

**BAKIR CÜRUFU ÖĞÜTME DEVRESİNİN BİLGİSAYAR
DESTEKLİ PERFORMANS DEĞERLENDİRMESİ VE
OPTİMİZASYONU**

**COMPUTER AIDED PERFORMANCE EVALUATION AND
OPTIMIZATION OF COPPER SLAG GRINDING CIRCUIT**

ORBERK MERT MERCAN

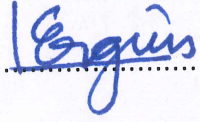
**YRD. DOÇ. DR. N. METİN CAN
TEZ DANIŞMANI**

Hacettepe Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim – Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin
Maden Mühendisliği Anabilim Dalı İçin Öngördüğü
YÜKSEK LİSANS Tezi
Olarak Hazırlanmıştır.

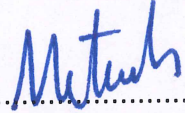
2017

ORBERK MERT MERCAN' ın hazırladığı “**Bakır Cürufu Öğütme Devresinin Bilgisayar Destekli Performans Değerlendirmesi ve Optimizasyonu**” adlı bu çalışma aşağıdaki jüri tarafından **MADEN MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI'** nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

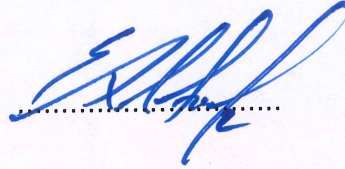
Prof. Dr. Ş. Levent ERGÜN
Başkan



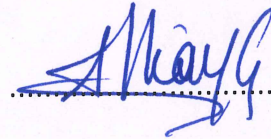
Yrd. Doç. Dr. N. Metin CAN
Danışman



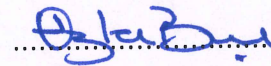
Doç. Dr. N. Emre ALTUN
Üye



Doç. Dr. İlkay B. ÇELİK
Üye



Yrd. Doç. Dr. Özlem BIÇAK
Üye



Bu tez Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak onaylanmıştır.

Prof. Dr. Menemşe GÜMÜŞDERELİOĞLU
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

YAYINLAMA VE FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI BEYANI

Enstitü tarafından onaylanan lisansüstü tezimin/~~raporumun~~ tamamını veya herhangi bir kısmını, basılı (kağıt) ve elektronik formatta arşivleme ve aşağıda verilen koşullarla kullanıma açma iznini Hacettepe üniversitesine verdiğimi bildiririm. Bu izinle Üniversiteye verilen kullanım hakları dışındaki tüm fikri mülkiyet haklarım bende kalacak, tezimin tamamının ya da bir bölümünün gelecekteki çalışmalarda (makale, kitap, lisans ve patent vb.) kullanım hakları bana ait olacaktır.

Tezin kendi orijinal çalışmam olduğunu, başkalarının haklarını ihlal etmediğimi ve tezimin tek yetkili sahibi olduğumu beyan ve taahhüt ederim. Tezimde yer alan telif hakkı bulunan ve sahiplerinden yazılı izin alınarak kullanması zorunlu metinlerin yazılı izin alarak kullandığımı ve istenildiğinde suretlerini Üniversiteye teslim etmeyi taahhüt ederim.

- Tezimin/Raporumun tamamı dünya çapında erişime açılabilir ve bir kısmı veya tamamının fotokopisi alınabilir.**

(Bu seçenkle teziniz arama motorlarında indekslenebilecek, daha sonra tezinizin erişim statüsünün değiştirilmesini talep etmeniz ve kütüphane bu talebinizi yerine getirirse bile, tezinin arama motorlarının önbelleklerinde kalmaya devam edebilecektir.)


- Tezimin/Raporumun 26.05.2020 tarihine kadar erişime açılmasını ve fotokopi alınmasını (İç Kapak, Özet, İçindekiler ve Kaynakça hariç) istemiyorum.**

(Bu sürenin sonunda uzatma için başvuruda bulunmadığım takdirde, tezimin/raporumun tamamı her yerden erişime açılabilir, kaynak gösterilmek şartıyla bir kısmı ve ya tamamının fotokopisi alınabilir)

- Tezimin/Raporumun tarihine kadar erişime açılmasını istemiyorum, ancak kaynak gösterilmek şartıyla bir kısmı veya tamamının fotokopisinin alınmasını onaylıyorum.**

- Serbest Seçenek/Yazarın Seçimi**

31/05/2017



ORBERK MERT MERCAN

ETİK

Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada,

- tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversitede veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

26/05/2017

Orberk Mert Mercan

ÖZET

BAKIR CÜRUFU ÖĞÜTME DEVRESİNİN BİLGİSAYAR DESTEKLİ PERFORMANS DEĞERLENDİRMESİ VE OPTİMİZASYONU

Orberk Mert MERCAN

Yüksek Lisans, Maden Mühendisliği Bölümü

Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. N. Metin Can

Mayıs 2017, 148 sayfa

Bu tez çalışmasında, bakır cürufu öğütme devresinden alınan numuneler ile modelleme ve simülasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Öğütme devresinde otojen değirmen ve çakıllı değirmen ile birlikte kapalı devre olarak çalışan iki farklı hidrosiklon grubu mevcuttur. Öğütme devresine ait madde denkliği çalışmalarında JK Simmet v 6.01 yazılımı kullanılmıştır. Öğütme devresinin numune alınan koşula ait performansı belirlendikten sonra otojen değirmen ve çakıllı değirmene ait matematiksel modeller oluşturulmuştur. Otojen değirmen için Leung modeli ile değişken hızlar modeli kullanılarak iki modelin tahmin kapasiteleri karşılaştırılmıştır. Çakıllı değirmende ise mükemmel karışım bilyalı değirmen modeli kullanılmıştır. Modelleme çalışmalarının ardından baz simülasyon koşulu oluşturulmuştur. Tüvenan besleme tonajı baz koşul için 38.86 ton/saat olarak belirlenmiştir. Tüvenan besleme tonajının artırılması için yapılacak iyileştirmeler, yatırım gerektirmeyen ve yatırım gerektiren alternatifler olarak iki başlık altında toplanmıştır. Öğütme devresinin kapasitesi, tüvenan besleme için önerilen tane boyu dağılımı kullanıldığında ve hidrosiklonların daha verimli çalıştığı durumda baz simülasyon koşuluna göre yaklaşık % 12' lik bir artış göstermektedir. Önerilen tane boyu dağılımı ile hidrosiklonların daha verimli çalıştığı durumda otojen değirmen çıkışındaki kritik boylu çakılların kırılması için devreye konik kırıcı eklenmesi ile devre kapasitesinde önemli ölçüde artış sağlanmaktadır. Son olarak, hidrosiklonlar yüksek frekansta yaş olarak ince eleme amacıyla kullanılan elekler ile değiştirilmiştir. Tüm bu iyileştirmeler sonucunda, tüvenan besleme tonajı baz simülasyon koşuluna göre % 31 arttırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Öğütme, Otojen Değirmen, Modelleme ve Simülasyon

