farklılığa ek olarak öncelikli ayırt edici fark öğütmenin gerçekleştirildiği ortamının türü ve boyutudur (26).

Döner değirmenleri öğütme ortamı baz alınarak 3 temel türde incelemek mümkündür: çubuklu, bilyalı ve otojen/yarı otojen. Değirmenlere yapısal olarak bakıldığında, her biri yenilenebilir aşınma astarları ve bir öğütme ortamı yükü ile donatılmış yatay silindirik bir kabuktan oluşur. Değirmenin çapı, ortamın cevher parçacıkları üzerinde uygulayabileceği etkiyi belirlediği için, genel olarak, besleme boyutu ne kadar büyük olursa, değirmen çapının da o kadar büyük olması gerekir. Çapla birlikte değirmenin uzunluğu, değirmenin hacmini ve diğer bir deyişle kapasitesini belirler (27, 28).

Tamburlu değirmenler cevher tanelerine kıyasla büyük, sert ve ağır olan ve değirmen hacminin yarısından biraz daha azını kaplayan (boşluklar dahil) öğütücü ortamları kullanarak öğütme işlemini gerçekleştirmektedirler.

Değirmen kabuğunun dönmesi ve sürtünmesinden kaynaklı, öğütme ortamı değirmenin yükselen tarafı boyunca, dinamik olarak denge konumuna ulaşılan kadar kaldırılır. Bu

denge durumunda, gövdeler diğer gövdelerin serbest yüzeyinden aşağı doğru kademeli olarak katarakt hareket yaparak düşer (Şekil 2.3).



Şekil 2.3 Değirmen içerisindeki bilya hareketi (29)

Öğütme ortamı ve büyük cevher parçalarının değirmen içerisinde iki bölümden oluşan bir yol izlemektedir: dairesel bir hareket olan kabuk gömleklerine yakın kaldırma bölümü ve parabolik bir hareket olan değirmen yükünün topuğuna geri düşme. Nispeten düşük hızlarda, ortam değirmenin topuğuna doğru yuvarlanma eğilimindedir ve tanelerin öğütülmesinde esas olarak aşındırıcı ufalama ile gerçekleşir. Bu cascade hareketi sonucunda daha ince öğütülmüş taneler elde edilmekle birlikte astar aşınması artmaktadır. Daha yüksek hızlarda ise ortamın yükün topuğuna inmeden önce bir dizi parabolik hareket izlemektedir. Bu katarakt hareketi, çarpma yoluyla ufalanmaya maruz kalmış daha kaba bir son ürüne ve azaltılmış astar aşınmasına yol açar. Değirmenin kritik hızında, santrifüj hareketi nedeniyle öğütme ortamı, kabuğa karşı esasen sabit bir konumda sabitlenir ve öğütme işlemi gerçekleşemez. Değirmenlerde kritik hız formülü Eşitlik 2.1'de verilmiştir. Uygulamada, değirmenler hesaplanan kritik hızın (V_c) %50-90'ı arasındaki hızlarda çalıştırılmaktadır.

$$V_c = \frac{42.3}{\sqrt{(D-d)}} \text{ dev/dk} \quad (\text{Eşitlik 2.1})$$

D: değirmen çapı (m)

d: bilya çapı (m)

Öğütme devreleri açık ve kapalı devre olarak tasarlanabilmektedir. Açık devre konfigürasyonunda devreden yük olmaz iken, kapalı devrede elek ya da hidrosiklon gibi sınıflandırıcılar ile istenilen boyuta indirgenemeyen malzeme sisteme geri beslenmektedir. Açık devre tasarımlar, ürün tane boyu dağılımı üzerindeki kontrol eksikliği nedeniyle genellikle tercih edilmemektedir. Buna karşın, kapalı devre çalışan sistemlerde pülpün değirmende kalma süresi arttığından daha ince malzeme üretebilmektedir.

İnce cevher taneleri ve su değirmen içerisinde pülpü oluşturur ve öğütülmüş malzemenin tahliyesinde önemli bir yere sahiptir. Bu durum, sonraki proseslerde problemlere yol açan aşırı ince malzeme (şlam) üretimini sınırlayarak enerji tüketimini azaltır.

2.1.1 Çubuklu Değirmenler

Çubuklu değirmenler öğütücü ortam olarak çubuk kullanılan döner tamburlu değirmenlerdir. Çubuklar değirmenin boyuna paralel olacak şekilde yerleştirilmiş ve boyları genellikle değirmen iç uzunluğundan 150 mm kısadır. Değirmen içerisinde gerçekleşen öğütme mekanizması bilyalı değirmen ile benzerdir. Öğütme çubuk boyunca gerçekleşmekte ve etkin olan kırılma mekanizması darbeden daha çok aşındırmadır. Bilyalı değirmende elde edilen ürün tane boyu dağılımından daha dar bir aralıkta, ancak daha kaba ürün elde edilmektedir. Bu nedenle genellikle ince ürün elde edilmesi gereken sistemlerde bilyalı değirmen öncesinde kullanılmaktadır (27).

Boy/çap oranı çubuklu değirmenlerde 1.5 - 2.5 aralığında değiştiği ifade edilmektedir. Bu oran oldukça önemlidir, öğütücü ortam olarak seçilen çubuklar değirmen boyundan birkaç santim kısa olacak şekilde seçilmektedirler. Bunun nedeni değirmenin dönme hareketi esnasında çubukların değirmenin çapı boyunca sıkışmasının önüne geçmektir. (30)

Çubuklu değirmenler genellikle kritik hızlarının %50-65 aralığında çalıştırılmaktadır. Bilyalı değirmen ile kıyaslandığında, dönüş hızlara daha yavaştır. Bunun nedeni çubuklara katarakt hareketi yerine cascade hareketini oluşmasını sağlamaktır. Değirmen içerisindeki pülpün katı miktarı %65-85 arasında değişmektedir (30).

Çubuklu değirmenler uzun yıllar üçüncül kırıcılar yerine kullanılmıştır. Ancak yüksek kapasiteli (500 t/s'den daha yüksek) yeni tesislerde tercih edilmemektedir. İkincil ve üçüncül kırıcıların yerini artık yarı otojen değirmenler almaktadır. Bunun nedeni devreyi

sadeleştirmek ve yarı otojen değirmen ürünün çok az bir miktarının ileri bir kırma işlemine ihtiyaç duymasındır (31).

2.1.2. Bilyalı Değirmenler

Bilyalı değirmen kullanılan ilk döner değirmenlerdir. İlk olarak 1870’lerde çimento klinkerini öğütmek kullanılmıştır. Klinker üretiminde kullanılmaya başlanan döner fırınların sayesinde artan klinker üretimi nedeniyle daha yüksek kapasiteli değirmenlere duyulan ihtiyaçtan dolayı icat edilmiştir. 1870’lerden beri bilyalı değirmen ince öğütmede kullanılan hakim bir teknoloji olmuştur (31).

Bilyalı değirmenler en yaygın olarak kullanılan döner değirmenlerdendir. Cevher, öğütme ortamı olarak kullanılan dökme veya dövme çelik bilyalar yardımıyla öğütülmektedir. Besleme boyutu olarak 25 ile 100 mm arasında değişen bilya boyutları kullanılmakla birlikte bilya boyut seçimi besleme tane boyutu, cevher öğütülebilirliği ve hedeflenen ürün tane boyutuna bağlı olarak yapılmaktadır. Bilyalı değirmenler ikincil veya üçüncül kırıcılardan gelen besleme boyutu 6 ile 15 mm (F_{80}) arasında değişen kırılmış malzemeyi öğütmek için kullanılabilir. Buna ek olarak birincil öğütme aşamasının sonunda sınıflandırılmış, 6 mm’den (F_{80}) daha ince tane boyutundaki malzemeyi öğütmek içinde kullanılabilir (26).

Bilyalı değirmenler yaş veya kuru öğütmeye uygun olmakla birlikte yaygın olarak yaş öğütme için kullanılır ve %80’i (P_{80}) 300 mikronun altına geçen nihai ürün tane boyutu üretebilmektedir. Islak öğütme taşma boşaltmalı bilyalı değirmenler genellikle değirmenin kritik hızının %70-80’nde, %65-80 katı oranında ve hacimce %30-45 bilya yüküyle çalıştırılır (26, 30).

Bilyalı değirmenlerde öğütme verimliliğini etkileyen birçok faktör bulunmaktadır ve faktörler Çizelge 2.1’de özetlenmiştir.

Çizelge 2.1 Bilyalı değirmen performansına tasarım ve işletme değişkenlerinin etkisi (31)

Dizayn/İşletme değişkenleri	Bilyalı değirmen üzerindeki etki değişkenleri
Katı yüzdesi	Deşarj oranı, boyut küçültme, güç ihtiyacı
Bilya boyutu ve dağılımı	Boyut küçültme
Bilya yükü	Kapasite, güç ihtiyacı
Değirmen çapı	Kapasite, ürün boyutu, güç ihtiyacı
Değirmen uzunluğu	Kapasite, güç ihtiyacı

Besleme pülpünün yoğunluğu önemli bir faktördür ve değirmen akışını kolaylaştırmak için olabildiğince yüksek olmalıdır. Öğütme esnasında bilyaların etrafının yeterli miktarda cevher ile kaplı olması önemlidir; bu sayede bilyalar arası metal teması azaltılarak çelik tüketimi minimuma indirilir ve öğütme verimliliği artırılmış olur. Bilyalı değirmenler, cevhere bağlı olarak ağırlıkça %65 ila %80 katı arasında çalışmalıdır (30).

Bilya boyutlandırması ve dağılımı öğütme ortamında yüzey alanını direkt olarak etkilediği için öğütme verimliliği üzerinde etkili bir faktördür. Bu nedenle, bilya boyutları mümkün olduğunca küçük seçilerek yüzey alanları artırılmalıdır. Öğütülecek cevhere uygun bilya boyutları deneme yanılma ya da öğütme devresi simülatörleri yoluyla belirlenebilmektedir.

Bilyalı değirmenler boyu çapından uzun olan, ancak çubuklu değirmenlerdeki gibi bir boy/çap oranı kısıtlaması olmayan değirmenlerdir. Ancak birincil öğütme için kullanıldığı durumlarda 1 – 1.8 arasında, ince öğütme için açık devre uygulamalarında ise 1.3 – 1.5 arasında değiştiği belirtilmektedir (28).

Bilyalı değirmenler genellikle çubuklu değirmenlerden daha yüksek hızlarda çalıştırılır, bu sayede büyük bilyaların katarakt hareketi yapması sağlanarak, cevher parçalarını darbe etkisiyle öğütür. Uygulamalarda bu hız kritik hızın yaklaşık olarak %70-80'ine denk gelmektedir.

2.1.3. Otojen/Yarı Otojen Değirmenler

“Otojen” kelimesi yunanca “autogenes” kelimesinden gelmekte olup kendi kendine üretilen demektir. Kelime ilk olarak değirmenlerde Harlowe Hardinge şirketi tarafından kendi üretimleri olan değirmenlerin indirgenme mekanizmasını tanımlamak için 1940 yılında kullanılmış, 1980 yılında ise terimleştirilmiştir. (32). Robinson’a göre günümüzde otojen ve yarı otojen olarak bilinen değirmenlerin gelişimine yol açan ilerlemelerin arkasındaki ana itici güç Hardinge’dir. 1900 yılların başlarında Güney Afrika altın madenciliğinde (33) ve Harlowe Hardinge (34) tarafından aktarıldığı üzere Hardinge’nin babası tarafından iri cevher tanelerinin öğütücü ortam olarak kullanımının denendiği bilinmektedir. Ancak bilinen anlamda ilk otojen değirmen uygulaması 1958 yılında Kanada’nın Quebec eyaletinde 5.5 m x 1.8 m boyutlarında kurulan Hardinge değirmenleridir.

Yarı otojen değirmenler otojen değirmenler ile zaman içinde gelişmiştir. Gelişimleri ise otojen değirmenlerde erken dönem ortaya çıkan sorunlar neticesinde olmuştur (34, 32). Bu sorunlar kritik boyut olarak adlandırılan belirli bir boyutta malzemenin birikmesi sonucunda ortaya çıkmıştır. Hardinge tarafından bu sorunların %1-10 arasında bilya yükü eklenerek çözüldüğü bulunmuştur.

1950 yılı ortaları otojen/yarı otojen değirmenler için dönüm noktası gibi görünmekle beraber göre kayda değer gelişme gerçek anlamda 1970'lerde Amerika'da ki demir cevheri tesisi genişlemelerine dahil edilmesi ile başlamıştır. İlerleyen yıllarda ise otojen/yarı otojen değirmenlerin kullanımı ve kapasitesi artmıştır. 1970'lerdeki en büyük yarı otojen değirmenler 5MW güç gereksinimi duyarken 2010'lara gelindiğinde bu rakam 28MW'lara yükselmiştir (31, 30)

Otojen değirmenler öğütücü ortam olmaksızın cevherin kendi kendine öğünmesi prensibi çalışmaktadır. Genellikle birincil öğütücü olarak kullanılmakta ve tüvenan cevher ya da birincil kırma ürünü beslenmektedir. Darbe ve aşınma mekanizma etkin olmakla beraber boyut küçültme işlemi çoğunlukla darbe ile gerçekleşmektedir. Tasarımları gereği yüksek çapa sahip bu değirmenlerde cevher parçaları yüksekte değirmen topuğuna düşerek boyut küçültmeyi sağlamaktadır (35).

Yarı otojen değirmenler öğütücü ortama iri cevher tanelerine ek %4-15 arasında çelik bilya eklenerek kullanılmaktadır. Bilyalar darbe ile kırma için oldukça yüksek kinetik enerji üretmektedir. Bu bilyaların eklenmesi değirmenin değişen sertlik özellikleriyle ve değişen miktardaki cevherle başa çıkma yeteneğini artırmaktadır. Yumuşak ve oldukça ince besleme tane boyuna sahip cevher beslendiği durumlarda, cevher taneleri hızlı bir şekilde bilya boyutundan daha küçük boyuta kırılmaktadır. Bu nedenle çok az miktarda cevher tanesi öğütücü ortam olarak kullanılacak büyüklükte ve sertliktedir. Bu gibi uygulamalarda %18-22 gibi yüksek bilya doluluğunda çalıştırılarak gerekli öğütücü ortam sağlanmaktadır (31, 30)

Değirmenler genellikle çap/boy oranına göre üç gruba ayrılmaktadır:

- yüksek çap/boy oranı: 1.5-3
- kare değirmenler, çap/boy oranı: 1
- düşük çap/boy oranı: 0.4-0.6

Genellikle yüksek çap/boy oranına sahip değirmenler tercih edilse de Güney Afrika da yer alan madenlerde düşük çap/boy oranlı değirmen uygulamaları bulunmaktadır (30).

Besleme yüksek çap/boy oranına sahip değirmenlerde genellikle jiratör kırıcılardan gelirken, düşük çap/boy oranına sahip değirmenlerde çeneli kırıcı tercih edilmektedir. Kırıcı açıklığına bağlı olmakla beraber maksimum ürün tane boyu jiratör kırıcılarda 300 mm, çeneli kırıcılarda 180-100 mm olmaktadır. Bu neden optimum besleme boyutu 150 ve 300 mm arasında değişebilmektedir (36).

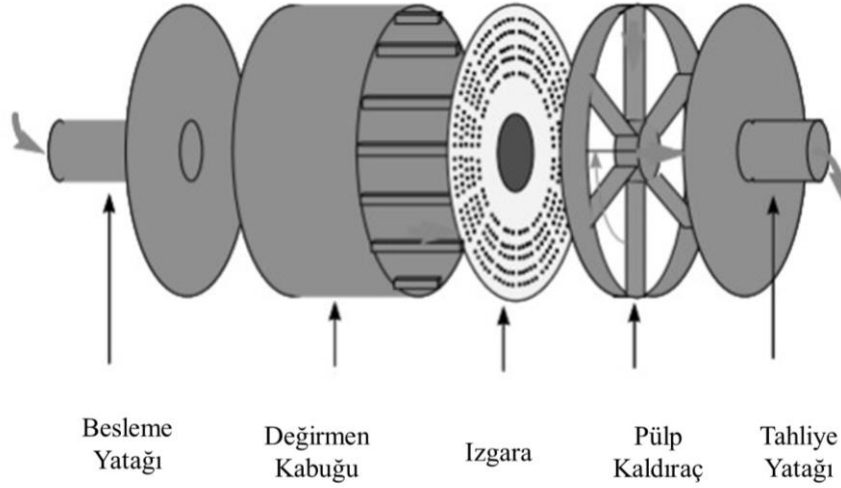
Tanelerin kırılma hızı tanelerin boyutuyla ilişkili olduğu belirtilmiştir. Austin vd. (37) tarafından kırılma hızının başlangıçtaki artışında aşınma ile kırılmanın etkin olduğu düşünölmektedir. Bazı büyük parçaların başarılı bir şekilde kırılmayacak kadar büyük olmasından ötürü kırılma hızının yavaşlayacaktır. İşte bu noktada aşınma ile kırılmanın baskın olduğu düşünölmektedir. Tanelerin öğütücü ortam boyutuna yaklaşması ile darbe ile kırılma mekanizmasının tekrar etkin olması beklenmektedir (36). Ayrıca Morrell ve Valery (38) tarafından yapılan araştırmada besleme boyundaki değişimin ve besleme boyundaki ince malzeme miktarının değirmenin çektiği güç üzerinde ve kapasite üzerindeki etkileri ortaya konmuştur.

Yarı otojen değirmenler genellikle yaş öğütme ortamında çalıştırılmaktadır. Uygulamada, değirmenler kontrollü bir su ve cevher besleme oranı ile çalıştırılır. Genellikle, pölp yoğunluğu cevherin reolojik karakteristiğine göre değişmektedir. Katı oranı farklı işlemlere göre %60 ile %84 arasında değişmektedir. Bunun nedeni pölpün hacimsel akışının değirmen performansı üzerinde önemli bir etkisi bulunmasıdır.

Yarı otojen değirmenler beslenen malzemenin sertliği, tane boyu dağılımı, değirmen doluluğu ve bilya yükü gibi farklı işletme değişkenlerine bağlı olarak çeşitli kritik hızlarda çalıştırılmaktadır. Genellikle değirmen dönüş hızı kritik hızın %60 ile 80'i arasında değişmektedir. Yumuşak cevher ve düşük dolulukta çalıştırılan değirmenlerde astar aşınmasını engellemek için düşük hızlar tercih edilmektedir. Yüksek dolulukta ve dayanımı yüksek, sert cevherlerde ise kırılma için gerekli enerjiyi sağlamak için değirmen yüksek hızlarda çalıştırılmaktadır (39).

Birincil öğütme devrelerinde kullanılan yarı otojen değirmenlerin tasarımında düşünölmeli gereken önemli değişkenlerden biri kritik boyut olarak adlandırılan 25-50 mm miktarı ve bu malzeme ile ne yapılacağıdır. Genellikle akıl kanalları ile tahliye edilen bu taneler çakıl kırıcılar ile kırılarak devreye geri beslenmektedir. Bu boyutta tanelerin çokluğu değirmen kapasitesini ve öğütme verimini düşörmektedir (39).

Değirmenler 2 mm'den 90mm'ye kadar değişen açıklıklara sahip ızgaralı boşaltma tasarımına sahiptir. Iızgaralardan geçen malzeme, pülp kaldıraçları ile tahliye edilerek merkezdeki boşaltma haznesine aktarılmaktadır. Malzeme akışının sağlandığı değirmen bölümleri Şekil 2.4'te görülmektedir.