ABSTRACT

COMPUTER AIDED PERFORMANCE EVALUATION AND OPTIMIZATION FOR COPPER SLAG GRINDING CIRCUIT

Orberk Mert MERCAN

Master Of Science, Department of Mining Engineering

Supervisor: Assist. Prof. N. Metin CAN

May 2017, 148 pages

In this study, modelling and simulation studies were performed, with the samples taken from copper slag grinding circuit. In the grinding circuit, there are two different hydrocyclone groups working together with the autogenous mill and the pebble mill as closed circuits. JK Simmet v 6.01 software was used for mass balancing studies in grinding circuit. Performance of the grinding circuit was obtained in survey conditions. Autogeneous and pebble mills were modeled in the next phase Leung and variable rates AG / SAG models were used for the autogenous mill and these two models were compared in terms of estimation properties. Also, pebble mill was modeled by perfect mixing ball mill model. After modelling studies, base simulation condition was established. Fresh feed capacity was determined as 38.86 tons/hour for base simulation condition. Improvements to increase fresh feed capacity were grouped under two headings as investment free and investment requiring alternatives. The capacity of grinding circuit shows an increase of about 12 % compared to the base simulation condition when the recommended fresh feed particle size distribution is used and hydrocyclones are operated more efficiently. In case of hydrocyclones are operating more efficiently with the suggested particle size distribution, a considerable increase in the circuit capacity is achieved by adding a cone crusher at the discharge of the autogenous mill for crushing of coarse pebbles. Finally, hydrocyclones have been replaced with high frequency wet screens that is used for fine screening purposes. As a result of all these changes, the fresh feed tonnage is increased by % 31 in compared to the base simulation condition.

Keywords: Grinding, Autogeneous Mill, Modelling and Simulation

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam sırasında bölümün imkanlarından yararlanmamı sağlayan Hacettepe Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümü Başkanı Sayın Prof.Dr. Ahmet Hakan Benzer'e,

Tez çalışmamın her aşamasında yol göstermiş, yönlendirmiş ve tecrübesiyle karşılaştığım zorlukların üstesinden gelmem için yardımını esirgememiş olan tez danışmanım Sayın Yrd. Doç Dr. N. Metin Can'a ve Hacettepe Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümü Öğretim Üyesi Sayın Prof. Dr. Levent Ergün' e,

DeneySEL çalışmalarda ve tez çalışmamın her aşamasında bana yardımcı olan değerli iş arkadaşım Sayın Ahmet Yaşar Yamantaş'a, tüm çalışma boyunca verdiği tavsiyeler ile yol göstericiliğinden ötürü Sayın Dr. Özgür Özcan'a ve Serhat Özdoğan'a,

Tez çalışmasında kullanılan numunenin temini ve tesis çalışmalarındaki katkılarından dolayı Eti Bakır A.Ş. Samsun İşletmesinin tüm yönetici ve çalışan kadrolarına,

Her zaman yanımda olan ve gösterdikleri özverileri sayesinde karşılaştığım bütün zorlukları aşmama yardım eden annem İlknur Mercan'a ve babam Ahmet Mercan'a

En içten duygularıyla teşekkürü bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
İÇİNDEKİLER.....	iv
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vii
1. GİRİŞ.....	9
2. OTOJEN DEĞİRMENLER.....	11
2.1 Otojen Değirmen Tasarımı	15
2.1.1 Gövde Tasarımı	15
2.1.2 Boşaltma Mekanizmaları	16
2.1.3 Astarlar ve Kaldırma Plakaları	18
2.2 Otojen Öğütme Sistemleri ve Devre Tasarımı	21
2.3 Otojen Değirmen Beslemesinin Önemi	23
3. ÇAKILLI DEĞİRMENLER.....	24
3.1 Gövde Tasarımı	25
3.2 Boşaltma Mekanizmaları	25
3.3 Astarlar ve Kaldırma Plakaları	26
4. OTOJEN DEĞİRMEN BOYUTLANDIRILMASINDA KULLANILAN DENEYSEL YÖNTEMLER.....	27
4.1 Otojen ve Yarı Otojen Değirmenler için Güç İndeksi Tayini (SPI)	28
4.2 Ağırlık Düşürme Yöntemi ile Otojen Değirmen Boyutlandırılması	30
4.3 SMC Test Yöntemi İle Otojen Değirmen Boyutlandırılması	33
4.4 Pilot Ölçekli Testler ile Otojen Değirmen Boyutlandırılması	36
5. OTOJEN DEĞİRMEN MODELLERİ	39
5.1 Austin Yaklaşımı	40
5.2 JKMRRC Tarafından Geliştirilen Otojen Değirmen Modelleri	42
5.2.1 Kırılma Hızı Fonksiyonu.....	43
5.2.2 Kırılma Dağılımı Fonksiyonu.....	44
5.2.3 Boşaltma Hızı Fonksiyonu	45
5.3 Leung Modeli.....	46

5.4	Değişken Hızlar Modeli	47
5.5	Bilyalı Değirmenler için Mükemmel Karışım Modeli.....	48
5.6	Tek Bileşenli Verimlilik Eğrisi.....	49
6.	DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	51
6.1	Kırma ve Harmanlama Devresi	52
6.2	Öğütme Devresi	52
6.3	Flotasyon Devresi.....	53
6.4	Birinci Dönem Numune Alma Çalışması	55
6.5	İkinci Dönem Numune Alma Çalışması	60
6.6	Madde Denkliği Çalışmaları	62
6.6.1	Birinci Dönem Numune Alma Çalışmaları Sonucunda Oluşturulan Madde Denkliği.....	62
6.6.2	İkinci Dönem Numune Alma Çalışmaları Sonucunda Oluşturulan Madde Denkliği.....	69
6.7	Mevcut Hidrosiklonların Performans Değerlendirmesi.....	72
7.	MODELLEME VE SİMÜLASYON ÇALIŞMALARI	77
7.1	Cürufun Öğütülebilirlik Parametrelerinin Belirlenmesi	78
7.1.1	Bond Öğütülebilirlik Testi Sonuçları	78
7.1.2	Ağırlık Düşürme Testi Sonuçları	79
7.1.3	Aşınma Testi Sonuçları.....	80
7.2	Güvenli Modellerin Oluşturulması	81
7.3	Baz Simülasyon Koşulu.....	91
7.4	Öğütme Devresi Kapasitesinin Arttırılmasına Yönelik Yapılan Simülasyon Çalışmaları	94
7.4.1	Yatırım Gerektirmeyen Alternatiflerin Değerlendirilmesi	95
7.4.2	Yatırım Gerektiren Alternatiflerin Değerlendirilmesi	100
8.	SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	106
	KAYNAKLAR.....	107
	EKLER	109
	ÖZGEÇMİŞ	143