Şekil 2.4 Tipik bir yarı otojen değirmen şematik gösterimi (40)

2.1.4. Çakıl Değirmenler

Çakıllı değirmenler bilyalı değirmen olarak düşünülebilir. Aralarındaki temel farklardan biri değirmen boyunun çapına oranının büyük olmasıdır. Diğeri ise öğütücü ortam olarak çelik bilyalar yerine kaya parçalarının kullanılmasıdır. Kullanılan kaya parçaları kırılmış cevher parçalardır, bu nedenle ikincil otojen değirmen olarak da adlandırılmaktadır. Öğütücü ortam olarak kullanılan kaya parçalarının öğütmeyi gerçekleştirebilmeleri için kırılmaya ve aşınmaya direncinin yüksek olması gerekmektedir. 1900'lerde ve sonrasında Güney Afrika altın madenlerinde yaygın olarak kullanılmıştır. (41).

Çakıllı değirmenler öncelikli olarak çubuklu değirmen sonrası ikincil ya da üçüncül öğütücü olarak öğütme devrelerinde yer almaktadır. Otojen değirmenlerin kullanılmaya başlamasıyla birlikte aynı şekilde otojen kullanılmaktadır. Genellikle yaş ve kapalı devre olarak çalıştırılmaktadırlar. Crocker (42) tarafından belirtildiği üzere çakıllı değirmenlerin besleme boyu 9-10 mm kadar olabilirken, elde edilen ürün boyutu 10 mikron inceliğine kadar inebilmektedir. Kullanılan kaya parçalarının boyutu istenilen öğütme inceliği ile ilişkilidir, ince malzeme üretmek için daha küçük kaya parçaları

kullanılmaktadır. Çakıllı değirmenler genellikle %35-40 oranında yükle çalıştırılmaktadır. Öğütücü ortam olarak kullanılan kaya parçalarının yoğunluğu bilyalı değirmende kullanılan çelik bilyalara göre daha düşüktür. Bu nedenle bilyalı değirmenlere kıyasla güç tüketimleri daha düşük olmaktadır. Çelik bilya kullanılmamasının bir diğer avantajı öğütücü ortam maliyetlerini ortadan kaldırıyor oluşudur. Bu nedenle işletme maliyetleri bilyalı değirmene göre daha düşüktür.

Çakıllı değirmenlerin tasarımı gereği öğütülmüş malzemenin tahliyesi karşılaşılan problemlerden biridir. Değirmen içinde malzeme birikmesini önlemek ve aşırı öğütülmesinin önüne geçmek için ızgaralar kullanılmaktadır.

2.2. Karıştırmalı Değirmenler

Karıştırmalı değirmenler genellikle konsantre ya da artıklardaki cevher tanelerinin ince boyutta öğütülmesi amacıyla kullanılmaktadır. Buna ek olarak tekrar öğütme ya da ultra ince öğütme (<20 µm) işlemlerinde de tercih edilmektedir. Bu değirmenler sabit bir tambur ve dönen şaftlar yardımı ile değirmen içeriğini çalkalayarak öğütme işlemini gerçekleştirmektedir. Bu işlem sırasında oluşacak aşırı ısınmayı önlemek için değirmen kabuğunda su ceketli bulunmaktadır (42). Değirmen gövdesi dik veya yatay olmakta ve farklı tipte karıştırıcılarda kullanılabilir. Kuru ve yaş olarak çalıştırılabilir. Öğütme ortamı genellikle elenmiş silis kumu, katı çelik silindirler, çelik bilyalar veya seramik kürelerden meydana gelmektedir (44).

Karıştırmalı değirmenlerde bilyalı değirmenlerin aksine, değirmen kabuğu hareketli değildir. Değirmen içerisinde yer alan döner şaftlar öğütücü ortamın ve cevherin hareketini sağlamaktadır. Öğütücü ortam ve cevher doluluğu genellikle değirmenin hacimce %80'i ulaşabilmektedir. Konvansiyonel bilyalı değirmenlerde bu oran %35-40 aralığında değişmektedir.

Ultra ince öğütmede, karıştırmalı değirmenler bilyalı değirmenlere göre enerji tüketiminde %30-40'lara varan tasarruf sağlamaktadırlar. İşletme maliyetleri bakımından sunmuş olduğu bu avantajın yanı sıra yatırım maliyetleri de bilyalı değirmenlere göre düşük ve tesis ayak izleri oldukça küçüktür (45).

2.3. Sınıflandırıcılar

Öğütme devrelerinin temel amacı cevheri sonraki prosesler için belirlenen uygun boyuta indirmektir. Hedeflenen boyuta öğütülen cevherin devreden tahliyesi ve devam eden proseslere hedeflenen boyutta malzemenin gönderilmesi sınıflandırıcılar ile gerçekleştirilmektedir. Kıırma otojen ve yarı ojen gibi iri malzeme üreten devrelerde iri boyuttaki cevherler için bu işlem elekler ile yapılırken, öğütme devrelerinde ince malzemenin sınıflandırılması için merkezkaç kuvveti ile sınıflandırma yapan sistemler kullanılmaktadır.

Endüstriyel elekler titreşim yaratan bir mekanizma, elek panellerinden ve bu yapıyı sabit tutacak iskeletten oluşmaktadır. Eleklerle tek katlı olabileceği gibi birden çok kat ve farklı panel şekillerine sahip olabilmektedirler (düz, eğimli, kavisli). Elek panelleri ayırım yapılmak istenilen boyutta açıklığa sahiptirler ve bu açıklıktan daha ince malzemelerin sonraki proseslere devam etmesi sağlanmaktadır. Elek paneli üzerinde kalan malzeme titreşim hareketi ile elek üzerinden bantlara transfer edilerek sistemden uzaklaştırılmakta ya da geri döndürülmektedir.

Tambur şeklindeki elekler tromel elek olarak adlandırılmaktadır. Yarı otojen değirmenlerin çıkışında, sonraki proses için iri olan boydaki malzemeyi devreden ayırmak için kullanılmaktadırlar. Ayrılan bu taneler genellikle kırıcıya gönderilmekte ya da değirmene geri beslenmektedirler.

Bilyalı ve çubuklu değirmen çıkışlarında ise öğütücü ortam olarak kullanılan çelik bilya ve çubuk parçalarının malzeme ile taşınarak sınıflandırma ekipmanları ve pompalara zarar vermesini engellemek için kullanılmaktadırlar. Pülp sonraki prosesler için devam ederken öğütücü ortam kalıntıları trommel elek çıkışından tahliye edilmektedir.

Bunun yanı sıra tek başına bir ekipmana bağlı olmaksızın bağımsız şekilde uygulandığı birçok uygulama bulunmaktadır. Geri dönüşüm endüstrisinde de 8-9 metreyi bulan çaplarda tromel elekler sınıflandırma için kullanılmaktadırlar (46).

Spiral sınıflandırıcılar dikdörtgen bir tank içerisinde dönen spiralden oluşmaktadır. Dönen bu spiral çökme bölgesindeki malzemeyi yukarı doğru bir tahliye oluşuna taşımakta ve malzeme tekrar öğütülmek üzere değirmene geri beslenmektedir. İnce malzemeler ise çökme bölgesinden taşarak sonraki proseslere taşınmaktadır.

Hidrosiklonlar öğütme devrelerinde genellikle ince malzemenin sınıflandırılmasında kullanılmaktadırlar. Hareketli bir parçasının olmayışı işletme kolaylığı sağlamaktadır. Sunmuş olduğu bu avantaj nedeniyle 1980 öncesinden beri çeşitli sınıflandırma uygulamalarında kullanılmaktadır (47). Sınıflandırmanın yan ısıra susuzlandırma proseslerinden kullanılmaktadır (18).

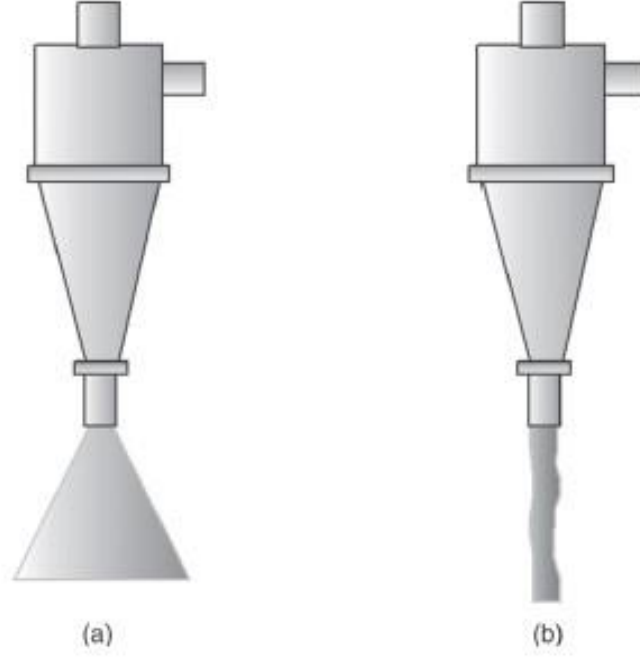
Genellikle hidrosiklonlar besleme girişi, üst ve alt kısmında çıkışı olan konik şekilli kaplardır. Besleme bu konik kapın merkez çizgisine teğet şekilde belirli bir basınç altında girmektedir. Gerekli basınç pompalar aracılığıyla sağlanmaktadır. Yüksek basıncın etkisiyle teğetsel olarak kap içerisine giren pülp merkez kaç kuvvetinin etkisiyle içeride girdap şeklinde hareket etmektedir. İri ve ağır malzemeler oluşan bu girdap hareketiyle hidrosiklonun çeperlerine doğru hareket ederek alt akıştan öğütme devresine geri dönmektedir. İnce ve hafif malzemeler ise suyun oluşturduğu sürüklenme kuvvetiyle merkezde yer alan düşük basınç bölgesine gelerek, burada oluşan vakum etkisiyle üst akıma doğru taşınmaktadır. Bu iki hareketin oluştuğu orta kısım ve kenar kısımlar arasında taneler üzerine etkiyen merkezkaç ve sürüklenme kuvvetlerinin birbirlerine eşit olduğu bir bölge oluşmaktadır. Bu bölgede tanelerin üst akış ya da alt akışa yönelme olasılığı eşittir.

Hidrosiklonlarda verimsizliğe neden olan iki durum söz konusudur:

- İri tanelerin bulunduğu alt akışta üst akışta olması gereken, ancak su ile taşınan ince tanelerinde bulunması,
- İnce tanelerin bulunduğu üst akışta, alt akışta olması gereken, ancak düşük özgül ağırlığa sahip ya da türbülans nedeniyle yanlış yere yönelmiş iri taneler bulunması.

Elde edilmek istenilen ayırım boyutunda sınıflandırmanın gerçekleştirilmesi basınca, pülp yoğunluğuna ve alt akış açıklığına doğrudan bağlıdır. Hidrosiklon işletme değişkenleri olan bu parametrelerin kontrolü ve ayarlanması ile işletme sırasında değişen cevher ve diğer koşullarda sınıflandırma etkinliği sürekli sağlanmaktadır.

Alt akış çıkış çapı, alt akış pülp yoğunluğunu belirlemektedir. Sınıflandırılmamış tanelerin alt akıştan kaçması alt akıştaki besleme suyu oranıyla ilişkilendirilmiştir. İyi çalışan siklonlarda alt akış pülp yoğunluğunun yüksek olması beklenmektedir (30). Bu nedenle alt akış çapı mümkün olan en yüksek pülp yoğunluğunu elde edecek ve şemsiye şeklinde (Şekil 2.5) akışı sağlayacak şekilde seçilmektedir.



Şekil 2.5 Hidrosiklon alt akış a) şemsiye b) ip şeklinde akış

Alt akış pülp yoğunluğunun optimum seviyeden daha yüksek olması ise yukarıdaki şekilde gösterildiği gibi ip şeklinde akışa neden olmaktadır. Alt akış çıkışından yeterli hava girişinin olmaması üst akışa malzemenin taşınmasını sağlayan vakum etkisini azaltmamakta ve bu nedenle iyi bir ayırım söz konusu olmamaktadır.

Hidrosiklonlarda tasarım değişkeni olarak yer alan siklon çapının ayırım boyutuna önemli bir etkisinin olmadığı, siklon giriş ve çıkış çaplarının belirleyici parametreler olduğu ifade edilmiştir (48). Ancak siklon tasarımlarında, giriş ve çıkış çapları siklon çapıyla ilişkilendirilmekte ve tavsiye edilen belirli oranlar bulunmaktadır (18).

Çizelge 2.2 Hidrosiklon tasarım değişkenleri siklon çapı ilişkisi

Tasarım Değişkeni	Siklon Çapına (D_c) Oranı
Giriş Çapı, D_i	$D_c/7$
Üst Akış Çapı, D_o	$D_c/5$
Alt Akış Çapı, D_u	$D_c/15$
Üst Akış Boyu, L_v	$0.4D_c$
Siklon Uzunluğu	$3D_c$

2.4. Öğütme Devreleri

Cevher hazırlamada hedeflenen boyuta cevheri indirgemenin birden fazla alternatifi bulunmaktadır. Günümüz tesislerinde tipik akım şemaları konvansiyonel üç aşamalı kırma devresi (yığın liçi için), birincil kırıcı-otojen/yarı otojen-bilyalı değirmen devreleri, ya da birincil-ikincil kırma-Yüksek Basıncılı Merdaneli Değirmen (YBMD)-bilyalı değirmen devrelerinden oluşmaktadır (49).

Yaygın olarak kullanılan devre alternatifleri şu şekilde sıralanabilir:

- Konvansiyonel üç aşama kırma + çubuklu değirmen + bilyalı değirmen,
- Konvansiyonel üç aşama kırma + bilyalı değirmen,
- Birincil kırma+ ikincil kırma + YBMD + bilyalı değirmen,
- Birincil kırma + yarı otojen değirmen + çakıl kırıcı + bilyalı değirmen,
- Birincil kırma + yarı otojen değirmen + bilyalı değirmen,
- Tek aşamalı yarı otojen değirmen.

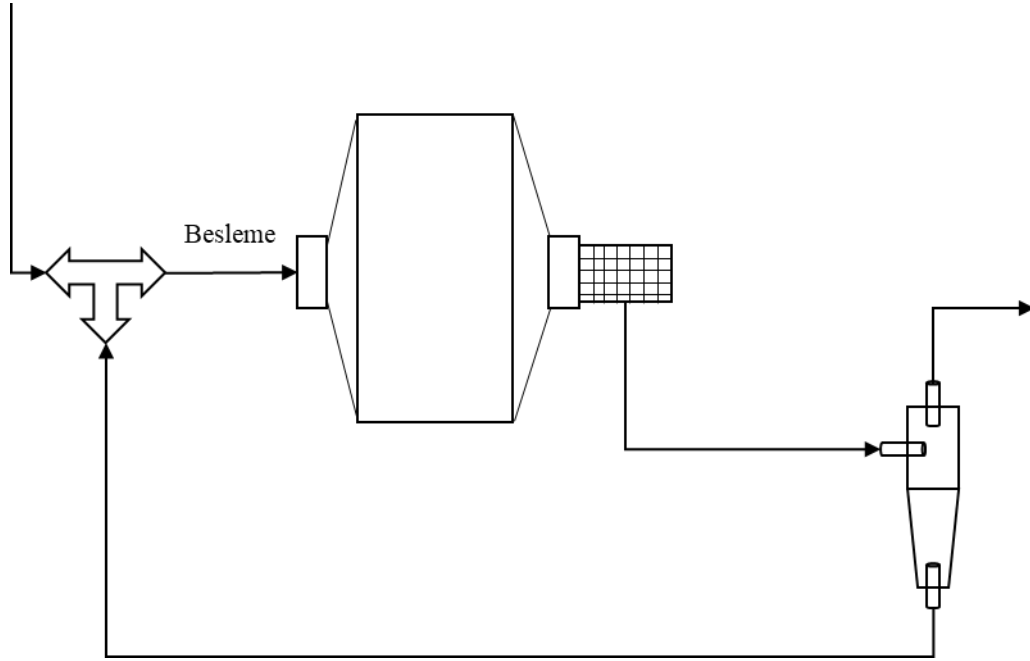
Otojen ve yarı otojen değirmenler daha geniş bir boyut aralığında cevheri işleyebildikleri için ve hem iri hem ince malzeme üretebildikleri için birincil değirmen olarak tercih edilmektedir. Genellikle beslemeleri birincil kırıcı olan çeneli kırıcı ürünü olmakla beraber bazı uygulamalarda tüvenan cevher doğrudan beslenmektedir. Çok sık görülen bir uygulama olmamakla beraber bazı uygulamalarda ikincil kırıcı ürününde beslendiği görülmektedir (50). Bilyalı değirmenler ise öğütme devresinde son ekipman olarak yaygın bir şekilde yer almakta ve devre ürünü olarak elde edilmek istenen ince malzemeyi sağlanmaktadır. Yaygın olarak kullanılan otojen/yarı otojen değirmen devreleri (36):

- Trommel ya da elek ile çalışan açık devre,
- Siklonla çalışan kapalı devre,
- Kapalı devre bilyalı değirmen ile açık devre
- Açık devre ardından ikinci kırıcı ve bilyalı değirmen

olarak özetlenmektedir.

İlk iki devre tek aşamalı, diğer iki ise iki aşamalı alternatiflerdir. Öğütme devreleri genel olarak açık ve kapalı devre olmak üzere iki ana kategoriye ayrılmaktadır (30). Otojen ve yarı otojen değirmenler genellikle ürün boyutu iri olduğunda açık devre çalıştırılmakla beraber sınıflandırıcı olarak tromel eleği ya da titreşimli eleğin kullanıldığı uygulamalar görülmektedir. Bunun nedeni öğütücü ortam olarak yer alan çakıl ve iri malzemelerin

devreden uzaklaştırılmasıdır. Daha ince ve dar bir aralıkta ürün istenildiği durumlarda genellikle sınıflandırıcı olarak hidrosiklonlarla kapalı devre çalıştırılmaktadırlar.



Şekil 2.6 Kapalı devre yarı otojen değirmen devresi

Hidrosiklonlar ile kapalı devre çalışan alternatiflerde, hidrosiklon alt akımından devreden yükün miktarının fazla olması nedeniyle, taze besleme tonajının artırılmaması ve kapasitenin açık devre uygulamalarına göre daha düşük kaldığı görülmektedir.

Kapalı devre alternatifinde son yıllarda oldukça tercih edilen diğer bir uygulama kırıcının değirmen ile kapalı devre çalıştırılmasıdır. Bunun nedeni kritik boylu (25-50mm) malzemelerin değirmen içerisinde akümüle olarak enerji veriminde kötüleşmeye ve taze besleme kapasitende azalmaya neden olmasını engellemektir. Bu sayede açık devre alternatifine göre değirmen içerisinde yük oluşturan kritik boylu tanelerin kırılarak devreden uzaklaştırılmakta ve taze besleme tonajının arttığı görülmektedir. Otte (51) ve diğer araştırmacılar (12, 52) tarafından kritik boylu malzemelerin ortadan kaldırılması, daha ince ve dar bir aralıkta ürün elde etmek için YBMD değirmenlerin otojen ve yarı otojen değirmen öğütme devrelerine eklenmesini tavsiye etmektedir. Bu sayede öğütme sonrası flotasyon ve liç gibi prosesler için daha uygun bir ürün elde edileceği belirtilmektedir.

Düşük çap/boy oranına sahip değirmenler için en uygun cevher tipi düşük-orta dayanıma sahip cevherlerdir. Değirmen içerisinde gerçekleşen darbe ile öğünmeden sonra aşınmanın da etkin olabilmesi için düşük çap/boy oranına sahip değirmenler kullanılmaktadır. Dayanımı yüksek cevherler için darbe ile öğütme mekanizmasının daha etkin olması için yüksek değirmen çapı ve kısa değirmen boyu tercih edilmektedir.

2.5. Performans Değerlendirme

2.5.1. İş İndeksi Verimliliği

Öğütme devrelerinde performans değerlendirmede yaygın olarak kullanılan yöntemlerden biri İş İndeksi verimliliğidir. İş İndeksi verimliliği deneysel iş indeksi değerinin işletme iş indeksi ($W_{i_{op}}$) değerine oranıdır. Deneysel iş indeksi değeri standart Bond testi prosedürü uygulanarak laboratuvarında elde edilen bir parametredir. Endüstriyel değirmenlerin spesifik güç gereksinimi tahmini için kullanılmaktadır (15). İşletme iş indeksi değeri ise gerçek tesis koşulları altında bilinen değirmenin çektiği güce, geçen malzeme miktarına, besleme ve ürün tane boyutuna bağlı olarak hesaplanan spesifik güç tüketimidir.

İşletme iş indeksi değeri Eşitlik 2.2 ile hesaplanmaktadır.

$$W_{i_{op}} = \frac{P}{M \left(\frac{10}{\sqrt{F_{80}}} - \frac{10}{\sqrt{F_{80}}} \right)} \quad (\text{Eşitlik 2.2})$$

$W_{i_{op}}$: İşletme iş indeksi (kWs/t)

P : Güç (kW)

M : Tonaj (t/s)

F_{80} : Beslemenin %80 geçtiği boyut (mikron)

P_{80} : Ürünün %80'nin geçtiği boyut (mikron)

İş indeksi verimliliği Eşitlik 2.3 ile hesaplanmaktadır.

$$W_{i_{ef}} = \frac{W_i}{W_{i_{op}}} \quad (\text{Eşitlik 2.3})$$

$W_{i_{ef}}$: İş indeksi verimliliği (%)

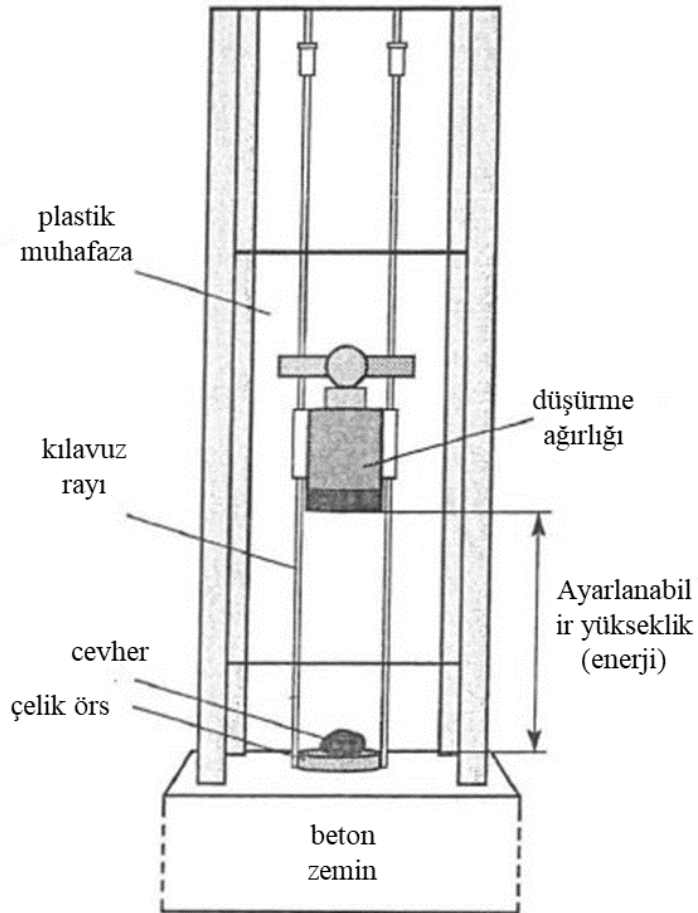
$W_{i_{op}}$: İşletme iş indeksi (kWs/t)

W_i : Deneysel iş indeksi (kWs/t)

Verimlilik değerinin %100 den fazla olması demek değirmenin laboratuvarında Bond testi ile ölçölen değerden daha az enerji tükettiği anlamına gelmekte, bu neden besleme tonajı artırılabilceği değerlendirilebilmektedir. Diğer taraftan %100'den az olması değirmenin verimsiz çalıştığı anlamına gelmektedir.

2.5.2. Ağırlık Düşürme Yöntemi

Otojen ve yarı otojen değirmenlerin tasarımında ve performans belirlemede kullanılan yöntemlerden biri ağırlık düşürme yöntemidir. JKMRC tarafından geliştirilen bu yöntem ile cevherin darbe ile kırılma karakteristiği belirlenmektedir. Test için kullanılan ağırlık düşürme cihazı Şekil 2.7'deki gibidir.



Şekil 2.7 JKMRC ağırlık düşürme test cihazı (17)

Ekipmanda kullanılan ağırlık 50 kg ağırlığa kadar çıkabilmektedir. Ayarlanabilir yükseklik ve değişik ağırlık ile farklı enerji seviyeleri uygulanabilmektedir. Uygulanabilir enerji aralığı 0.01 kW/s/t mertebelerinden 50 kW/s/t mertebesine kadar tane boyuna bağlı olarak çıkabilmektedir. Bu ağırlıklar spesifik yoğunluğu 2.8 den 4.0 g/cm³ kadar değişen aralıkta sert cevherler için kullanılmaktadır (17).

Gerekli parametrelerin belirlenebilmesi için JKMRC tarafından kullanılmakta olan beş farklı dar boy aralığı ve bu boy aralıkları için üç farklı enerji düzeyi tercih edilmektedir. Tane boyu aralıkları ve enerji düzeyleri Çizelge 2.3'te verilmiştir.

Çizelge 2.3 Ağırlık düşürme testinden JKMRC tarafından kullanılan boyut aralıkları ve enerji seviyeleri

Test	-63 + 53 mm	-45 + 37.5 mm	-31.5 +26.5 mm	-22.4 + 19 mm	-16 + 13.2 mm
1	0.10	0.10	0.25	0.25	0.25
2	0.25	0.25	1.00	1.00	1.00
3	0.50	1.00	2.50	2.50	2.50

Test sonucu kırılmış malzemenin inceliği ile ilişkilendirilmiş t₁₀ ile spesifik ufalanma enerjisiyle ilişkisi Eşitlik 2.4'te verilmektedir(17).

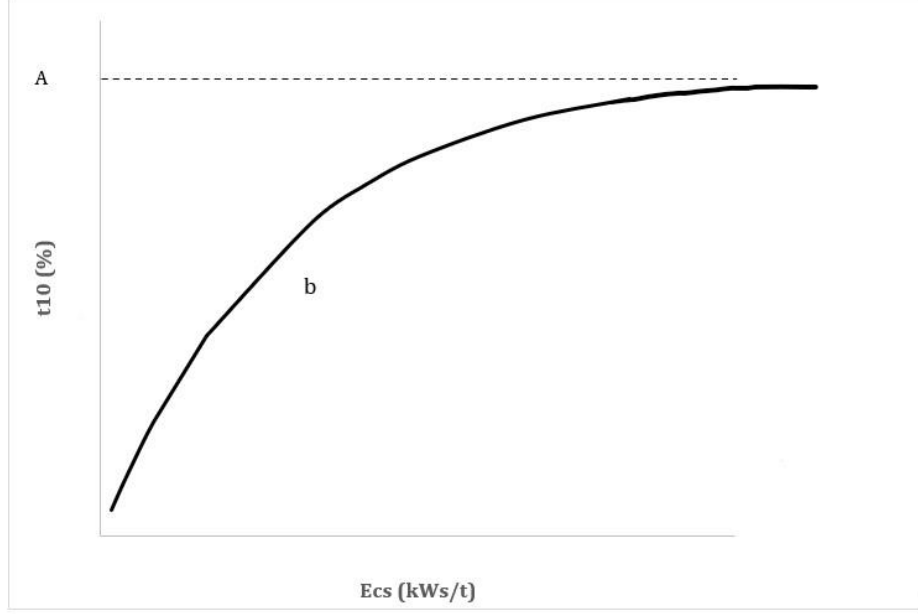
$$t_{10} = A[1 - e^{-b \cdot E_{cs}}] \quad (\text{Eşitlik 2.4})$$

t₁₀ : Testte kullanılan tane boyu aralığının geometrik ortalamasının %10'undangeçen malzeme miktarı (%),

E_{cs} : Özgül ufalanma enerjisi (kW/s/t),

A ve b : cevhere özgü test sonucunda elde edilen parametrelerdir.

A değeri Şekil 2.8'de gösterilen t₁₀-E_{cs} eğrisinin yatayda yakınsadığı, t₁₀'un en yüksek değerini temsil etmektedir. Bu seviyenin üzerinde uygulanacak daha fazla enerji ile sınırlı seviyede ince malzeme üretileceği ifade edilmektedir. Axb ise özgül ufalanma enerjisinin sıfır olduğundaki eğimi vermektedir. Axb değeri tane boyundan bağımsız bir değerdir.



Şekil 2.8 t10 ve Ecs arasındaki ilişki

2.5.3. SMC Test Yöntemi

Performans belirlemede kullanılan diğer bir yöntem ise Steven Morrell tarafından geliştirilmiş SMC testidir (16) Bu yöntem ile otojen, yarı otojen ve kırma devrelerinin tasarımı, ve JK Tech firması tarafından geliştirilen JKSimMet yazılımında devrelerin simülasyonu için gerekli olan, A, b, ve ta parametreleri bulunmaktadır. Bunun dışında güç temelli hesaplamalarda kullanılmakta, ve öğütme devreleri için gerekli spesifik enerji tahmini yapılabilmektedir.

Yöntem temel olarak boyut küçültme devre ekipmanlarını üç ana başlıkta incelemektedir.

Bunlar:

- Döner tambur değirmenler: otojen, yarı otojen, çubuklu, ve bilyalı değirmenler
- Konvansiyonel kırıcılar, çeneli, jirator ve konik kırıcılar
- YBMD

Bu ekipmanlar için test sonucunda elde edilen dört farklı indeks bulunmaktadır. Bunlar:

- Döner tamburlu değirmenler için: Mia ve Mib,
- Konvansiyonel kırıcılar için: Mic
- YBMD için: Mih

Döner tamburlu değirmenler için kullanılan Mia ve Mib sırasıyla iri ve ince cevher ile ilişkilidir. İri ve ince cevher belirlemede kullanılan kritik boy 750 mikrondur. Konvansiyonel bilyalı değirmenler ile elde edilen boyut aralığı olan 750 mikrondan daha ince malzemeler ince olarak tanımlanırken, konvansiyonel kırıcı ve YMBD ile elde edilen boy olan 750 mikron üzeri boylar iri olarak tanımlanmaktadır (4).

Mia, Mic ve Mih değerleri test sonucunda doğrudan çıktı olarak elde edilirken, Mib değeri konvansiyonel bilyalı değirmen iş indeksi testinden elde edilmektedir (4, 5).

Genel boyut küçültme denklemi (16) Eşitlik 2.5'te verilmiştir;

$$W_i = M_i 4(x_2^{f(x_2)} - x_1^{f(x_1)}) \quad (\text{Eşitlik 2.5})$$

M_i : Spesifik öğütme enerjisi (kWs/t)

x_2 : Ürünün %80'nin geçtiği boyut (mikron)

x_1 : Beslemenin %80'nin geçtiği boyut (mikron)

$$f(x_j) = -(0.295 + \frac{x_j}{1,000,000}) \quad (5)$$

Döner tambur değirmenlerde iri boy malzeme için;

$$W_a = K_1 M_{ia} 4(x_2^{f(x_2)} - x_1^{f(x_1)}) \quad (\text{Eşitlik 2.6})$$

K_1 : Çakıl kırıcı bulunan devrelerde 0.95, diğer tüm devre alternatiflerinde 1 alınmaktadır.

x_2 : 750 mikron

x_1 : Beslemenin %80'nin geçtiği boyut (mikron)

M_{ia} : İri boy için SMC testi çıktısı

Döner tambur değirmenlerde ince boy malzeme için;

$$W_b = M_{ib} 4(x_3^{f(x_3)} - x_2^{f(x_2)}) \quad (\text{Eşitlik 2.7})$$

x_2 : 750 mikron

x_3 : Ürünün %80'nin geçtiği boyut (mikron)

M_{ib} : İnce boy için SMC testi çıktısı

$$M_{ib} = \frac{18.18}{P_1^{0.295} (Gbp)(p_{80}^{f(p_{80})} - f_{80}^{f(f_{80})})} \quad (\text{Eşitlik 2.8})$$

P_1 : Deneyde kullanılan elek açıklığı (mikron)

G_{bp} : Her bir turda elek altına geçen malzeme miktarı (g)

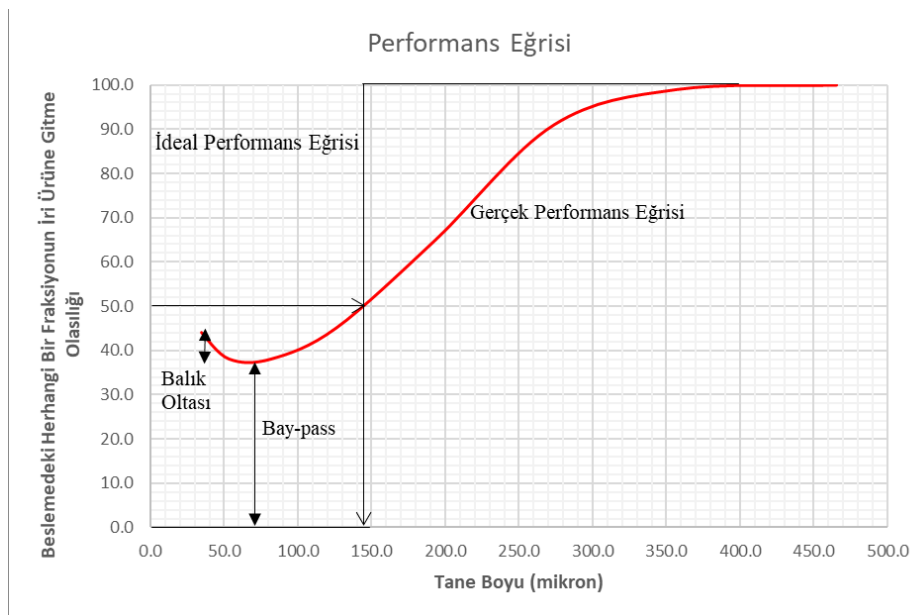
P_{80} : Ürünün %80'nin geçtiği boyut (mikron)

F_{80} : Beslemenin %80' nin geçtiği boyut (mikron)

formlarında genel boyut küçültme denklemi kullanılmaktadır.

Öğütme devreleri genellikle sınıflandırıcılarla kapalı devre çalıştırılmaktadır. Sınıflandırıcıların performansı doğrudan tüm devrenin performansına etki etmektedir. Örnek vermek gerekirse hidrosiklonların alt akış çapındaki bir değişiklik, hidrosiklonun performansını etkileyeceği gibi, devreden yükü ve dolayısıyla öğütme performansını da etkilemektedir. Bu nedenle performans belirleme çalışmalarında sınıflandırıcıların performansının belirlenmesi de önem arz etmektedir.

Ekipmanın ve prosesin doğası gereği hiçbir sınıflandırıcı %100 ayırma verimine ulaşamamaktadır. Akış pateni, parçacık çarpışması, türbülans gibi stokastik faktörler nedeniyle ince malzemenin kaba malzeme akımına, aynı şekilde kaba malzemenin ince malzeme akımına gittiği gözlenmektedir. İdeal performans eğrisinde ekipmanın ayırım boyutundan ince malzemeler ince ürün akışından sistemden uzaklaştırılırken iri malzemeler ise iri ürün akımına gitmektedir. Şekil 2.9'da ideal performans eğrisi ve gerçek performans eğrisi karşılaştırılması verilmiştir. Bu iki eğri arasındaki fark ne kadar az ise sınıflandırıcının verimi o kadar ideale yakındır.



Şekil 2.9 Hidrosiklon performans eğrisi

Hidrosiklonlarda ayırma verimi ayırım keskinliği ve d50 değeri ile değerlendirilmektedir. Partisyon eğrisi çizildikten sonra, beslemeden %50 olasılıkla alt akıma giden malzemenin tane boyutu olarak belirlenmektedir. Ayırma keskinliği partisyon eğrilerinin eğimine doğrudan etki etmektedir. Ayırma keskinliği artıkça eğri dikleşme eğilimindedir ve daha iyi bir ayırım gerçekleşmektedir. Ayırma keskinliği (I) şu şekilde ifade edilmektedir:

$$I = \frac{x_{75} - x_{25}}{2x_{50}} \quad (\text{Eşitlik 2.9})$$

x_{75} ve x_{25} beslemedeki alt akışa gitme olasılığı %75 ve %25 olan malzeme boyutu olarak tanımlanmaktadır.

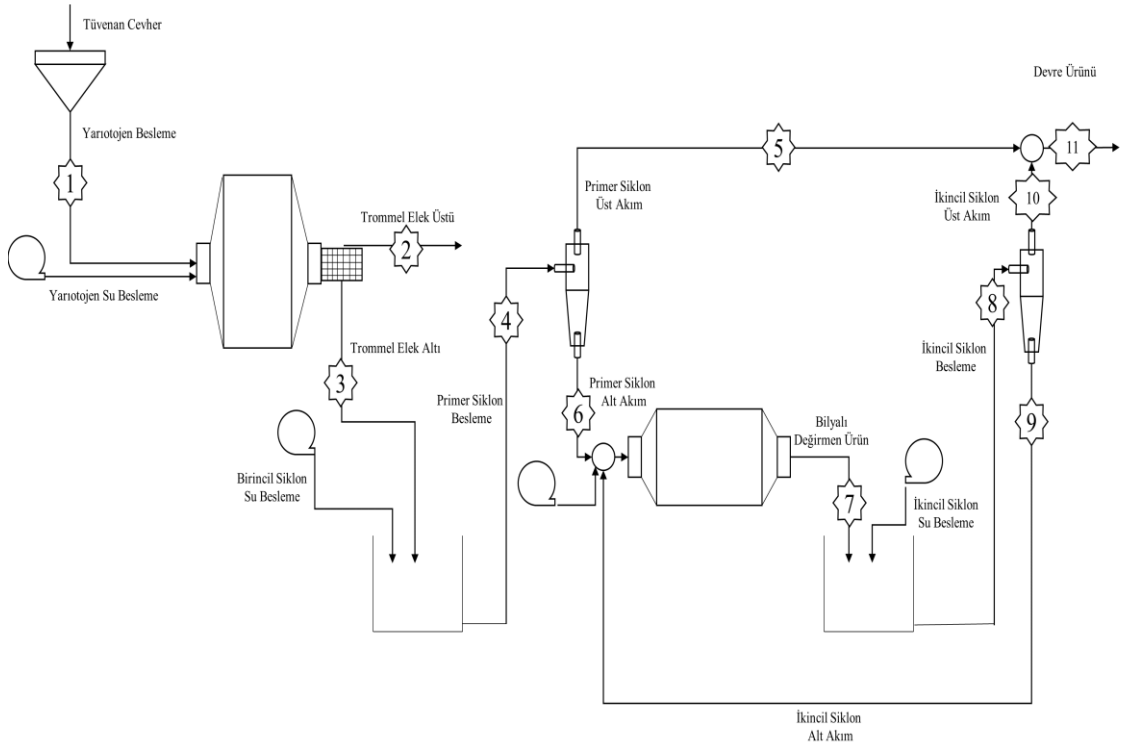
Partisyon eğrilerinin ulaştığı en düşük değer beslemeden alt takıma sınıflandırmaya tabi olmadan kaçan malzemeyi belirtmektedir. İyi bir sınıflandırma işleminde kaçak miktarının az olması beklenmektedir. Ancak beslemedeki malzemenin bir kısmı by-pass yaparak sınıflandırmaya tabi olmadan ayrılmaktadır. Bu nedenle partisyon eğrisinin düzeltilerek by-pass etkisi ortadan kaldırılmalıdır. Kelsall (53) beslemeden alt akışa by-pass yapan parçacık oranının beslemeden alt akıma giden su oranıyla aynı olduğunu ifade etmektedir. Değerlendirme aşamasında d50 değerine yerine düzeltilmiş grafikten elde edilen d50c değeri kullanılmaktadır.