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 4.1 JKMRC tarafından uygulanan ağırlık düşürme testine ait tane boyu aralıkları (mm) ve enerji düzeyleri (kWh/ton).....	31
Çizelge 6.1 Akış kollarında belirlenen % katı ve bakır içerikleri.....	57
Çizelge 6.2 Değirmen içi ölçüleri ve doluluk oranları	58
Çizelge 6.3 Hidrosiklonlara ait ölçüler	59
Çizelge 6.4 İkinci numune alma döneminde akış kollarındaki % katı içerikleri ve bakır tenörü değerleri	61
Çizelge 6.5 Otojen değirmen etrafındaki akış kollarında hesaplanan akış hızları, % katı ve palp yoğunluğu değerleri.....	64
Çizelge 6.6 Birinci hidrosiklon etrafındaki akış hızları, % katı ve palp yoğunluğu değerleri	65
Çizelge 6.7 İkinci hidrosiklon grubu etrafında mevcut numune alma koşullarında hesaplanan akış hızları, % katı ve palp yoğunluğu değerleri.....	66
Çizelge 6.8 Çakıllı değirmen çıkışına ait akış hızları, % katı ve palp yoğunluğu değerleri	67
Çizelge 6.9 İkinci dönemde alınan numuneler ile ikinci hidrosiklon grubu etrafında hesaplanan akış hızları, % katı ve palp yoğunluğu değerleri.....	70
Çizelge 7.1 Bond öğütülebilirlik testi sonucunda elde edilen değerler	78
Çizelge 7.2 Bond iş indeksinin hesaplanmasında kullanılan parametreler ve iş indeksi değeri	78
Çizelge 7.3 Ağırlık düşürme testinde kullanılan enerji seviyeleri ve tane boyu aralıkları.....	79
Çizelge 7.4 Sınıflandırıcı ekipmanlara ait model parametreleri	90
Çizelge 7.5 Madde denklığı ve baz simülasyon koşulunun karşılaştırılması.....	91
Çizelge 7.6 Baz simülasyon koşulu ve siklonların verimli olduğu koşulda kullanılan model parametreleri	100
Çizelge 7.7 Yüksek frekanslı yaş elekler için kullanılan model parametreleri.....	102

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1 Otojen değirmen içerisindeki malzemenin davranışı	13
Şekil 2.2 Dinamik değirmen davranımı	14
Şekil 2.3 Otojen değirmenler için çıkış tasarımları.....	17
Şekil 2.4 Otojen değirmenler için kaldırma plakaları ve astar sistemleri	20
Şekil 4.1 İncelik indeksi ve özgül ufalanma enerjisi arasındaki ilişki.....	32
Şekil 5.1 Austin yaklaşımının şematik gösterimi.....	41
Şekil 5.2 JKMRC tarafından otojen ve yarı otojen değirmenler için geliştirilen model yapısı.....	42
Şekil 5.3 Otojen ve yarı otojen değirmenler için kırılma hızı fonksiyonu	43
Şekil 5.4 Boşaltma hızı fonksiyonu	45
Şekil 6.1 Tesis akım şeması.....	54
Şekil 6.2 Birinci örnekleme dönemi için numune alma noktaları.....	55
Şekil 6.3 Örnek değirmen kesiti.....	57
Şekil 6.4 Otojen ve çakıllı değirmen için numune alma çalışması boyunca kaydedilen zamana bağlı amper değerleri.....	58
Şekil 6.5 İkinci örnekleme dönemi için numune alma noktaları	60
Şekil 6.6 Birinci dönem numune alma çalışması sonucunda ölçülen ve hesaplanan tane boyu dağılımları arasındaki ilişki.....	62
Şekil 6.7 Otojen değirmen etrafındaki akış kollarına ait ölçülen ve hesaplanan tane boyu dağılımları.....	63
Şekil 6.8 Elek etrafından alınan numunelerin ölçülen ve hesaplanan tane boyu dağılımları.....	64
Şekil 6.9 Birinci hidrosiklon etrafındaki akış kollarına ait ölçülen ve hesaplanan tane boyu dağılımları.....	65
Şekil 6.10 İkinci hidrosiklon grubuna ait ölçülen ve hesaplanan tane boyu dağılımları	66
Şekil 6.11 Çakıllı değirmen çıkışı etrafındaki ölçülen ve hesaplanan tane boyu dağılımları.....	67
Şekil 6.12 Birinci dönemde numune alınan koşula ait madde denkliği	68
Şekil 6.13 İkinci dönemde alınan numunelerin ölçülen ve hesaplanan tane boyu dağılımları arasındaki ilişki	69
Şekil 6.14 İkinci hidrosiklon grubu ölçülen ve hesaplanan tane boyu dağılımları .	70
Şekil 6.15 İkinci dönemde alınan numuneler ile yapılan madde denkliği.....	71
Şekil 6.16 Birinci siklon grubuna ait gerçek ve düzeltilmiş performans eğrileri	72
Şekil 6.17 İkinci siklon grubuna ait gerçek ve düzeltilmiş performans eğrileri	74
Şekil 6.18 İkinci dönem numune alma çalışması sonucunda ikinci siklon grubuna ait gerçek ve düzeltilmiş performans eğrileri	76
Şekil 7.1 Özgül ufalanma enerjisinin t_{10} incelik indeksi ile ilişkisi	79
Şekil 7.2 Aşınma testine göre belirlenen t_{10} değeri	80
Şekil 7.3 Otojen değirmen için madde denkliği ve modelleme çalışmaları sonucunda belirlenen tane boyu dağılımları	81
Şekil 7.4 Leung ve değişken hızlar modeline göre elde edilmiş otojen değirmen çıkışı tane boyu dağılımları.....	83
Şekil 7.5 Leung ve değişken hızlar modelleri için ızgara çıkış hızı fonksiyonları ..	84
Şekil 7.6 Leung ve değişken hızlar modellerine ait kırılma hızı fonksiyonları	85