3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR VE SONUÇLAR

Yürütülen çalışmalar 3 aşama olarak gerçekleştirilmiştir. İlk aşama olarak kararlı halde çalışmakta olan tesisten numune alma ve veri toplama işlemleri gerçekleştirilmiştir. Sonraki aşamada, alınan numuneler laboratuvarında analiz edilmiştir. Son aşamada ise elde edilen bulgular ile öğütme devresinin performansın değerlendirilmesi çalışması gerçekleştirilmiştir.

3.1. Numune Alma Çalışmaları

Bu çalışma kapsamında, Balıkesir ili Sındırgı ilçesinde bulunan, Zenit Madencilik A.Ş.'ye ait açık ocak altın madeninin cevher hazırlama tesisindeki öğütme ve sınıflandırma devresinden numuneler alınmıştır. Tesise ait akım şeması ve numune alma noktaları Şekil 3.1'de gösterilmiştir.



Şekil 3.1 Tesis akım şeması ve numune alma noktaları

Şekil 3.1'de numaralandırılmış numune alma noktalarının temsil ettikleri akışlar Çizelge 3.1'de verilmiştir.

Çizelge 3.1 Numune alma noktaları

#	Açıklama
1	Yarı Otojen Değirmen Besleme
2	Trommel Elek Üst Akım
3	Trommel Elek Alt Akım
4	Primer Siklon Besleme
5	Primer Siklon Üst Akım
6	Primer Siklon Alt Akım
7	Bilyalı Değirmen Ürün
8	İkincil Siklon Besleme
9	İkincil Siklon Alt Akım
10	İkincil Siklon Üst Akım
11	Devre Ürünü

Öğütme devresinde iki adet değirmenden oluşmaktadır. Birincil değirmen olarak çalışan yarı otojen değirmen birincil hidrosiklon ile kapalı devre çalıştırılmaktadır. Hidrosiklon üst akımı son ürün olarak devreden tahliye edilirken, birincil siklon alt akımı bilyalı değirmene beslenmektedir. İkincil değirmen olarak çalışmakta olan bilyalı değirmen de hidrosiklon ile kapalı devre çalışmaktadır ve hidrosiklon alt akımı bilyalı değirmene geri beslenmektedir. İkincil hidrosiklon üst akımı birincil hidrosiklon üst akımı ile birleşerek nihai ürün elde edilmektedir. Akım şemasında yer alan ekipmanların özellikleri Çizelge 3.2 ve Çizelge 3.3’de verilmiştir.

Çizelge 3.2 Değirmenlerin teknik özellikleri

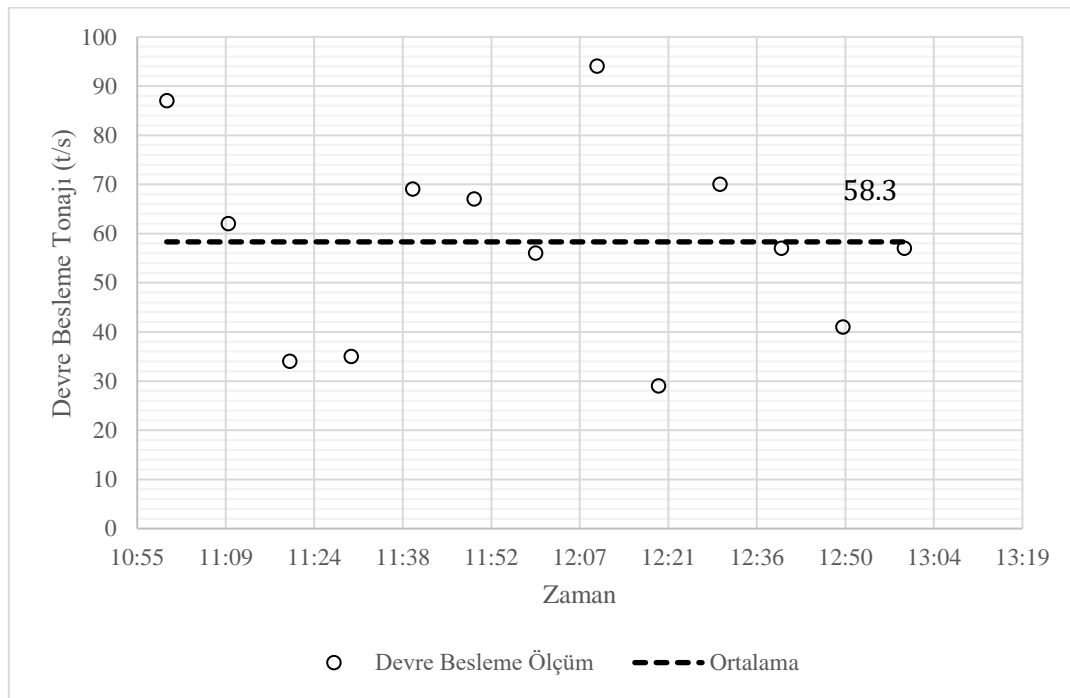
Özellikler	Yarı Otojen Değirmen	Bilyalı Değirmen
Efektif Değirmen Çapı (mm)	5208	3004
Efektif Değirmen Boyu (mm)	2429	4706
Değirmen Devri (dev./dk)	13	18.3
Kurulu Motor Gücü (kW)	1200	710
Çekilen Motor Gücü (kW)	642	538
Hacimce Bilya Doluluk (%)	15.6	30
Maksimum Bilya Çapı (mm)	125	50
Kritik Hız (%)	70	75
Izgara Açıklığı (mm)	20x30 / 30x40	

Çizelge 3.3’de görüleceği üzere, yarı otojen ve bilyalı değirmenler ile kapalı çalışan hidrosiklon geometrik özellikleri farklılık göstermektedir. İki bataryada da 3’er adet hidrosiklon yer almakta olup, birincil siklon bataryasında 2’si, ikincil siklon bataryasında 1’ yedek olarak bulundurulmaktadır.

Çizelge 3.3 Hidrosiklonların geometrik özellikleri

Özellikler	Birincil Siklon	İkincil Siklon
Gövde Çapı (mm)	250	250
Giriş Çapı (mm)	61	73
Vortex (mm)	81.91	60.64
Apex (mm)	70.74	55
Basınç (kPa)	101	114

Numune alma çalışmaları esnasında yarı otojen besleme bandında yer alan kantardan alınan ölçümler neticesinde öğütme devresi ortalama besleme tonajına karar verilmiştir. Buna göre devreye giren ortalama malzeme miktarı 58.3 t/s'dir (Şekil 3.2). Numune alma esnasında alınan besleme numunesi nem ölçümü için tesiste bulunan laboratuvara gönderilmiş ve nem analizi yapılmıştır. Yapılan ölçümlere göre yarı otojen değirmen beslemesinin nem miktarı %3.84 olarak belirlenmiştir.



Şekil 3.2 Numune alma işlemi sırasında yarı otojen değirmen besleme miktarı

Numune alınan diğer akımlardaki akış miktarları Çizelge 3.4 ve 3.5'te verilmiştir

Çizelge 3.4 Yarı otojen devresi akış bilgileri

	Tromel Elek Üstü	Tromel Elek Altı	Birincil Siklon Besleme	Birincil Siklon Üst Akım	Birincil Siklon Alt Akım
Katı Tonajı (t/s)	1.8	56.5	56.5	8.7	47.8

Çizelge 3.5 Bilyalı değirmen devresi akış bilgileri

	Bilyalı Değirmen Ürün	İkincil Siklon Besleme	İkincil Siklon Alt Akım	İkincil Siklon Üst Akım	Devre Ürünü
Katı Tonajı (t/s)	159.5	159.5	11.7	47.8	56.5

Tesisten alınan numuneler öncelikle yüzdece (%) katı değerlerinin belirlenmesi için tartım işlemine tabi tutulmuştur. Alınan numuneler ağızları sıkıca kapatılmış ve nemini kaybetmeyeceğinden emin olunan koşullar sağlandıktan sonra Hacettepe Üniversitesi'ne getirilmiştir. Getirilen numunelerin öncelikle yaş tartımları yapılarak kuruması beklenmiştir. Kuruma işlemi tamamlanan numuneler ve numune içeren variller tartıldıktan sonra akışların yüzdece (%) katı değerleri hesaplanmıştır. Buna göre elde edilen sonuçlar Çizelge 3.6 ve 3.7'de özetlenmiştir.

Çizelge 3.6 Yarı otojen devresi yaş kuru tartım sonuçları

	Tromel Elek Üstü	Tromel Elek Altı	Birincil Siklon Besleme	Birincil Siklon Üst Akım	Birincil Siklon Alt Akım
% Katı	67.5%	57.8%	53.4%	34.3%	71.7%

Çizelge 3.7 Bilyalı değirmen devresi yaş kuru tartım sonuçları

	Bilyalı Değirmen Ürün	İkincil Siklon Besleme	İkincil Siklon Alt Akım	İkincil Siklon Üst Akım	Devre Ürünü
% Katı	69.8%	53.0%	74.1%	35.1%	35.2%

Elek analizleri Ek 1' de verilmiştir. Elek analizlerinden elde edilen tane boyu dağılımları madde denkliği çalışmalarında kullanılmak üzere modellenmiş ve model parametreleri

belirlenmiştir. Belirlenen parametreler ile madde denkleğinde kullanılan elek serisi için tane boyu dağılımı oluşturulmuştur.

3.2. Madde Denkliği Çalışmaları

Tesiste yapılan ölçümler, ölçümlerin doğası, ölçüm hatası, veri yorumlama hatası gibi nedenlerden dolayı farklı zamanlarda birbirlerinden farklı sonuçlar vermektedir. Sabit olmayan kütle miktarı ve boyut dağılım verileri, kütle korunumu konsepti uyarınca denkleştirilmektedir (55). Bu sayede tesis ve akışlar için tek tip temsili veri elde edilmektedir. Performans değerlendirme analizi bu temsili veriler üzerinden yapılmaktadır.

Kütle denkliği hesaplamaları, numune alma yönteminden ve ölçüm hatalarından etkilenmektedir. Tesiste denklik hesaplamalarının yapılması için analitik yöntemler kullanılmaktadır. Bu hesaplamaların nihai amacı tesisten toplanan verinin denkleştirilmesidir. Bu amaca ulaşmak için analitik yöntemlerden birisi olan “en küçük kareler” yöntemi bu çalışmada kullanılmıştır.

Sabit bir kütle akışı olan ideal bir devre için besleme (F), konsantre (C) ve artık (T) arasındaki ilişki Eşitlik 3.1’deki gibidir:

$$F \cdot f - C \cdot c - T \cdot t = 0 \quad (\text{Eşitlik 3.1})$$

F, C ve T sırasıyla besleme, konsantre ve atıktaki katı akışlardır. f, c ve t sırasıyla besleme, konsantre ve atıktaki malzemenin boyut fraksiyonlarıdır.

Yukarıda bahsedilen en küçük kareler toplamından elde edilen hatalardan kaynaklı olarak denklemin sol tarafı sıfırdan farklı bir değer almaktadır ve formül (Eşitlik 3.1) şu (Eşitlik 3.2) hale gelmektedir:

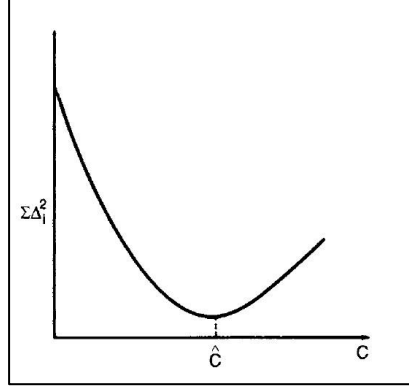
$$F \cdot f - C \cdot c - T \cdot t = \Delta \quad (\text{Eşitlik 3.2})$$

(Δ) ölçümlerden kaynaklanan hatalardır.

Bunun için bir dizi denklemi birlikte çözmek gerekir ve sonuç olarak Eşitlik 3.3 gibi bir denklem elde edilir. Bu denklem, hataların karesine ve C, c f, t, değerlerine bağlıdır.

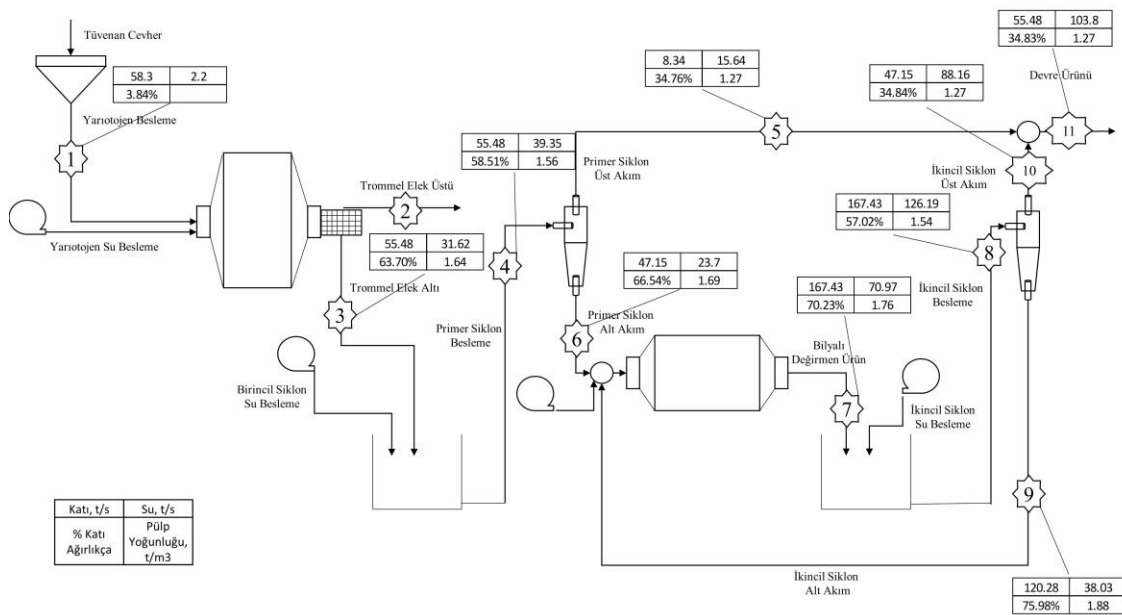
$$\sum \Delta_i^2 = \sum (f_i - t_i)^2 + C^2 \sum (c_i - t_i)^2 - 2C \sum (f_i - t_i)(c_i - t_i) \quad (\text{Eşitlik 3.3})$$

Bileşen hatalarının karelerinin toplamının ($\sum \Delta_i^2$) değerinin C'ye bağlı grafiği Şekil 3.3'de gösterilmektedir. $\sum \Delta_i^2$ değeri, hiçbir durumda sıfır olamaz ancak türevinin sıfır olduğu noktada minimum değerine ulaşır ($\frac{d\sum \Delta_i^2}{dC} = 0$).



Şekil 3.3 C'nin değerlerine karşı bileşen hatalarının karelerinin toplamının grafiği (54)

Bu çalışma kapsamında tesisten toplanan veri yukarıda bahsedilen yöntem yardımıyla denkleştirilmiş ve tüm akışlar için elde edilen veriden (ölçümler, tahminler) tutarlı ve temsili veri elde edilmiştir. Denkleştirilmiş veriler EK 2'de verilmiştir. Yarı otojen devresine ve bilyalı değirmen devresi madde denklığı çalışması sonucu elde edilen akış bilgisi Şekil 3.4, Çizelge 3.8 ve 3.9'da verilmiştir. Değirmenler ve siklonlar için elde edilen denkleştirilmiş verilerin tesis ölçümü ile kıyası Şekil 3.5, 3.6, 3.7, 3.8 ve 3.9'da verilmiştir.



Şekil 3.4 Madde denklığı çalışması sonuçlarının akışlar üzerinde gösterimi

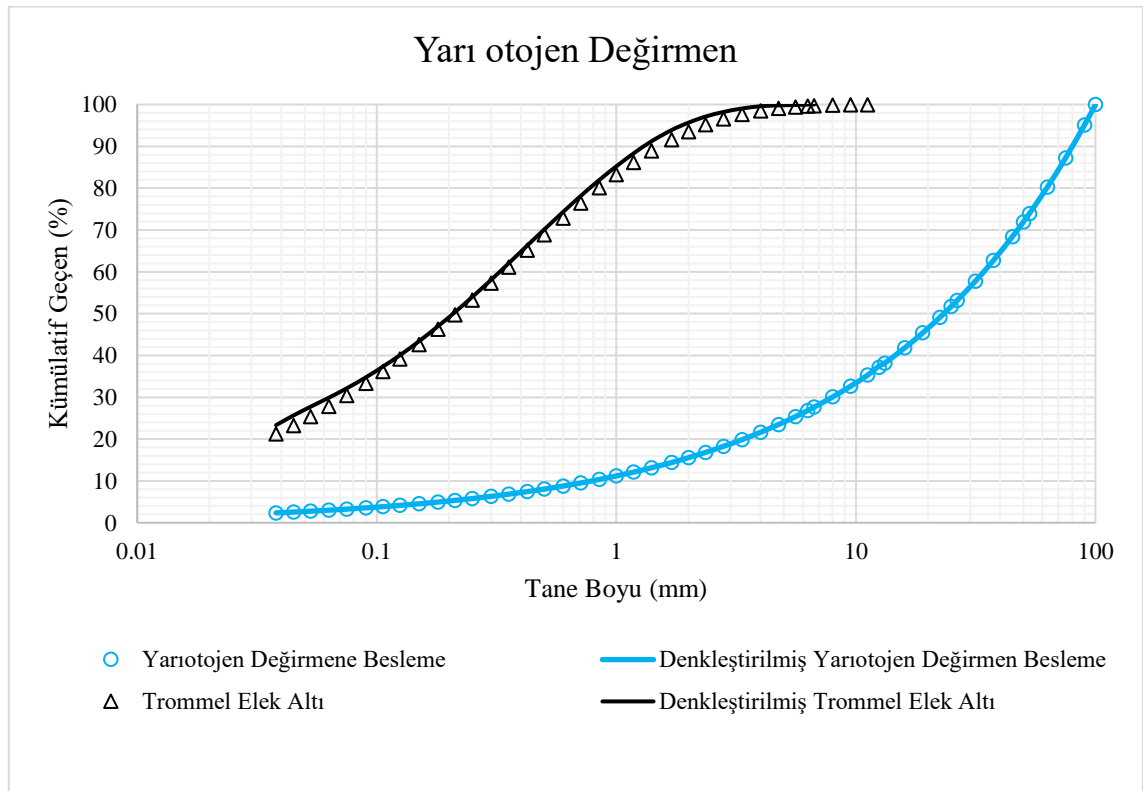
Çizelge 3.8 Denkleştirilmiş yarı otojen devresi akış bilgileri

	Tromel Elek Üstü	Tromel Elek Altı	Birincil Siklon Besleme	Birincil Siklon Üst Akım	Birincil Siklon Alt Akım
Katı Tonajı (t/s)	2.8	55.5	55.5	8.3	47.2

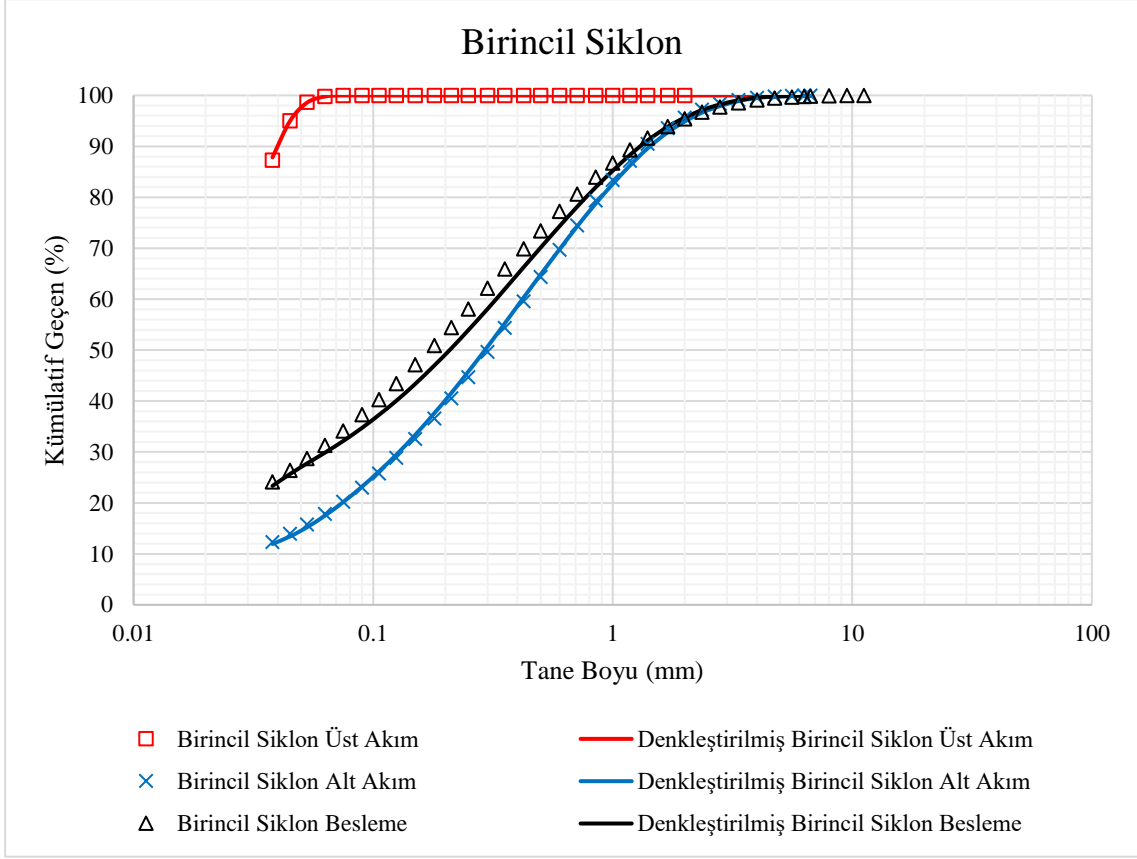
Çizelge 3.9 Denkleştirilmiş bilyalı değirmen devresi akış bilgileri

	Bilyalı Değirmen Ürün	İkinci Siklon Besleme	İkinci Siklon Alt Akım	İkinci Siklon Üst Akım	Devre Ürünü
Katı Tonajı (t/s)	167.4	167.4	120.3	47.2	55.5

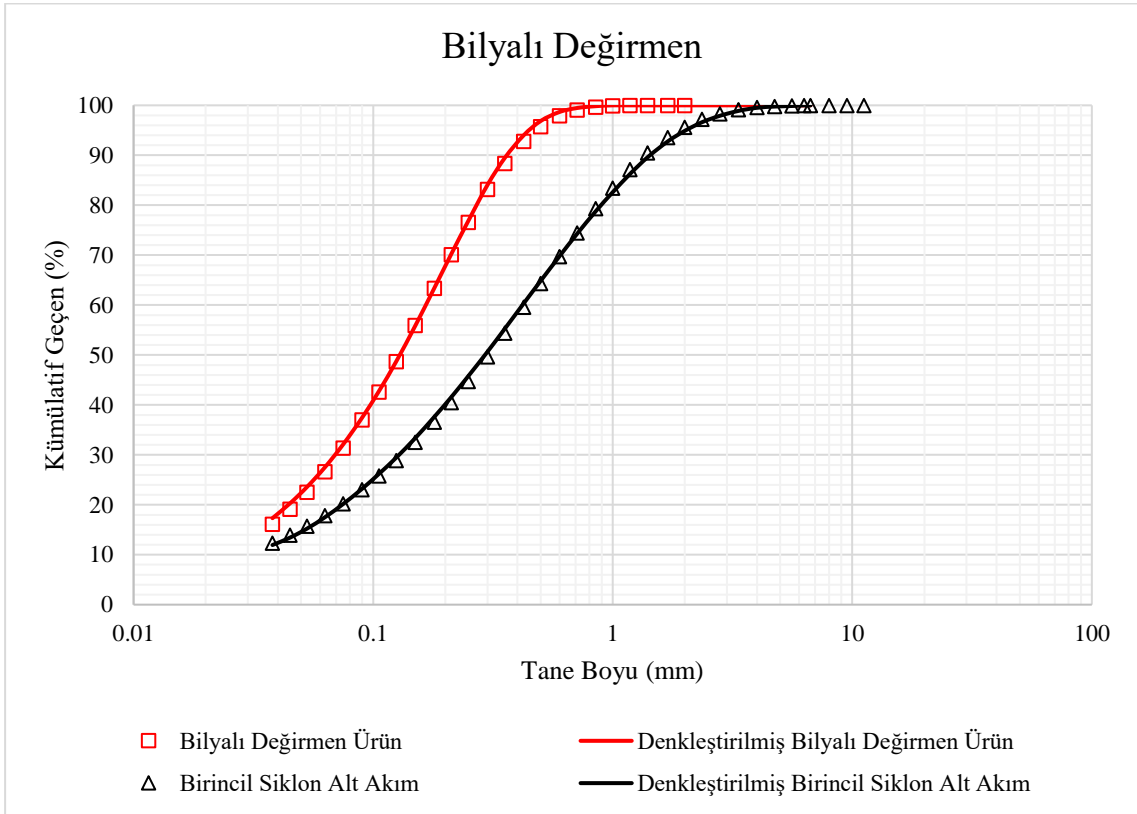
Primer kırma ürünü olan yarı otojen değirmen beslemesinin %80'nin geçtiği tane boyu 66.04 mm olarak hesaplanmıştır. Tane boyu dağılımlarının belirlenmesi ve ardından yapılan madde denklığı çalışmaları sonucundan yarı otojen değirmen ürününü %80'nin geçtiği tane boyu 0.77 mm olarak hesaplanmıştır. İndirgeme oranı ise 85.8 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 3.5 Yarı otojen değirmen ölçüm ve denkleştirilmiş boyut dağılımları



Şekil 3.6 Birincil siklon ölçüm ve denkleştirilmiş tane boyu dağılımları

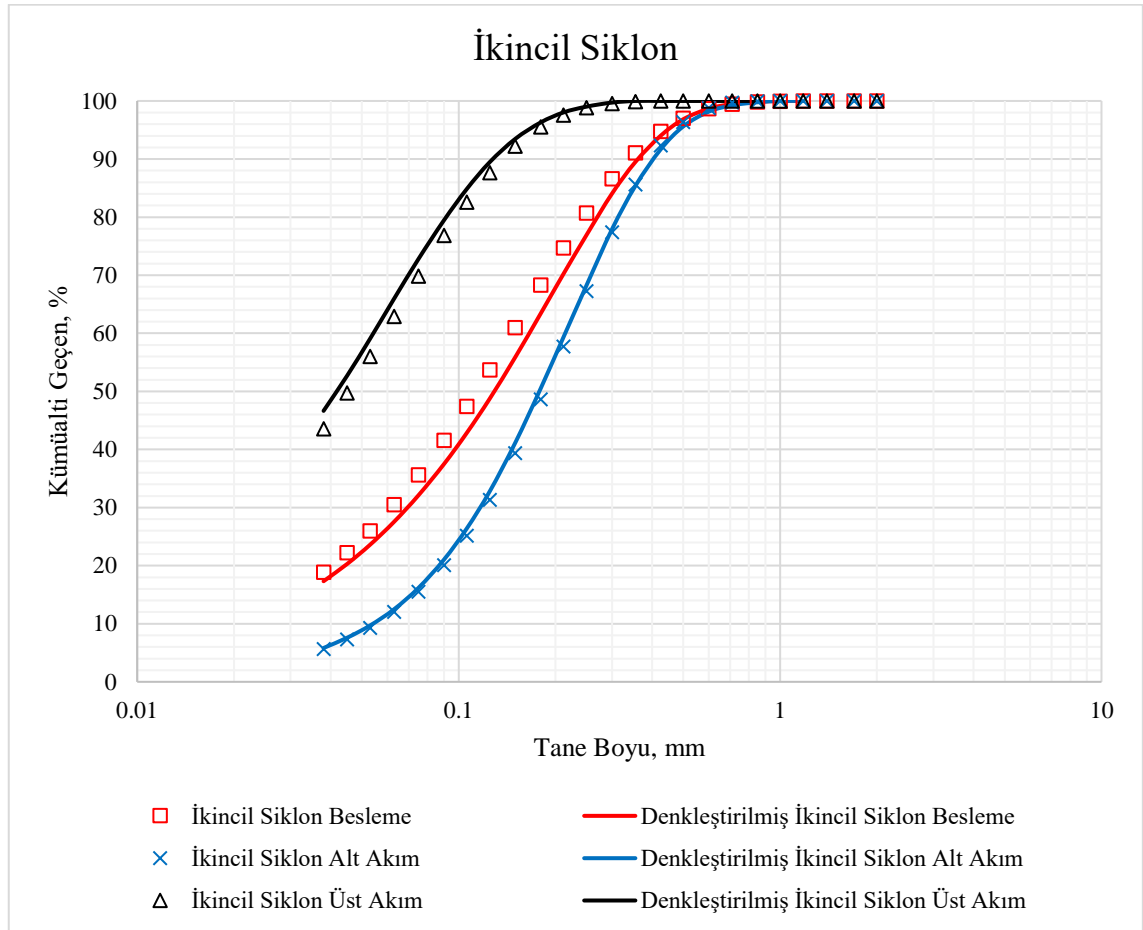


Şekil 3.7 Bilyalı değirmen ölçüm ve denkleştirilmiş tane boyu dağılımları

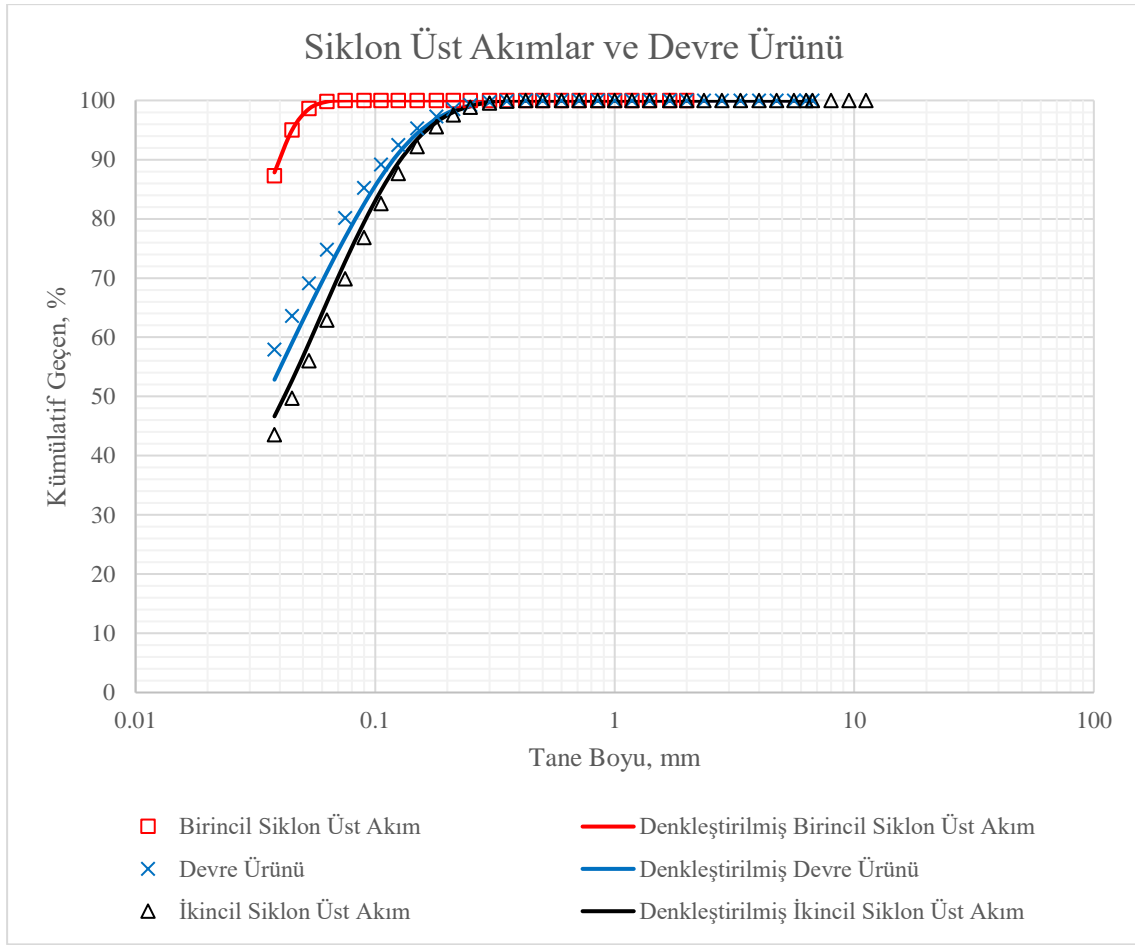
Madde denkliği sonrası bilyalı değirmen taze beslemesi olan birincil siklon alt akış malzemenin %80'nin geçtiği tane boyutu 897.3 μm olarak hesaplanmıştır. Bilyalı değirmen devresi ürünü olan ikincil siklon üst akımından malzemenin %80'nin geçtiği tane boyu ise 91.6 μm olarak hesaplanmıştır. Buna göre bilyalı değirmen indirgeme oranı 9.8 olarak belirlenmiştir.

Bilyalı değirmen taze beslemesi madde denkliği sonrası 55.48 t/s ve ikincil siklon alt akımı 120.28 t/s olarak hesaplanmıştır. Buna göre bilyalı değirmen devreden yükü Eşitlik 3.4 uyarınca %316.8 olarak hesaplanmıştır.

$$\text{Devreden Yık} = \frac{\text{Taze Besleme} + \text{Siklon Alt Akış}}{\text{Taze Besleme}} \times 100 \quad (\text{Eşitlik 3.4})$$



Şekil 3.8 İkincil siklon ölçüm ve denkleştirilmiş tane boyu dağılımları



Şekil 3.9 Siklon üst akımları ve devre ürünü ölçüm ve denkleştirilmiş tane boyu dağılımları

3.3. Ağırlık Düşürme Testi

Ağırlık düşürme testi bir cevherin darbe kırılma özelliklerini belirlemek için geliştirilmiştir. Değirmen içerisinde darbe (yüksek enerji) ve aşınma (düşük enerji) olmak üzere kırılmaya etken iki ana mekanizma vardır. Ağırlık düşürme testi kullanılarak belirli bir cevher numunesi için darbe kırılma parametreleri olan A ve b değerleri bulunmaktadır. Bu değerler cevherin darbe ile kırılmasına karşı direncinin sayısal ifadesidir.

Ağırlık düşürme testi Ersel Ağır Makina ve San. ve Tic. A.Ş. firmasının Tuzla Organize Sanayi Bölgesinde bulunan üretim tesisi içerisindeki laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Düzenek cevher tanesinin yerleştirildiği örs, çeşitli ağırlıklar ve bu ağırlıkların tutulduğu kafa kısmına sahiptir. Ağırlıklar piston yardımıyla istenilen yüksekliğe getirilmektedir. Kontrol ekranından dijital olarak pistonlar ile ağırlıkların serbest düşme hareketini gerçekleştirmesi sağlanmaktadır (Şekil 3.10)



Şekil 3.10 Ağırlık düşürme test cihazı (Ersel Ağır Makina A.Ş.)

Test için tesisten alınan numuneler beş farklı dar tane boyut fraksiyonunda sınıflandırılmış ve her bir boyut fraksiyonu için 60 adet malzeme seçilmiştir. Her boyut fraksiyonu için 3 ayrı enerji seviyesinde 20'şer adet parça kullanılmıştır. Tanelerin kırılacağı enerji seviyesi belirlendikten sonra Eşitlik 3.5 (17) kullanılarak istenilen enerji seviyesini, belirlenen ağırlık ile sağlayacak yükseklikler belirlenmiştir.

$$h_i = \frac{\bar{m} E_{is}}{0.0272 M d} \quad (\text{Eşitlik 3.5})$$

h_i : düşürme yüksekliği (cm)

\bar{m} : ortalama tane ağırlığı (g)

E_{is} : darbe kırma enerjisi (kWs/t)

$M d$: Düşürme ağırlığı (kg)

Deneyde kullanılan boyut fraksiyonları, fraksiyonlara ait enerji seviyeleri, kullanılan ağırlıklar ve düşürme yükseklikleri Çizelge 3.10’da verilmiştir.