Şekil 7.7 Çakıllı değirmen için madde denkliği ve modelleme sonucu elde edilen tane boyu dağılımları	86
Şekil 7.8 Çakıllı değirmene ait kırılma hızı/taşınma hızı fonksiyonu	87
Şekil 7.9 Elek için madde denkliği ve modelleme sonucu elde edilen tane boyu dağılımları.....	88
Şekil 7.10 Birinci hidrosiklon grubu için madde denkliği ve modelleme çalışmaları sonucunda belirlenen tane boyu dağılımları	89
Şekil 7.11 İkinci hidrosiklon grubu için madde denkliği ve modelleme çalışmaları sonucunda elde edilen tane boyu dağılımları	90
Şekil 7.12 Madde denkliği çalışmaları ve baz simülasyon koşulunun oluşturulması sonucunda elde edilen tonaj, % katı ve tane boyu dağılımı verilerinin uyumu.....	92
Şekil 7.13 Baz simülasyon koşulunda elde edilen akış hızları, % katı değerleri ve P80 değerleri	93
Şekil 7.14 Simülasyon çalışmalarında kullanılan farklı tane boyu dağılımları.....	95
Şekil 7.15 İkinci tane boyu dağılımı kullanılarak yapılan simülasyon çalışmasında elde edilen akış hızları, % katı ve P80 değerleri.....	96
Şekil 7.16 Üçüncü tane boyu dağılımı kullanılarak yapılan simülasyon çalışmasında elde edilen akış hızları, % katı ve P80 değerleri.....	97
Şekil 7.17 Dördüncü tane boyu dağılımı kullanılarak yapılan simülasyon çalışmasında elde edilen akış hızları, % katı ve P80 değerleri.....	99
Şekil 7.18 Verimli siklonlar ile yapılan simülasyon çalışmasında elde edilen akış hızları, % katı ve P80 değerleri.....	101
Şekil 7.19 Yüksek frekansta yaş eleme yapabilen elekler ile yapılan simülasyon çalışması sonucunda elde edilen akış hızları, % katı ve P80 değerleri	103
Şekil 7.20 Devreye konik kırıcı eklenmesi durumunda oluşacak akış hızları, % katı ve P80 değerleri	104
Şekil 7.21 Yüksek frekansta yaş eleme yapabilen elekler ile konik kırıcı eklendiği durumda devrede oluşacak akış hızları, % katı ve P80 değerleri.....	105

1. GİRİŞ

İnsanlığın, varoluşundan itibaren madencilik çalışmaları yürüttüğü bilinen bir gerçektir. İlk çağlardan itibaren bakır, demir, kurşun ve altın gibi değerli metallerin işlenerek kullanıldığına dair güçlü bulgular mevcuttur.

Anadolu, zengin maden kaynakları sayesinde, uygarlıklar tarihinde her zaman madenciliğin beşiği ve öncüsü olmuştur. Dünyadaki ilk bakır, kurşun ve demir maden işletmesi ile ilk metalurjik uygulama Anadolu'da yapılmıştır [1].

Bakır konsantrelerinden bakır metali üretimi işlemleri izabe tesislerinde gerçekleştirilmektedir. Dünyada kabul görmüş bir yöntem olan flaş izabe yöntemi ile blister bakır üretimi yapılmaktadır. İlk aşamada, flaş izabe sonucu % 50 - 60 bakır içerikli eriyik haldeki mat ile % 1.5 - 3 arasında bakır içeriğine sahip cüruf elde edilmektedir. Bir sonraki aşama olan konverter aşamasında ise cürufun bakır içeriği % 3 - 5 arasında değişmektedir. Ayrıca cüruf içerisinde yüksek oranda demir oksit ve silikat bileşikleri de bulunmaktadır.

Çevresel ve ekonomik nedenler dolayısıyla bakır izabe işlemleri sonucunda çıkan cüruf içerisindeki bakır, sıvı halde elektrik fırınında veya soğutma işlemleri sonrasında flotasyonla zenginleştirilebilmektedir [2].

Cevher hazırlama ve zenginleştirme tesislerinin enerji giderleri incelendiğinde en büyük gider kalemini öğütme için harcanan enerjinin oluşturduğu bilinen bir gerçektir. Özellikle iri boyda serbestleşen cevher yataklarının azalması ve yüksek kapasiteli tesislerin kurulması ile öğütme maliyetleri giderek artmaktadır. Öğütme gibi enerji yoğun bir işlemin matematiksel modeller ile anlaşılması cevher hazırlama endüstrisi tarafından oldukça yoğun çaba sarf edilen alanlardan biri olmuştur. Tahmin kapasitesi yüksek modellerin geliştirilmesi sonucunda öğütme devrelerindeki optimizasyon çalışmaları, yerini deneme yanılma yöntemlerinden daha çok sayısal değerlendirmelere bırakmıştır.

Bu tez çalışması, bakır izabe cüruflarının otojen öğütülerek flotasyon yöntemi ile zenginleştirildiği bir cevher hazırlama tesisine ait öğütme devresinde yürütülen bilgisayar destekli olarak performansın belirlenmesi ve optimizasyon çalışmalarını içermektedir. Çalışmalar kapsamında, öğütme devresinin akış kollarından numune alma işlemi gerçekleştirilmiştir. Daha sonra, madde denklığı çalışmaları kapsamında öğütme devresine ait akış kollarındaki akış hızları, % katı içerikleri ve tane boyu

dağılımları belirlenmiştir. Modelleme çalışmalarında kullanılacak cevhere özgü otojen öğütülebilirlik parametrelerinin belirlenmesi için karakterizasyon çalışmaları yapılmıştır. Bunlar ağırlık düşürme testi, aşındırma testi ve bond öğütülebilirlik testidir. Gerçekleştirilen modelleme çalışmaları sonucunda öğütme ve sınıflandırma devresi ekipmanlarının matematiksel modelleri oluşturulmuştur. Otojen değirmen için farklı iki matematiksel modelleme çalışması gerçekleştirilerek modellerin tahmin kapasiteleri sınanmıştır. Devre kapasitesinin arttırılmasına yönelik olarak tüm alternatifler simülasyon çalışmaları sonucunda detaylı olarak değerlendirilmiştir. Otojen değirmen beslemesi için önerilen tane boyu dağılımının kullanılması ve hidrosiklonların alt akıma olan ince kaçaklarının azaltılması ile kapasitenin 38.86 ton/saat değerinden 44 ton/saat değerine çıkarılabileceği görülmüştür. Ayrıca devreye konik kırıcı eklenerek otojen değirmen çıkışındaki kritik boylu çakılların kırılması ile devre kapasitesi 47 ton/saat değerine çıkarılmıştır. Son olarak mevcut hidrosiklonların yüksek frekans değerlerinde yaş eleme yapabilen elekler ile değiştirilmesiyle otojen öğütme devresinin tüvenan besleme tonajı 51 ton/saat değerine ulaşmıştır.