Çizelge 3.10 Ağırlık düşürme test parametreleri

	Düşürme Ağırlığı (kg)	Tane Adedi #	Ortalama Boyut (mm)	Toplam Tanelerin Ağırlığı (g)	Ortalama Ağırlık (g)	Ecs (kWs/t)	Düşürme Yüksekliği (cm)
(-63+53)mm	41.77	20	57.78	4868.00	243.40	0.10	21.43
	41.77	20	57.78	4867.00	243.35	0.15	32.13
	41.77	20	57.78	4581.00	229.05	0.25	50.41
(-45+37.5)mm	41.77	20	41.08	1999.00	99.95	0.10	8.80
	41.77	20	41.08	1893.00	94.65	0.25	20.83
	41.77	20	41.08	1730.00	86.50	0.50	38.07
(-31.5+26.5)mm	41.77	20	28.89	664.00	33.20	0.25	7.31
	41.77	20	28.89	602.00	30.10	1.00	26.50
	41.77	20	28.89	539.00	26.95	1.50	35.59
(-22.4+19)mm	30.73	20	20.63	267.00	13.35	0.50	7.99
	30.73	20	20.63	254.00	12.70	1.25	18.99
	30.73	20	20.63	231.00	11.55	2.00	27.63
(-16+13.2)mm	15.26	20	14.53	85.00	4.25	0.50	5.12
	15.26	20	14.53	77.00	3.85	1.25	11.60
	15.26	20	14.53	69.00	3.45	2.50	20.79

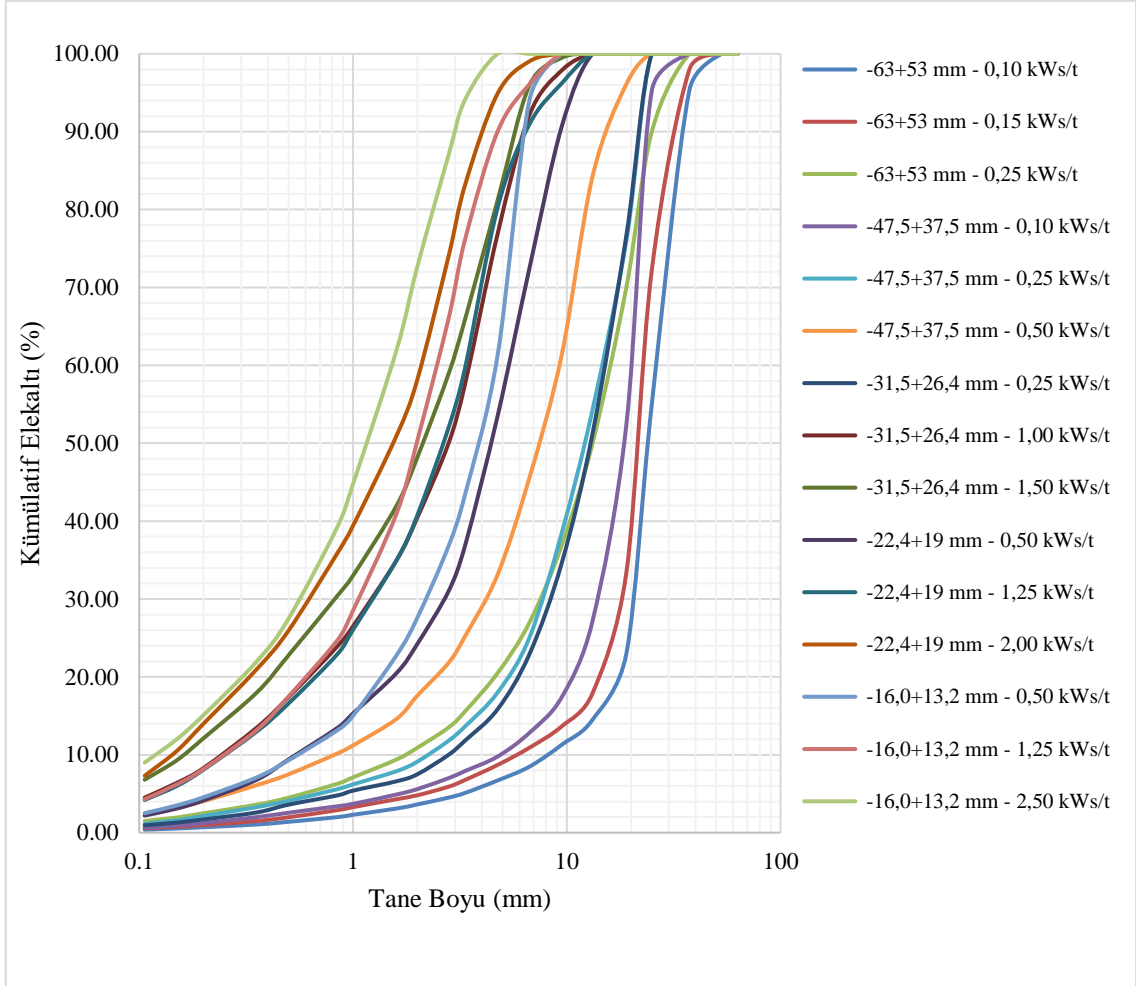
Her boyut-enerji kombinasyonu için kırılan ürünler toplanarak 63 mm en büyük 106 mikron en küçük elek açıklığı olan elekler kullanılarak elek analizleri gerçekleştirilmiştir.

Şekil 3.11’den görüleceği üzere, farklı boyut aralıklarına uygulanan farklı enerji seviyeleri, kırılma davranımını etkilemektedir. Beklenildiği üzere daha yüksek enerji seviyesi uygulanan tanelerden daha ince ürün elde edilmektedir.

Elde edilen ürün tane boyu dağılımları, başlangıç boyutuna göre normalize edilmiş ve t₂, t₄, t₁₀, t₂₅, t₅₀, ve t₇₅ değerleri interpolasyon yöntemi ile hesaplanmıştır. t_n değerleri test tanesinin boyut aralığının geometrik ortalamasının 1/n değerinden geçen malzeme miktarının bulunması ile hesaplanmaktadır (17). t₂, t₄, t₂₅, t₅₀ ve t₇₅ değerlerine karşın t₁₀ ilişkisinin grafiği Şekil 3.12’de verilmiştir.

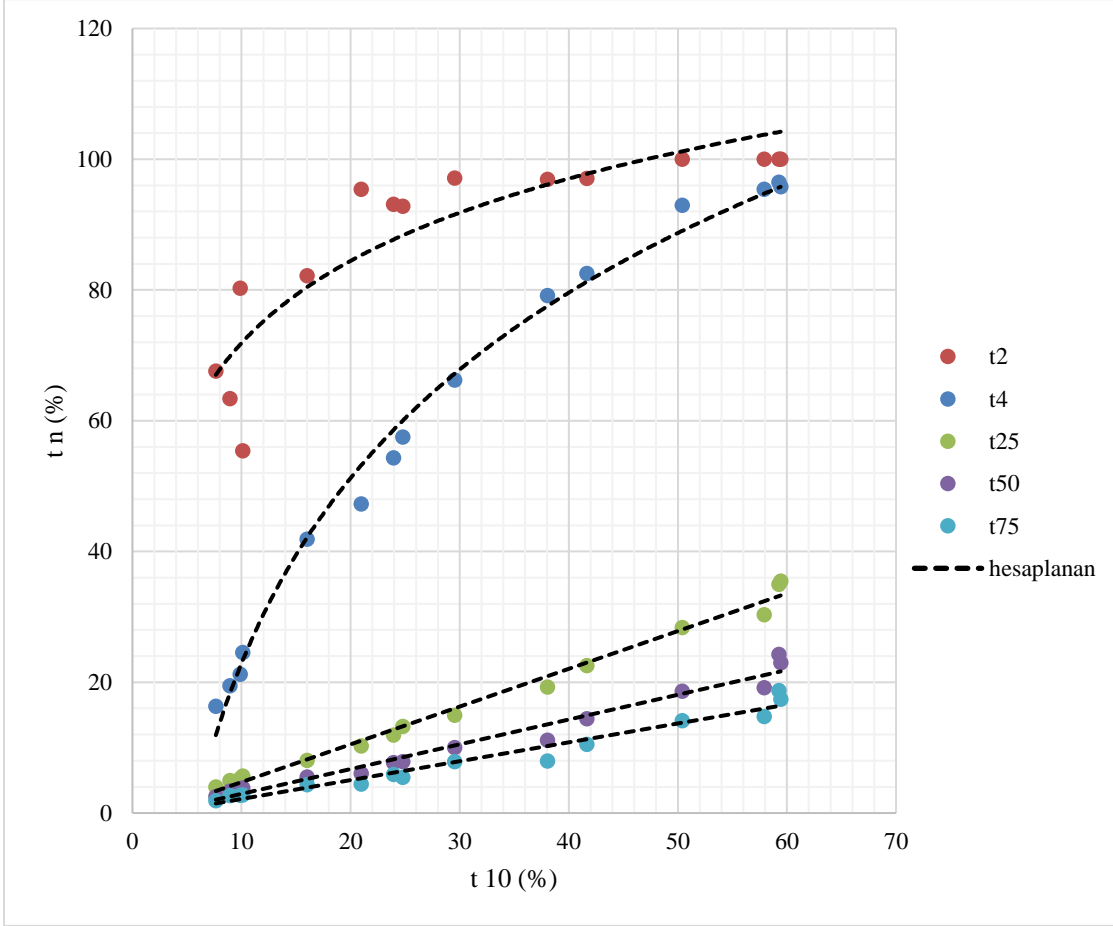
Elde edilen bu grafikteki her dikey çizgi (t₁₀ değeri) kümülatif % geçen olarak tam bir boyut dağılımını ifade etmektedir. Bu nedenle Şekil 3.12’de gösterilen veriler bilinen herhangi bir kırılma derecesi ya da t₁₀ değeri için tane boyu dağılımını tahmin etmek için

kullanılabilir. Kırılma verilerinin bu şekilde gösterimi genellikle tek parametrelî eğri ailesi olarak adlandırılır. (56)



Şekil 3.11 Ağırlık düşürme testi sonucunda elde edilen ürün tane boyu dağılımları

Hesaplanan t_{10} incelik indeksi değerlerine karşılık özgül ufalanma enerjisi (E_{cs}) değerlerin gösterildiği grafik Şekil 3.13’da verilmiştir. Hesaplanan t_{10} değerleri ve Eşitlik 3.6 kullanılarak lineer olmayan regresyon tekniği ile A ve b parametreleri belirlenmiştir. A ve b cevherin darbe kırılma parametreleridir. A değeri t_{10} ’un sınır değeridir. Bu değer özgül ufalanma enerjisi arttıkça boyut küçültmenin çok az gerçekleştiğini ve prosesin verimsizleştiğini belirtmektedir (17).



Şekil 3.12 tn(%) ve t10(%) ilişkisi

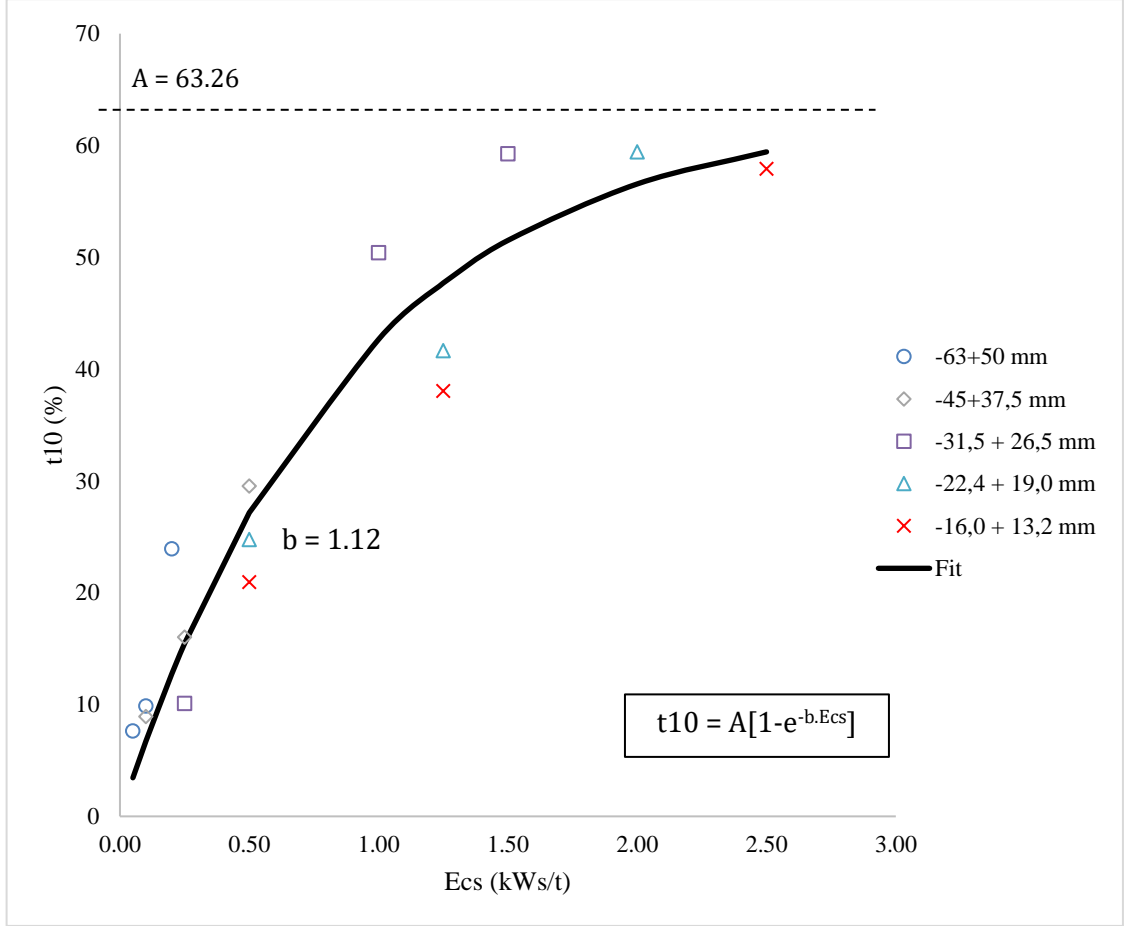
Elde edilen sonuçlara göre A değeri 63.26 ve b değeri 1.33 Axb değeri 70.98 olarak hesaplanmıştır.

$$t_{10} = A[1 - e^{-b \cdot Ecs}] \quad (\text{Eşitlik 3.6})$$

t10 : İncelik indeksi

A, b : Cevherin darbe kırılma parametreleri

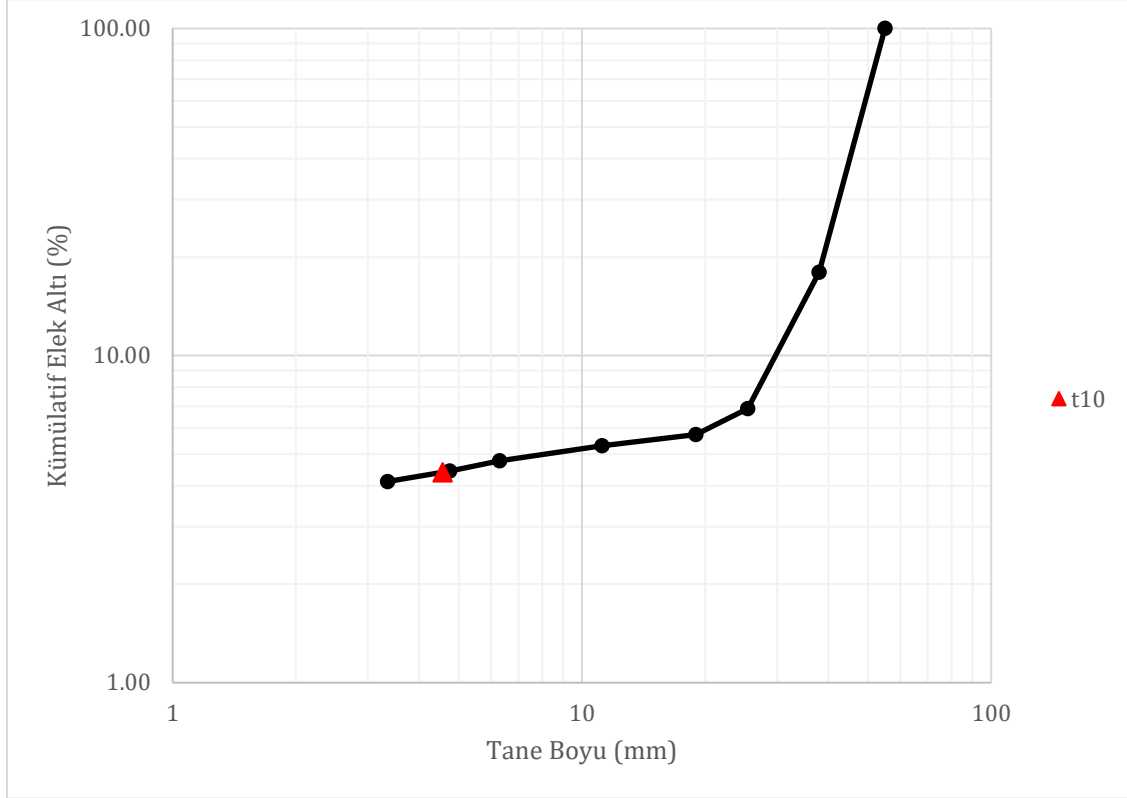
Ecs : Özgül ufalama enerjisi (kWs/t)



Şekil 3.13 t10(%) ve Ecs (kW/s/t) ilişkisi

3.4. Aşınma Testi

JKMRC tarafından geliştirilen ve cevherin aşınarak kırılmasını tanımlamak için yapılan aşınma testi 300 x 300 mm çap ve boya sahip tamburlu değirmende gerçekleştirilmektedir. -55 + 38 mm aralığında elenen cevher numune bölücü yardımı ile yaklaşık 3kg'lık numunelere ayrılmıştır. Daha sonra 3 kg'a mümkün olduğunca yakın olması için taneler rastgele seçilir. Seçilen bu taneler 10 dakika boyunca %70 kritik hızda (53 d/dk) öğütülmektedir. Test sonunda numunenin tane boyu dağılımı analizi yapılır. Elde edilen grafikteki (Şekil 3.14) t10 değerinin 1/10'una karşılık gelen değer otojen/yarı otojen modelinde cevher aşınma parametresi olarak kullanılan ta değeri olmaktadır. Yapılan çalışma sonucunda besleme boyut aralığı olarak belirlenen -55 + 38 mm nominal boyutu 45.7 mm olarak hesaplanmıştır. Nominal boyutun 1/10'u t10 boyutunu vermektedir. Buna göre ta değeri 0.44 olarak belirlenmiştir.



Şekil 3.14 Aşınma testi sonucu elde edilen tane boyu dağılımı ve t10(%) değeri

3.5. Bond Öğütülebilirlik Testi

Bond öğütülebilirlik testi malzemenin kırılmaya ve öğütülmeye karşı olan direncini belirlemek için kullanılmaktadır ve test sonucunda Bond iş indeksi (W_i) değeri hesaplanmaktadır. Bu değer teorik olarak bir ton malzemenin sonsuz tane boyutundan, %80'inin 100 μm boyutuna öğütülmesi için gereken enerji miktarını belirtmektedir.

Bond öğütülebilirlik testi TSE-7700 standartlarına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Testte kullanılan Bond deney değirmeni 305 x 305 mm boyutlarındadır. Değirmen 70 dev./dk hızda çalıştırılmıştır. Test için kullanılan numune yarı otojen değirmen besleme bandından alınan numunelerden temsili olarak seçilmiştir. Seçilen bu numuneler kırılarak 3.35 mm açıklığa sahip elekten geçirilmiş ve elek altı malzemeden 1000 cm^3 bir kabın ⁷⁰⁰ cm^3 'ünü dolduracak kadar numune alınmıştır. İş indeksi hesaplamasında Bond (57) tarafından geliştirilen Eşitlik 3.7 kullanılmıştır. Deneyden elde edilen sonuçları Çizelge 3.11'de verilmiştir.

$$W_i = \frac{48.95}{D^{0.23} G_{bp}^{0.82} 10 \left(\frac{1}{\sqrt{P_{80}}} - \frac{1}{\sqrt{F_{80}}} \right)} \quad (\text{Eşitlik 3.7})$$

Wi : Bond iş indeksi (kWs/t),

D : Test eleği (μm)

G_{bp} : Öğütülebilirlik değeri (g/devir)

P₈₀ : Ürünün %80'inin geçtiği tane boyu (μm)

F₈₀ : Beslemenin %80'inin geçtiği tane boyu (μm)

Çizelge 3.11 Bond öğütülebilirlik deneyinden elde edilen parametreler

Öğütme Öncesi		N(Devir)	Öğütme Sonrası			G (g/dev)	Devreden Yük
Taze Besleme	Taze Besleme Elek Altı		Elek Üstü	Elek Altı	Net Elek Altı		
1100	108	140	831	269	161	1.15	309
269	26	250	774	326	300	1.20	237
326	32	236	779	321	289	1.23	243
321	31	230	785	315	284	1.23	249
315	31	230	790	310	279	1.21	255

Bond iş indeksi hesaplamasında kullanılan G_{bp}, %250 devreden yükte dengeye gelen son üç turun ortalaması olarak alınmıştır. Deney sonucunda elde edilen parametreler Çizelge 3.12'te verilmiştir.

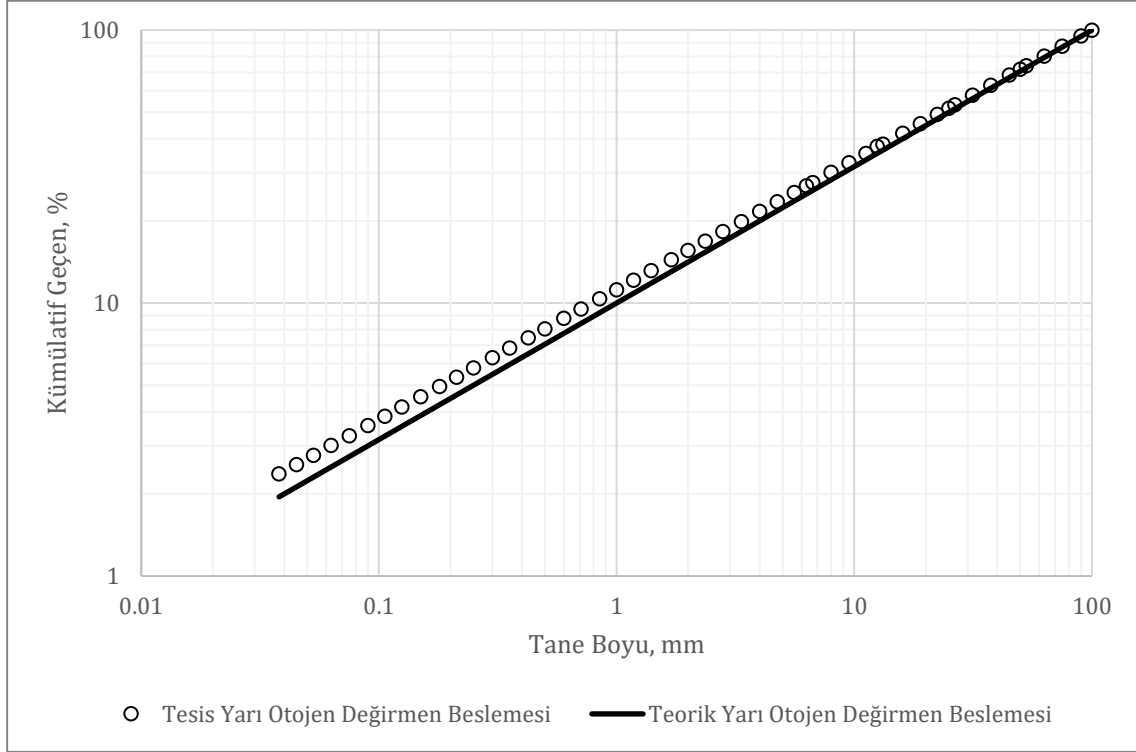
Çizelge 3.12 Bond iş indeksi hesaplamasında kullanılan parametreler ve iş indeksi değeri

D (test eleği) μm	90
G_{bp} (ortalama)	1.22
P80 μm	59
F80 μm	1902
Wi (kWs/t)	13.77

4. SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ

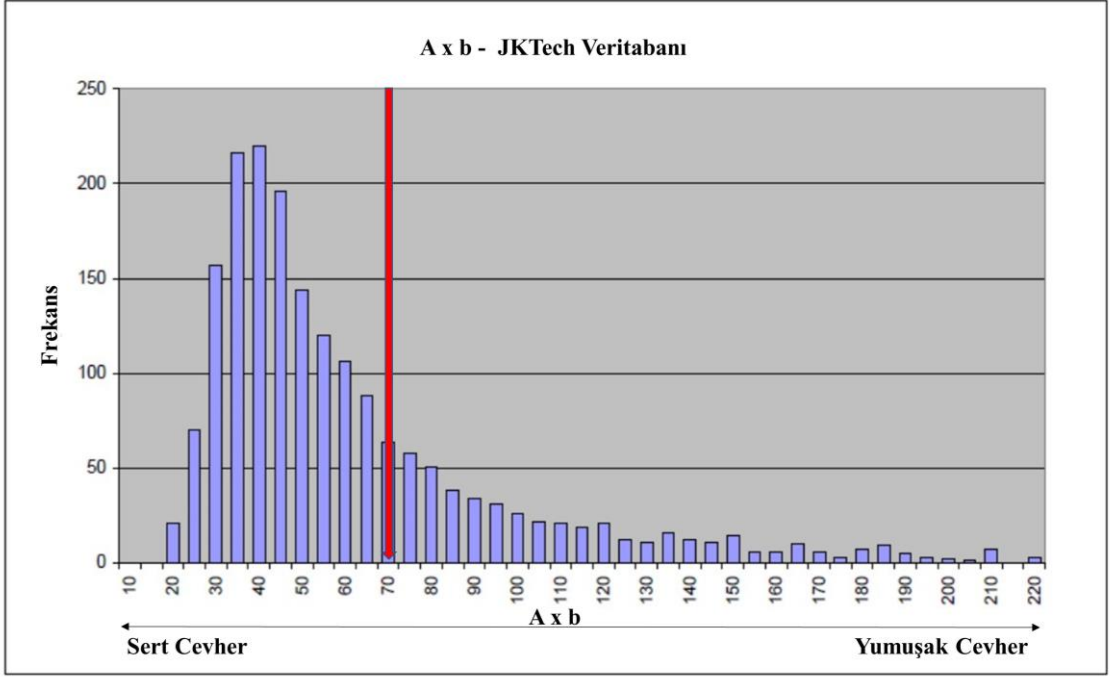
4.1. Yarı Otojen Değirmen Performans Değerlendirmesi

Yarı otojen değirmenin performansının değerlendirilmesine öncelikli olarak değirmen beslemesinden başlanmıştır. Başparmak kuralı olarak yarı otojen değirmen beslemesinin Gates Gaudin Schumann boyut dağılımı modeline göre eğiminin 0.5 olması beklenmektedir. Yeni tasarımlar için hazırlanan beslemenin de bu özellikte olması sağlanmaktadır. Bunun amacı değirmen beslemesinde kaba ve ince malzemelerin aynı oranda bulunmasıdır. Mevcut durumda değirmen beslemesinin eğimi 0.48 olarak hesaplanmıştır. Şekil 4.1 de görüleceği üzere yarı otojen değirmen beslemesi teorik olarak olması gereken besleme dağılımı ile paralellik göstermektedir. Bu nedenle değirmen beslemesinin uygun olduğu gözlenmiştir.

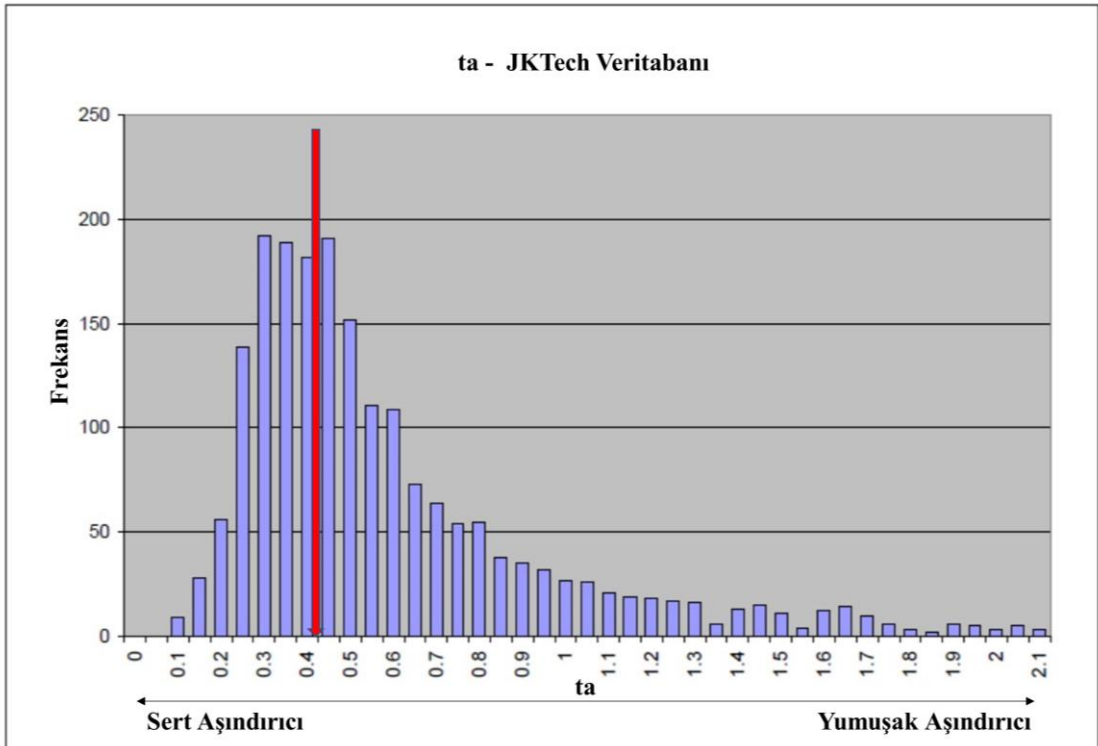


Şekil 4.1 Yarı otojen değirmen besleme teorik ve tesis karşılaştırılması

Gerçekleştirilen ağırlık düşürme ve aşındırma testleri sonucunda cevherin A_{xb} değeri 70.98 ve t_a değeri 0.44 olarak bulunmuştur. Şekil 4.2 de verilen JKTech veritabanında yer alan bilgiler incelendiğinde cevherin orta sert aralığında yer aldığı görülmektedir. Şekil 4.3'de t_a değerinin incelendiğinde ise cevherin aşınma değerinin yüksek olduğu belirlenmiştir.



Şekil 4.2 Axb değerinin JKTech veritabanındaki frekans dağılımı (58)



Şekil 4.3 ta değerinin JKTech veritabanındaki frekans dağılımı (58)

Tesis ölçümü sırasında kaydedilen değirmenin çektiği güç 642 kW'dır. Yarı otojen değirmen kurulu motor gücünün ise 1200 kW olduğu bilinmektedir. Yapılan değerlendirme sonucunda yarı otojen değirmende çekilen güç kurulu gücün %53.5'i kadardır. Yapılan değerlendirme sonucunda yarı otojen değirmende kapasite artışı için yeterli marjın olduğu belirlenmiştir.

4.2. Bilyalı Değirmen Performans Değerlendirmesi

Bilyalı değirmen performans değerlendirme için iş indeksi verimliliği yöntemi kullanılmıştır. Laboratuvar ortamında standart Bond deneyi ile elde edilen iş indeksi değeri, tesis koşullarında hesaplanan iş indeksi değeri ile karşılaştırılmıştır.

İşletme iş indeksi hesaplamasında kullanılan parametreler çizelge 4.1'de verilmiştir.

Çizelge 4.1 İşletme iş indeksi hesaplamasında kullanılan parametreler

Açıklama	Değer
Bilyalı değirmen devresi kuru besleme (t/s)	47.15
Bilyalı değirmen devresi F ₈₀ (μm)	897.3
Bilyalı değirmen devresi P ₈₀ (μm)	91.6
Bilyalı değirmenin çektiği güç (kW)	538

İş indeksi hesaplamasında Eşitlik 4.1 kullanılmıştır.

$$Wi_{op} = \frac{P}{M \left(\frac{10}{\sqrt{P_{80}}} - \frac{10}{\sqrt{F_{80}}} \right)} \quad (\text{Eşitlik 4.1})$$

Wi_{op} : işletme iş indeksi değeri (kWs/t)

P : değirmenin çektiği güç (kW)

M : devre kuru besleme miktarı (t/s)

F₈₀ : devre beslemesinin %80'nin geçtiği tane boyutu (μm)

P₈₀ : devre ürünün %80'nin geçtiği tane boyutu (μm)

Hesaplanan işletme iş indeksi değeri, Wi_{op} 16.04 (kWs/t) olarak bulunmuştur. Bond iş indeksi değeri gerçekleştirilen deney sonucunda 13.77 (kWs/t) olarak belirlenmiştir. Buna göre iş indeksi verimliliği Eşitlik 4.1 kullanılarak %85.8 olarak bulunmuştur. Bunun anlamı mevcut bilyalı değirmen laboratuvarında belirlenenden %14.2 daha verimsiz

çalışmaktadır. Bond deneyi ile belirlenen enerji gereksiniminden ise %16.5 daha fazla enerji tüketmektedir.

Bilyalı değirmen kurulu gücünün %76'sını kullanmaktadır. Yapılan hesaplamalar sonucunda değirmenin devreden yükünün %316.8 olduğu görülmüştür. Bilyalı değirmende uygulamada kabul edilen devreden yük oranı %300-350 olarak bilinmektedir.

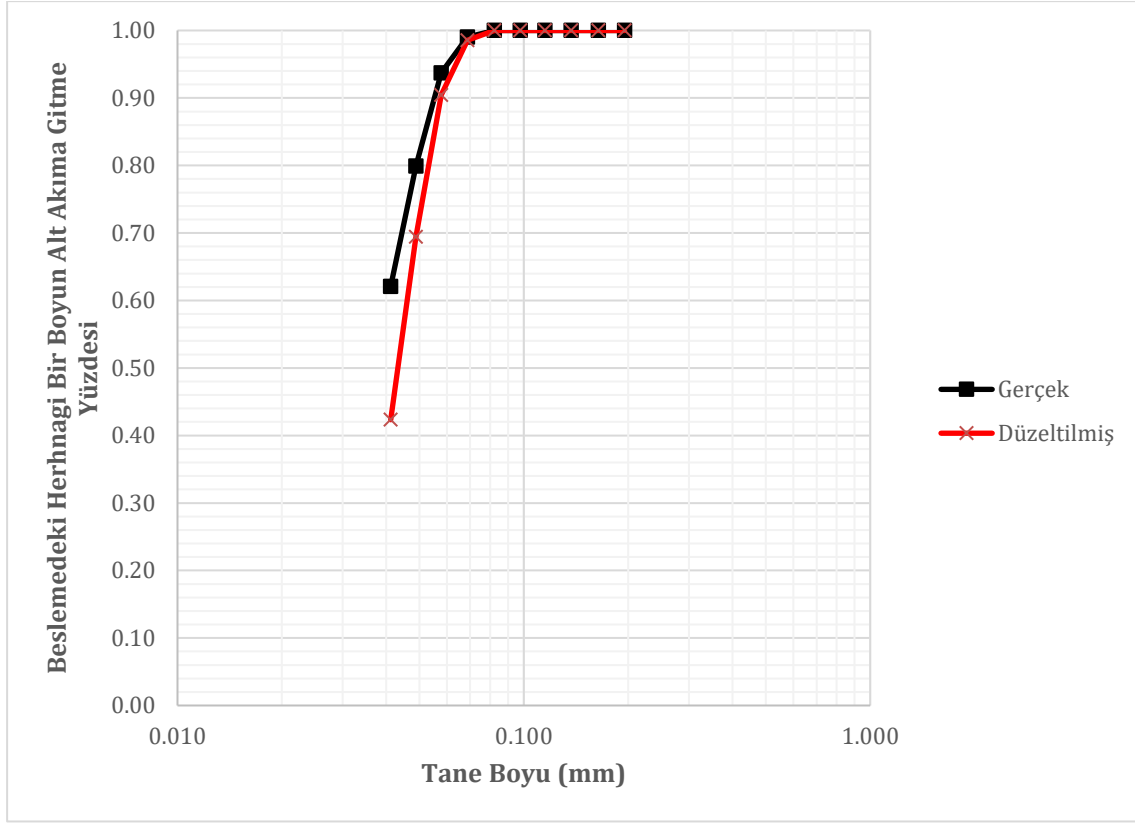
Bilyalı değirmen mevcut çalışma koşulunda tek tip ve 50 mm çapında bilyaların kullanıldığı belirlenmiştir. Bilyalı değirmen beslemesinin F_{100} değeri 6.3 mm iken F_{80} değerinin 391.4 mikron oldu madde denkliği çalışması sonucunda belirlenmiştir. Gerekli bilya boyu değerlendirildiğinde endüstriyel olarak 25 mm bilya boyutunun uygun olduğu görülmektedir.

Gerek çekilen güç ve gerekse devreden yük göz önüne alındığında bilyalı değirmenin mevcut koşullarda iyi çalıştığı ve kapasite artışı için sınırlı yerinin olduğu tespit edilmiştir.

4.3. Hidrosiklonların Performans Değerlendirmesi

Performans eğrileri, diğer adıyla tromp eğrileri hidrosiklon ve diğer sınıflandırıcıların performansını değerlendirmede kullanılmaktadır. Eğrilerin eğimi ne kadar dik ise ayırım keskinliğin o kadar iyi olduğunu, eğrinin yatay yönde genişliğinin artması ise ayırım keskinliğinin azaldığını belirtmektedir. Hidrosiklon performans değerlendirmesinde gözetilen diğer bir husus ise, kaçak malzeme miktarıdır. Eğrinin ulaştığı en düşük nokta kaçak miktarını belirtmektedir. İyi bir ayırımın gerçekleştiği durumlarda bu miktarı düşük olması beklenmektedir.

Çalışma kapsamında tesiste yer alan birincil ve ikincil siklonlardan alınan numuneler ile gerçekleştirilen madde denkliği çalışmaları sonucunda iki siklon grubu için gerçek ve düzeltilmiş performans eğrileri çizilmiştir. Elde edilen eğrilerden birincil siklon grubuna ait olan Şekil 4.4 de verilmiştir.



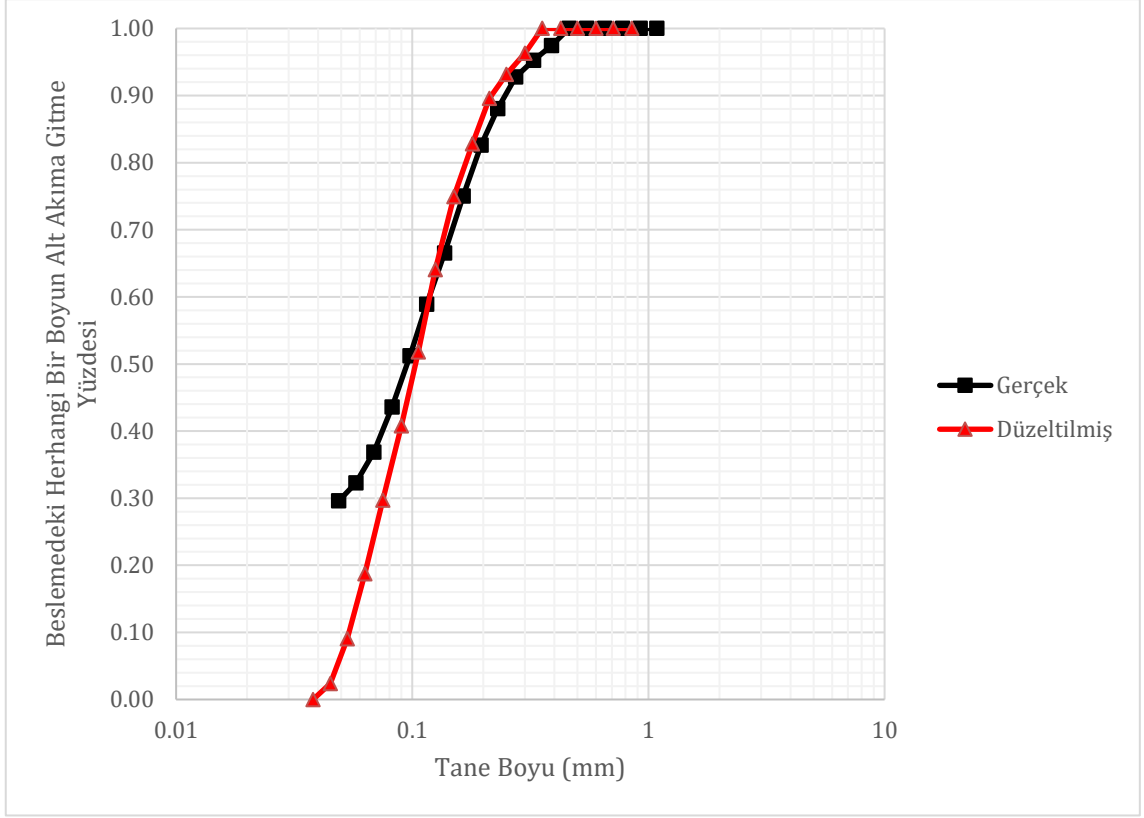
Şekil 4.4 Birincil siklon gerçek ve düzeltilmiş performans eğrisi

Buna göre birincil siklon grubunda beslemeden alt akıma kaçan su ile taşınan, kaçak malzeme miktarı %62 olarak hesaplanmıştır. Gerçek performans eğrisine göre d_{50} ayırım boyutu birincil siklon grubu için hesaplanamamıştır. Düzeltilmiş performans eğrisine göre bu değer $43.4 \mu\text{m}$ olarak hesaplanmıştır.