2. OTOJEN DEĞİRMENLER

Otojen kelimesinin sözlük anlamı kendi kendine üretilmiş demektir. 1940 yılında Harlow Hardinge'nin şirketi tarafından üretilen değirmenlerin indirgeme mekanizmasını tanımlamak için bu kelime kullanılmıştır. Otojen kelimesinin değirmenler için terimleştirilmesi 1980 yılında Robinson tarafından gerçekleştirilmiştir. Öğütme ortamının öğütülen cevherlerden oluştuğu durum için uygun bir tanımlama olmuştur. İri cevher tanelerinin öğütme ortamı olarak kullanılmasının tarihi 1905'e kadar uzanmaktadır. Harlow Hardinge'nin babası tarafından manyetit cevherini öğütmek için iri manyetit tanelerinin kullanıldığı bilinmektedir. Buna rağmen, ilk otojen değirmen uygulaması 1950'li yılların sonuna denk gelmektedir. 18 ft x 6 ft boyutlarında olan bu değirmenler Kanada'nın Quebec eyaletinde kullanılmaya başlanmış olup Hardinge değirmenleri olarak adlandırılmışlardır.

O zamandan beri, öğütme ortamı yalnızca cevherden oluşan otojen değirmenler ve öğütme ortamı çelik bilya ile cevher karışımından oluşan yarı otojen değirmenlerin kullanım alanları artmaktadır. Otojen ve yarı otojen değirmenlerin en büyük avantajları ilk yatırım maliyetlerinin düşük olması ve killi yapışkan tipteki cevherlerin kolaylıkla işlenmesine olanak tanımlarıdır. Yüksek tonajlara sahip otojen değirmenlerin kullanılması ile cevher hazırlama tesislerindeki ekipman sayıları azalmaktadır. Böylece ilk yatırım ve işletme maliyetlerinin düşmesi kaçınılmazdır. Konvansiyonel öğütme devreleri ile kıyaslandığında, otojen değirmenlerin öğütücü ortam (bilya, çubuk) ve astar sarfiyatlarının düşük olması operasyonel maliyetler açısından çok büyük bir avantaj oluşturmaktadır. Yaş otojen öğütme sırasında toz oluşmadığından dolayı kırıcı sistemlerinde kullanılan pahalı toz tutma sistemlerine de ihtiyaç duyulmamaktadır.

Otojen öğütme, birinci kademe boyut küçültme işlemi olup cevherin kendi kendisini öğütmesini sağlamaktadır. Otojen öğütmedeki amaç, kırma ve öğütme işleminin bir arada yapılarak cevher hazırlama tesislerinde meydana gelen aşınmaların azaltılması ve öğütme maliyetlerinin düşürülmesidir [3].

Otojen ve yarı otojen öğütme devreleri farklı ülkelerde hızla çoğalmaktadır. Ülkemizde de ilk otojen değirmen uygulaması Artvin ilinin Murgul ilçesinin Damar yöresindeki bakır cevherinin işlenmesinde tercih edilmiştir. İkinci otojen değirmen

uygulaması ise Samsun ilinde bulunan izabe tesisi içerisindeki cüruf öğütme tesisinde karşımıza çıkmaktadır.

Otojen değirmen tasarımına geçilmeden önce otojen öğütme prensiplerinin iyice anlaşılması gerekmektedir. Değirmen içinde meydana gelen kırılma mekanizmaları ve güce bağlı öğütme performansının dikkatli bir şekilde irdelenmesi büyük önem arz etmektedir.

Otojen değirmenler, % 20 - 30 değirmen doluluğunda ve kritik hızın % 75 - 80' inde çalıştırılmaktadır. Otojen değirmenin içerisindeki % katı oranı ise yaklaşık olarak % 65 - 80 aralığında değişmektedir. Boş bir otojen değirmene düzenli besleme yapıldığında oluşacak olaylar şu şekilde sıralanmaktadır;

Değirmene beslemenin başlaması ile birlikte, değirmen dönüşünden kaynaklanan etki sonucunda kaldıraç plakaları ile yükseltelen cevher taneleri belirli bir yükseklikten düşerek değirmen zeminine çarpacaktır. Bu sırada değirmenin tükettiği güç miktarında da artış meydana gelecektir. Daha sonra palpın değirmen içerisini doldurmasıyla birlikte ızgaradan malzeme çıkışı başlayacaktır [4].

Değirmen yükü oluşmadan önce besleme olarak değirmene giren malzeme içerisindeki iri boylu taneler, yapılarından dolayı diğer tanelere göre daha hızlı bir şekilde ufalanmaktadır. Çentikleme mekanizması ile kenarlarından kopan tanelerin oluşturduğu değirmen içerisindeki yük oldukça iri tane boyu dağılımına sahiptir [4].

Çentikleme mekanizması sonucunda değirmen içerisinde küremsi yapıda "kritik boylu" taneler oluşmaya başlayacaktır. Bu taneler ızgara açıklığından çıkamadıkları için değirmen içerisinde birikme yapmaktadır. Kritik boylu tanelerin ufalanma hızı değirmene beslenen malzemenin ufalanma hızına göre oldukça düşüktür. Bu nedenle, değirmen yükündeki kritik boylu tanelerin artmasıyla değirmenden çıkan malzeme miktarı da azalacaktır. Malzeme miktarının azalması sonucunda değirmen çıkışındaki ürün tane boyu dağılımı da inceleyecektir. Değirmenin içerisindeki birikmenin devam etmesi sebebiyle değirmen tarafından çekilen güç miktarında da artış devam edecektir [4].

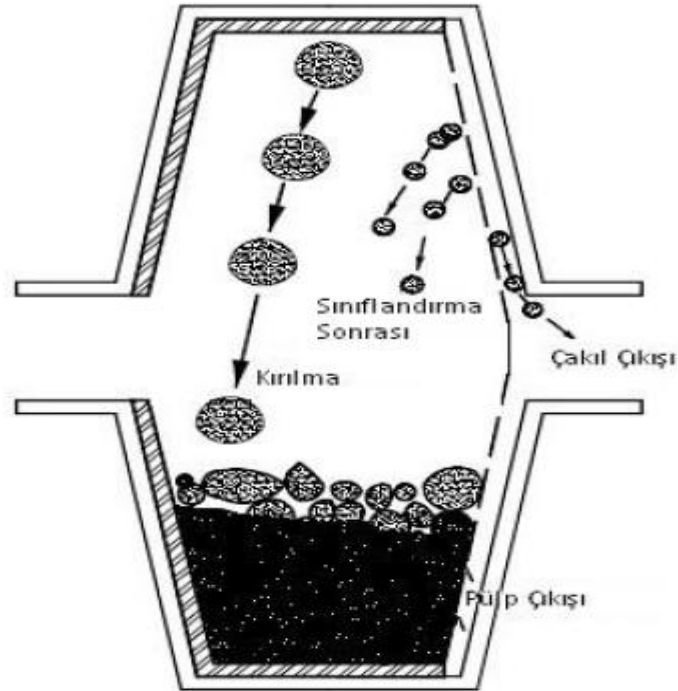
Değirmene ilk giren tanelerden 25 - 50 mm tane boyu aralığına ulaşanlar iri boydaki tanelerin darbe etkisiyle kırılabilir. Tanelerin bir çoğu bu şekilde boyut küçülmesine maruz kalmaktadır. Boyut küçülmesi sonrasında ızgaradan geçebilen taneler değirmenden çıkabilmektedir. Izgara açıklığından geçemeyen kritik boylu

tanelerin değirmen içerisindeki miktarının artması öğütme kapasitesinde düşüş meydana getirmektedir [4].

Değirmen içerisindeki iri tane boyuna sahip parçalar aşınmaya devam ederken ince taneler suyun etkisiyle iri tanelerin yüzeylerine yapışmaktadır. Yapışan ince tanelerin bir kısmı aşınma etkisiyle öğünürken bir kısmı da iri tanelerin arasındaki boşluklarda kalarak öğünmeden değirmenden çıkmaktadır [4].

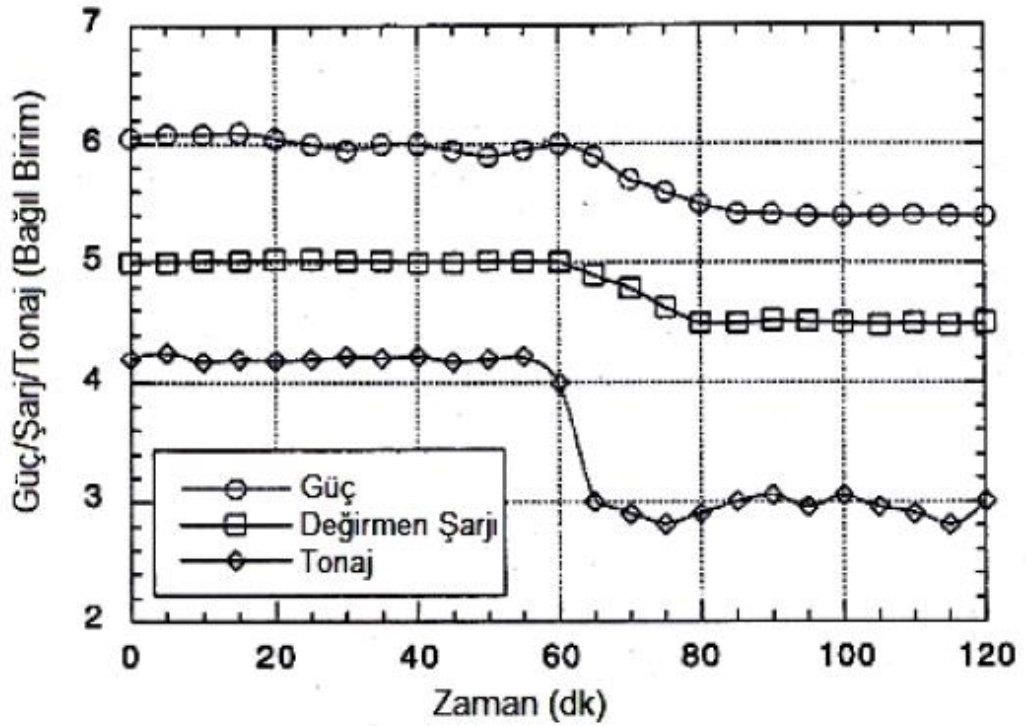
İri tanelerin miktarı ve tane boyu dağılımı dengeye geldiğinde değirmen içerisindeki malzeme miktarının büyük bir kısmını kritik boylu taneler oluşturmaktadır. Denge koşulunda, bu tanelerin ızgaradan geçebilmesi için gerekli boyuta ulaşma hızları ile taze değirmen beslemesi içerisindeki iri tanelerin öğünme hızı aynıdır. Değirmen girişindeki ve çıkışındaki malzeme miktarlarının hacimsel olarak eşitlenmesi için palpın yeterli çıkış yüksekliğinde olması gerekmektedir [4] .

Otojen değirmen içerisindeki malzemenin davranışı ve gerçekleşen mekanizmalar Şekil 2.1'de gösterilmiştir.



Şekil 2.1 Otojen değirmen içerisindeki malzemenin davranışı

Otojen değirmenlerde, iri tanelerin miktarı ve tane boyu dağılımı dengeye geldiğinde değirmen tarafından tüketilen güç miktarı da sabitlenir. Fakat beslemenin içerisindeki iri tanelerin miktarı ve tane boyu dağılımındaki değişiklikler sonucunda değirmen gücünde dalgalanma meydana gelmesi kaçınılmazdır. Otojen değirmenlerde değirmen içindeki malzemenin bir kısmı öğütücü ortamı oluştururken bir kısmı da öğütücü ortam tarafından öğütülen malzemeyi oluşturmaktadır. Bundan dolayı otojen değirmenlerin içerisindeki malzemenin miktarı ve tane boyu dağılımı sürekli değişim halindedir. Otojen değirmenin şarjına ve tonajına bağlı olarak gerçekleşen dalgalanma Şekil 2.2'de görülmektedir [4].



Şekil 2.2 Dinamik değirmen davranımı

2.1 Otojen Değirmen Tasarımı

Değirmenler genellikle gövdenin boy çap oranları ve çıkış tasarımlarına göre sınıflandırılmaktadır. Kaldıraç plakaları veya astarlar, değirmen şekline ve beslenen malzeme kompozisyonuna göre değişiklik gösterebilmektedir.

2.1.1 Gövde Tasarımı

Otojen ve yarı otojen değirmenler için gövde tasarımında kullanılan boy çap oranları temel olarak üç grupta incelenmektedir:

- Yüksek boy çap oranına sahip değirmenler, yassı yada uçan daireler olarak isimlendirilmektedir.
- Kare değirmenlerin boyu ve çapı yaklaşık olarak birbirine eşittir.
- Düşük boy çap oranına sahip değirmenlerin boy çap oranı 1.5 ile 3 arasında değişmektedir.

Gövde tasarımları ölkelere göre değişiklik gösterebilmektedir. Örneğin, Kuzey Amerika tasarımı olarak bilinen değirmenler yüksek boy çap oranına sahiptir. Güney Afrika tipi olarak bilinen değirmenler ise düşük boy çap oranına sahiptir. Değişik ölkelerde daha farklı tasarımlar ile karşılaşmak da mümkündür. İlginç bir şekilde, Avustralya'da genellikle Kuzey Amerika tipi gövde tasarımına sahip değirmenler tercih edilirken altın madenciliği sektöründe kare değirmenler, hatta düşük boy çap oranına sahip değirmenlerin kullanıldığı bilinmektedir [4].

Yüksek boy çap oranına sahip değirmenler incelendiğinde konik çıkışa sahip değirmenlerin düz çıkışlı değirmenlere göre daha yüksek çapa sahip olduğu görölmektedir.