Birincil siklon grubunda 250 mm çapa sahip üç adet siklon bulunmaktadır. Bu siklonlardan iki tanesi yedek olarak bulunmakta, bir tanesi çalıştırılmaktadır.

İkinci siklon grubuna ait madde denkliği sonucu elde edilmiş veri ile oluşturulmuş, gerçek ve düzeltilmiş performans eğrileri Şekil 4.5'de verilmiştir.

Elde edilen sonuca göre, ikinci siklon grubunda alt akıma kaçak yapan malzeme oranı %30 olarak belirlenmiştir. Gerçek performans eğrisine göre hesaplanan d_{50} ayırım boyutu $95.2 \mu\text{m}$ olarak hesaplanmıştır. Düzeltilmiş performans eğrisine göre ise bu değer $133.4 \mu\text{m}$. Beslemeden su ile alt akıma taşınan kaçak miktarından ötürü gerçek ve düzeltilmiş d_{50} ayırım boyutu arasında bu farkın oluştuğu görülmektedir.



Şekil 4.5 İkincil siklon gerçek ve düzeltilmiş performans eğrisi

Devre ürünü birincil ve ikincil siklonların birleşimi olarak alınmaktadır. Birincil siklondan alınan malzemenin çok ince olduğu tespit edilmiştir. İkincil siklondan alınan malzeme ise elde edilmek istenen ürüne göre daha kaba bir dağılıma sahiptir. İkisinin birleşimi sonucunda istenilen ürün elde edilmektedir. Ancak siklonlarda gerçekleştirilecek düzenleme ile ikincil siklondan daha ince malzeme ve birincil siklondan daha kaba malzeme elde ise bilyalı değirmene gönderilen malzeme miktarı düşürülerek bilyalı değirmen kapasitesinde de artış sağlanabileceği görülmüştür.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

- Yapılan çalışma sonucunda yarı otojen değirmenin beslemesinin boyut dağılımının genellikle tasarım aşamasında kullanılan baş parmak kuralına olması uygun boyut dağılımına sahip olduğu gözlenmiştir.
- Yarı otojen değirmende güç çekişi ve kurulu güç göz önünden bulundurulduğunda kapasite artışı için yeterli marjın olduğu tespit edilmiştir.
- Yarı otojen değirmende bilya yükünün artırılması ve mevcut ızgara açıklıklarının küçültülmesi ile birlikte mevcut sistemin elde ettiği ürün tane boyu dağılımına sahip, daha yüksek tonajda ürün elde etmenin mümkün olduğu görülmüştür.
- Birincil siklonun istenilenden daha ince bir ayırım yaptığı tespit edilmiş ve daha kaba bir ayırım gerçekleştirmesi için su ve basınç değerlerinin incelenip yeniden düzenlenmesi gerektiği tespit edilmiştir.
- Birincil siklon grubunda daha büyük siklon çapının tercih edilmesinin mevcut sistem için daha uygun olduğu belirlenmiştir.
- Bilyalı değirmen bilya yükü dağılımının tek tip bilya yerine iki farklı çapta bilyanın farklı dağılımlarda kullanılmasının uygun olduğu belirlenmiştir. 50 mm (%30) ve 25 mm (%70) bilyaların kullanımının bilyalı değirmen performansını ve tüm devrenin performansını artıracığı tespit edilmiştir.
- Bilyalı değirmen devreden yükü %316.8 olarak hesaplanmış, ve uygulamada %350 mertebelerine çıkarılabileceği bilinmektedir.
- Yarı otojen değirmendeki bu marj ve bilyalı değirmende devreden yükün artırılması ile tüm devrenin kapasitesinin artırılabilceği görülmektedir.
- Birincil siklon kaçak miktarı %62 olarak hesaplanmıştır.
- İlerleyen çalışmalarda sistemde bulunan siklon gruplarında farklı apex ve vortex çapları denenerek devreye etkisinin incelenmesi gerektiği anlaşılmıştır.

6. KAYNAKLAR

1. Napier-Munn, T. Is progress in energy-efficient comminution doomed? *Miner. Eng.* 73, 1–6 (2015).
2. Musa, F. and R. Morrison, "A more sustainable approach to assessing comminution efficiency." *Minerals Engineering* 22(7): 593-601 (2009).
3. Fuerstenau, D. W., & Abouzeid, A. M. The energy efficiency of ball milling in comminution. *International Journal of Mineral Processing*, 67(1-4), 161-185 (2002).
4. Morrell, S. A method for predicting the specific energy requirement of comminution circuits and assessing their energy utilization efficiency. , 21(3), 224–233 (2008).
5. Morrell, S. Predicting the overall specific energy requirement of crushing, high pressure grinding roll and tumbling mill circuits. *Minerals Engineering*, 22(6), 544-549 (2009).
6. Tuzcu, E.T. “Full Scale Systematic Optimization Steps for a Heap Leach Crushing Plant”, *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, 53(1), 2017, 443–464 (2016).
7. Delgadillo, J. A., Lopez-Valdivieso, A., & Tello, A. Optimization of a grinding and classification circuit of a magnetite ore processing plant through computer simulation. *Mining, Metallurgy & Exploration*, 25(4), 223-228 (2008).
8. McIvor, R.E. “Classification Effects in Wet Ball Milling Circuits”, *Mining Engineering*, August, pp. 815-820 (1988).
9. McIvor, R.E., Lavallée, M.L., Wood, K.R., Blythe, P.M. and Finch, J.A., “Functional Performance of Ball Milling”, *Mining Engineering*, March, pp. 269-276 (1990).
10. Tuzcu E.T. and Vural O., “Mechanical Improvement and Simulation Assisted Optimization of a Gold Heap Leach Crushing Plant for Capacity Increase”, *International Minerals Engineering Congress (IMEC) 2014*, San Luis Potosi, Mexico, September 21 - 24 (2014).
11. Kawatra, S. K., Eisele, T. C., Weldum, T., Larsen, D., Mariani, R., & Pletka, J. Optimization of comminution circuit throughput and product size distribution by simulation and control. *Michigan Technological Univ., Houghton, MI (United States)* (2005).

12. Rosario P.P. Comminution Circuit Design and Simulation for the Development of a Novel High Pressure Grinding Roll Circuit. University of British Columbia **(2010)**.
13. Rowland C.A. The Standard for Comminution Efficiency, in: SME Annual Meeting. SME, Salt Lake City, Utah, USA. **(2008)**.
14. Gupta, A., & Yan, D. S. Size Reduction and Energy. In Mineral Processing Design and Operation: An introduction. Elsevier **(2016)**.
15. Rowland C.A. Bond's Method for Selection of Ball Mills, in: Advances in Comminution. SME, Littleton, Colorado, USA **(2006)**.
16. Morrell, S. An alternative energy–size relationship to that proposed by Bond for the design and optimisation of grinding circuits. International Journal of Mineral Processing 74, 133–141 **(2004)**.
17. Napier-Munn, T.J., Morrell, S., Morrison, R.D., and Kojovic, T. Mineral comminution circuits: their operation and optimisation. ISBN 0 646 28861. Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre **(1996)**.
18. Gupta, A., & Yan, D. S. Classification. In Mineral Processing Design and Operation: An introduction. Elsevier **(2016)**.
19. Bond F.C. The third theory of comminution. Trans. AIME, Vol. 193, 484–494 **(1952)**.
20. Barratt, D.J. & Sherman, M. 'Selection and Sizing of Autogenous and Semi-Autogenous Mills', Mineral Processing Plant Design, Practice, and Control Proceedings, Vol 1, Society for Mining, Metallurgy, and Exploration (SME), Vancouver, Canada, pp. 755–782 **(2002)**.
21. Starkey J, Hindstrom S, and Nadasdy G. SAGDesign Testing-What it is and Why it Works. In: Proceedings of the Conference on International Autogenous and Semi-Autogenous Grinding Technology, Vancouver, 240-254 **(2006)**.
22. McKee, DJ, Napier-Munn T.J. The status of comminution simulation in Australia. Minerals Engineering, 3(1-2), 7-21. **(1990)**.
23. Brochot S, Villeneuve J, Guillaneau JC, Durance MV, and Bourgeois F. USIM PAC 3: Design of mineral processing plants from crushing to refining. In: Mineral Processing Plant Design, Practice, and Control **(2002)**.
24. King R. P. MODSIM, Modular Method for Design, Balancing and Simulation of Ore Dressing Plant Flowsheets. Report No. G9, Department of Metallurgy, University of Witwatersrand, Johannesburg, South Africa **(1983)**.

25. Lynch, A. J. and Rowland, C. A. The History of Grinding (Society of Mining, Metallurgy, and Exploration: Littleton **(2005)**).
26. Giblett, A. Grinding Technologies. In SME Mineral Processing & Extractive Metallurgy Handbook. essay, Society for Mining, Metallurgy & Exploration **(2019)**.
27. Gupta, A., & Yan, D. S. Tubular Rod Mills. In Mineral Processing Design and Operation: An introduction. essay, Elsevier **(2016)**.
28. Gupta, A., & Yan, D. S. Tubular Ball Mills. In Mineral Processing Design and Operation: An introduction. essay, Elsevier **(2016)**.
29. King, R. P. "Modeling and Simulation of Mineral Processing System," **(1999)**.
30. Wills, B. A. Mineral processing technology: an introduction to the practical aspects of ore treatment and mineral recovery. Elsevier **(2015)**.
31. Lynch, A. J. Tumbling Mills. In Comminution Handbook. essay, Australasian Institute of Mining and Metallurgy **(2015)**.
32. Robinson, B. The History of Autogenous Grinding, CIMM Bulletin 73: 114-118 **(1980)**.
33. Digre, M. Autogenous grinding in Relation to Abrasion Conditions and Mineralogical Factors, Proc. Auto. Grinding Seminar, Trondheim: A1 **(1969)**.
34. Hardinge, H. Making Rock Grind Itself. Eng and Min J. 156: 84-90 **(1955)**.
35. Fuerstenau, M. C., & Han, K. N. (Eds.). Principles of mineral processing. SME **(2003)**.
36. Gupta, A., & Yan, D. S. Autogenous and Semi-Autogenous Mill. In Mineral Processing Design and Operation: An introduction. essay, Elsevier **(2016)**.
37. Austin LG, Klimpel RR, Luckie PT. Process engineering of size reduction: ball milling. New York: SME/ AIME **(1984)**.
38. Morrell, S., and Valery, W. Influence of feed size on AG/SAG mill performance. In SAG 2001 Conference Proceedings. Vancouver, BC: Mining and Mineral Processing Engineering, University of British Columbia **(2001)**.
39. Giblett, A. And Putland, B. Grinding Circuit Design. In SME Mineral Processing & Extractive Metallurgy Handbook. essay, Society for Mining, Metallurgy & Exploration **(2019)**.
40. Latchireddi, S. and Morrell S. "Slurry flow in mills: grate-only discharge mechanism (Part-1)." Minerals Engineering 16(7): 625-633 **(2003)**.
41. Digre, M. Wet Autogenous Grinding in Tumbling Mills, AIME Annual Meeting,

- Colorado, USA **(1970)**.
42. Crocker, B.S. Pebble mills. In SME Mineral Processing Handbook. Edited by N.L. Weiss. Littleton, CO: SME-AIME. pp. 3C-94–3C-107 **(1985)**.
 43. Sepulveda, J.L. "A Detailed Study on Stirred Ball Mill Grinding", Department of Metallurgy and Metallurgical Engineering, The University of Utah **(1981)**.
 44. Dikmen, S., & Ergün, Ş. L. Karıştırılmalı Bilyalı Değirmenler. Bilimsel Madencilik Dergisi, 43(4), 3-15 **(2004)**.
 45. Gupta, A., & Yan, D. S. Stirred Mills. In Mineral Processing Design and Operation: An introduction. essay, Elsevier **(2016)**.
 46. Lynch, A. J., Weaver, M., Dundar, H., Benzer, H., & Wheeler, J. In Comminution Handbook (pp. 145–164). essay, Australasian Institute of Mining and Metallurgy **(2015)**.
 47. Weiss, N.L. SME Mineral Processing Handbook, Vol. 1. Society of Mining Engineers, New York **(1985)**.
 48. Plitt, L. R. A mathematical model of the hydrocyclone classifier, *CIM Bull.*, 69(Dec.), 114 **(1976)**.
 49. Mosher, J. B. Comminution Circuits for Gold Ore Processing. In M. D. Adams (Ed.), Gold Ore Processing: Project Development and Operations (pp. 259–279). essay, Elsevier **(2016)**.
 50. Napier Munn, T. J., Morrell, S., Morison, R. D. Mineral Comminution Circuits Their Operation and Optimisation, JKMRC Mono. Queensland 4068: Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre **(2005)**.
 51. Otte O. Proceedings of the third mill operators conference. Australasian Institute of Mining and Metallurgy: Cobar; p. 131–36 **(1988)**.
 52. Patzelt N, Knecht J, Burchardt E, Klymowsky K. Proceedings of the seventh mill operators conference. Australasian Institute of Mining and Metallurgy: Kalgoorlie; p. 47–55 **(2000)**.
 53. Kelsall DJ, Holmes JA, Hydrocyclones, U.S. Patent No. 3,130,157, April 21, **(1964)**.
 54. Hodouin, D. Process observers and data reconciliation using mass and energy balance equations. *Advances in Industrial Control*, 15–83. **(2010)**.
 55. Wills, B.A. Mineral Processing Technology, 7th edition **(2006)**.
 56. Narayanan S.S. And Whiten W.J. Breakage Characteristics Of Ores For Ball Mill Modelling. *Proceedings Aris/Mm*, 286, June, 31-39 **(1983)**.

57. Bond, F.C. Crushing and grinding calculations, British Chemical Engineering, pp: 378 – 385 (1961).
58. SRK Consulting (Canada) Inc. Preliminary Economic Assessment for the F2 Gold System, Phoenix Gold Project, Red Lake, Ontario Report (amended and restated) Prepared for Rubicon Minerals Corporation (2014).
https://www.sec.gov/Archives/edgar/data/1057791/000110465914015382/a14-6209_12ex99d1.htm. (Erişim Tarihi :1 Ağustos 2022)

EKLER

EK - 1

Alınan Numunelerin Elek Analizi Sonuçları

Elek Açıklığı (mm)	Yarı otojen Besleme
100.0	100.0
88.5	92.0
76.3	87.7
50.8	74.1
38.1	65.4
25.4	53.7
19	45.5
12.7	37.0
6.3	27.0
4.75	23.0
3.35	18.5
2.8	16.0
2	15
1.25	12
0.85	10.5

Elek Açıklığı (mm)	Tromel Elek Üstü	Tromel Elek Altı	Birincil Siklon Besleme	Birincil Siklon Üst Akım	Birincil Siklon Alt Akım	Bilyalı Değirmen Ürün	İkincil Siklon Besleme	İkincil Siklon Alt Akım	İkincil Siklon Üst Akım	Devre Ürünü
11.2	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
9.5	79.88	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
6.3	60.51	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
4.75	38.79	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
3.35	21.76	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
2.36	13.93	98.00	98.16	100.00	97.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
2	11.97	96.88	97.12	100.00	95.85	100.00	100.00	99.83	100.00	100.00
1.25	8.71	91.20	92.96	100.00	90.15	99.01	100.00	99.38	100.00	100.00
0.85	6.83	82.45	86.96	100.00	80.00	98.15	98.40	98.37	100.00	100.00
0.6	5.70	74.15	79.28	100.00	70.20	95.84	95.92	95.66	100.00	100.00
0.425	4.72	65.08	71.20	100.00	59.95	92.50	93.12	90.80	100.00	100.00
0.3	3.83	57.06	62.12	100.00	50.20	85.65	86.36	78.42	99.92	100.00
0.2	2.90	48.00	53.16	100.00	39.92	68.69	73.64	55.65	98.96	97.68
0.15	2.28	43.12	47.44	99.76	32.05	55.48	61.00	39.29	94.60	95.72
0.09	2.04	35.26	38.88	98.56	23.54	37.05	40.52	19.42	77.60	87.76
0.075	1.94	32.55	35.68	97.40	20.48	30.49	34.48	14.34	68.00	78.20
0.063	1.81	30.50	33.40	96.12	18.00	26.15	29.20	11.39	63.00	73.72
0.038	1.70	25.00	27.00	87.72	13.00	18.10	20.08	6.36	47.48	59.52

EK - 2

Denkleştirilmiş Tane Boyu Dağılımları

Tane Boyu (mm)	Denkleştirilmiş Yarı otojen Değirmen Besleme	Denkleştirilmiş Tromel Elek Üstü	Denkleştirilmiş Tromel Elek Altı	Denkleştirilmiş Birincil Siklon Besleme	Denkleştirilmiş Birincil Siklon Üst Akım	Denkleştirilmiş Birincil Siklon Alt Akım
100	100.0	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
90	95.1	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
75	87.2	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
63	80.3	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
53	73.9	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
37.5	62.7	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
26.5	53.2	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
19	45.4	99.70	100.00	100.00	100.00	100.00
13.2	38.2	95.70	100.00	100.00	100.00	100.00
4.75	23.5	42.30	99.80	99.80	100.00	99.76
3.35	19.9	26.10	99.06	99.06	100.00	98.89
2.36	16.8	15.40	97.13	97.13	100.00	96.62
1.18	12.1	5.0	88.30	88.30	100.00	86.24
0.85	10.4	2.9	81.99	81.99	100.00	78.80
0.425	7.5	0.9	66.29	66.29	100.00	60.33
0.355	6.8	0.7	62.02	62.02	100.00	55.30
0.212	5.4	0.3	50.35	50.35	100.00	41.57
0.106	3.8	0.1	37.32	37.32	100.00	26.24
0.038	2.4	0.0	23.35	23.35	87.84	11.94

Tane Boyu (mm)	Denkleştirilmiş Bilyalı Değirmen Ürün	Denkleştirilmiş İkincil Siklon Besleme	Denkleştirilmiş İkincil Siklon Alt Akım	Denkleştirilmiş İkincil Siklon Üst Akım	Denkleştirilmiş Devre Ürünü
100	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
90	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
75	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
63	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
53	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
37.5	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
26.5	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
19	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
13.2	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
4.75	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
3.35	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
2.36	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
1.18	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
0.85	99.84	99.84	99.77	100.00	100.00
0.425	94.00	94.00	91.65	100.00	100.00
0.355	89.51	89.51	85.40	100.00	100.00
0.212	70.24	70.24	59.35	98.02	98.32
0.106	42.85	42.85	26.39	84.83	87.11
0.038	17.32	17.32	5.82	46.65	52.84