Değirmenin konik çıkışa sahip olması değirmen uzunluğu hakkında bazı karışıklıklara sebep olmaktadır. Bu karışıklık, üreticiler tarafından ortaya çıkarılan "efektif öğütme uzunluğu" teriminden kaynaklanmaktadır. Fakat bu terim geniş tabanda kabul edilmemektedir. Değirmen gövde tasarımlarında iki ekstrem nokta bulunmasına karşı tek bir efektif öğütme uzunluğu verilmesi yeterli değildir [4].

Operasyonel koşullar altında, değirmen içerisindeki malzeme ve öğütücü ortamın yüksekliğine göre efektif öğütme uzunluğu değişiklik gösterebilmektedir. Bu karışıklığı önlemek için en fazla ve en az öğütme uzunluğu verilmelidir. Ayrıca değirmen çapı ile birlikte ölçölen en fazla uzunluğun verilmesi daha uygundur.

2.1.2 Boşaltma Mekanizmaları

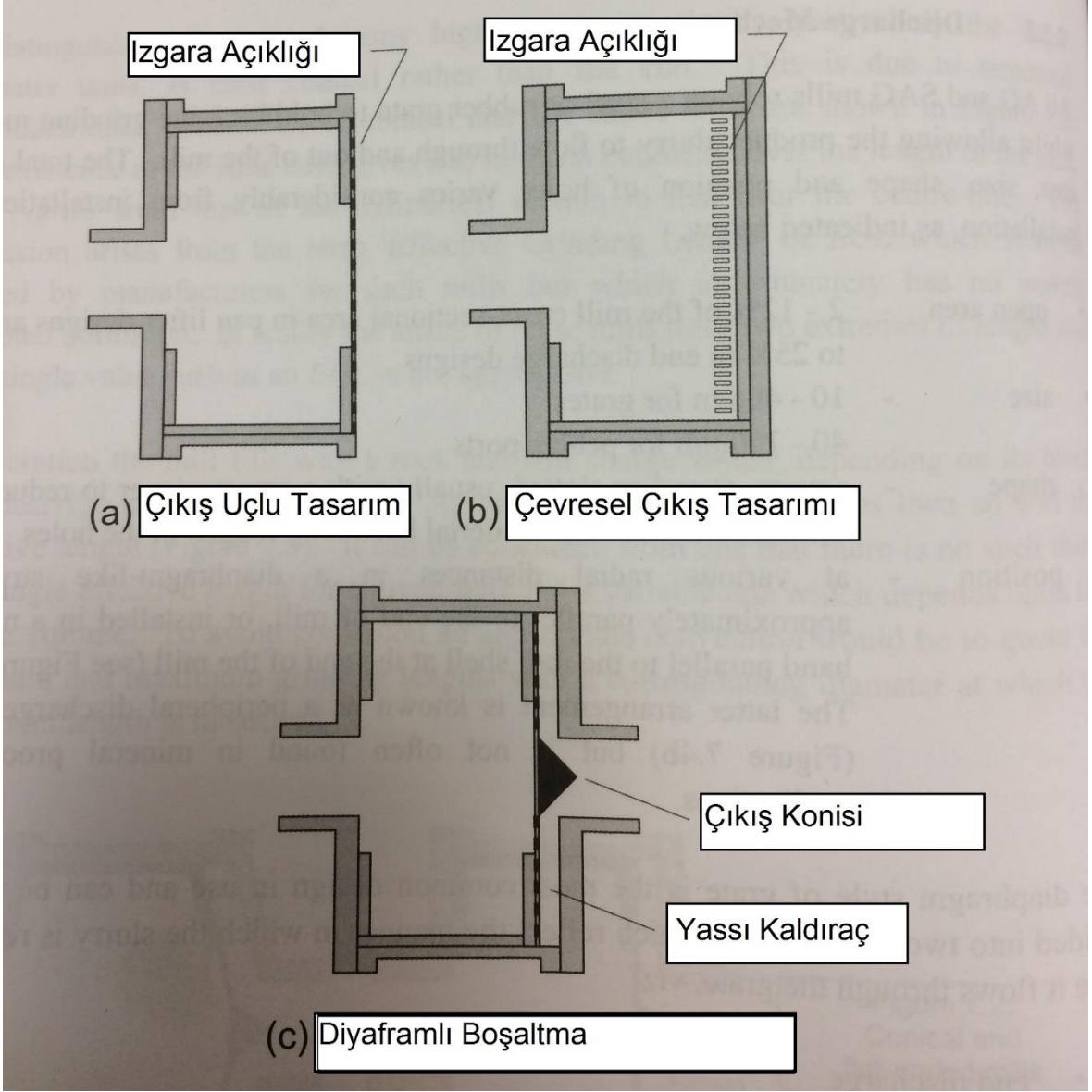
Otojen öğütme uygulamalarında boşaltma sistemleri üç başlık altında toplanabilmektedir. Bunlar diyaframlı boşaltma, çevreden boşaltma ve ızgaralı boşaltmadır. Otojen ve yarı otojen değirmen uygulamalarında çelik veya kauçuktan ızgara sistemleri mevcuttur. Izgara sistemleri öğütücü ortamı değirmen içerisinde tutarken palpın dışarı çıkmasını sağlamaktadır. Toplam açık alan, ızgara boyutları, ızgara şekli ve ızgara pozisyonları operasyonlara göre farklılık gösterebilmektedir.

- Açık alan; diyaframlı boşaltma tasarımına sahip değirmenlerde kesit alanının % 2 – 12 aralığına denk gelmektedir. Izgaralı boşaltmalı değirmenlerde bu oran % 25 değerine kadar ulaşmaktadır.
- Izgara boyutları; 10 – 40 mm kritik boylu taneler için, 40-100 mm iri boyda çakıl çıkışı için
- Izgara şekli; kare yuvarlak veya oluklu olarak tasarlanabilmektedir. Genellikle ters tıpa şeklinde tercih edilmektedir. Bu tasarımın amacı yakın boyutlu taneler tarafından ızgara tıkanmalarını önlemektir.
- Izgara pozisyonu; Diyafram tipi ızgaralar dar bir bant şeklinde değirmen çıkışına paralel olacak şekilde yerleştirilirler. Çevresel ızgaralar ise cevher hazırlama operasyonlarında çok fazla tercih edilmemektedir.

Diyaframlı boşaltma en çok tercih edilen boşaltma tipidir. Diyaframlı boşaltmada kullanılan ızgara palpın dışarı taşınma mekanizmasına göre iki başlık altında incelenmektedir.

- Çıkış uçlu (End – discharge)
- Yassı kaldıraç çıkışlı (Pan – lifter discharge)

İlk tasarımda, değirmen çıkışı tamamen açık olarak bulunmaktadır ve kızaklı rulmanlar tarafından desteklenmektedir. Bu sayede, palp değirmenin dışına kendi cazibesıyla akabilmektedir. İkinci tasarımda, değirmen çıkışına muylu eklemesi yapılmıştır. Palp, muylunun sayesinde yassı plakalara yönlendirilebilmektedir. Bu sistem, farklı tasarımlara sahip olabilmektedir. Muylu, değirmen ile birlikte dönerek çark kanadı görevi üstlenmektedir. Çark kanadı ile kaldırılan palpın ızgaradan rahatlıkla geçişi sağlanmaktadır. Çark kanatları dönerken palp akışı muyluya doğru olduğunda bu durumu engellemek amacıyla çıkış konisi tasarımı kullanılmaktadır. Bu tasarımlar Şekil 2.3'de gösterilmektedir.



Şekil 2.3 Otojen değirmenler için çıkış tasarımları

2.1.3 Astarlar ve Kaldırma Plakaları

Çelik bilyaların ve iri boydaki kaya tanelerinin düşmesi sonucunda değirmen gövdesinin hasar görmemesi için aşınmaya dayanıklı astarlar ile değirmen içerisine kaplama yapılmaktadır. Astarlar genellikle çelik, kauçuk veya kauçukların çelikle güçlendirilmesiyle üretilmektedir. Çelik ve kauçuk malzemenin yapısı değirmen içerisinde hakim olan kırılma mekanizmasına göre seçilmektedir. Örneğin, otojen değirmenlerde, aşınmaya dayanıklı yüksek nitelikli çelik seçilebilirken, diğer taraftan aynı çelik yüksek enerjili çarpımlara karşı dayanıksız olabilmektedir. Yarı otojen değirmenlerde çapları 150 mm'ye kadar ulaşan çelik bilyalar bulunmasından dolayı yüksek enerjili çarpışmaların olması kaçınılmazdır. Bu yüzden seçilen astar malzemelerinin sert olmayan çelikten seçilmeleri ve ayrıca dayanıklı olmaları gerekmektedir.

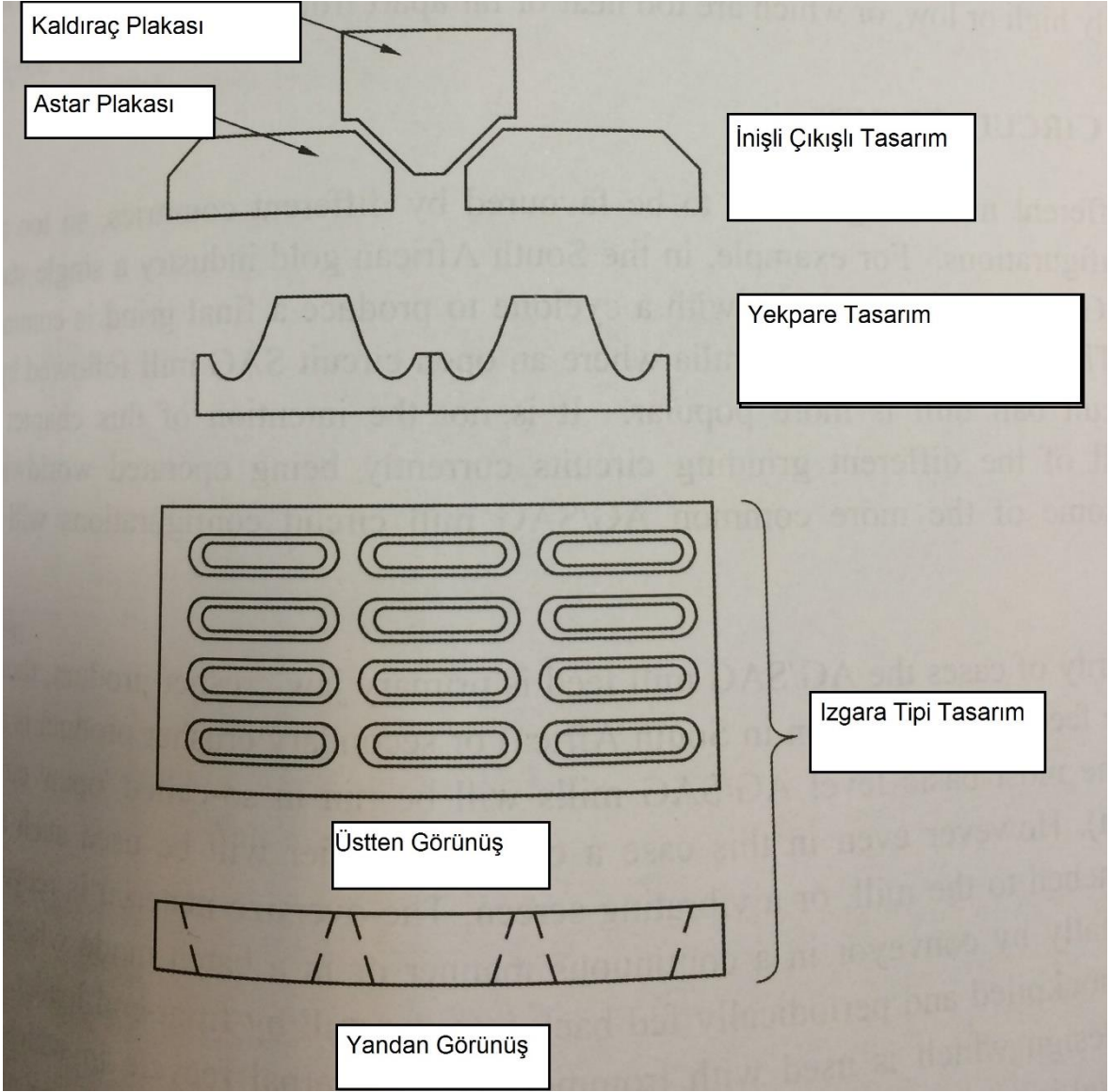
Kaldıraç plakalarının değirmen operasyonlarındaki önemi büyüktür. Özellikle değirmen dönüşü ile yaratılan etki sonucunda kaldırma plakaları değirmen içerisindeki malzemeye belirli bir yükseklik kazandırmaktadır. Kaldıraç plakalarının olmadığı durumda değirmen şarjı sürekli olarak aşağıya kayma eğilimi göstermektedir. Bu sebepten dolayı astarlardaki aşınmanın çok daha hızlı gerçekleşmesi kaçınılmazdır. Bu etki, ileri düzeyde aşınmış astarlarda ve kaldırma plakalarında tecrübe edilmiştir. Bu yüzden aşınmış astarların ve kaldırma plakalarının düzenli aralıklarla değiştirilmesi bir zorunluluk arz etmektedir.

Üç farklı astar ve kaldırma plakalarına ait tasarımlar Şekil 2.4'de verilmiştir. İlk tasarımda astarlar ve kaldırma plakaları birbirinden ayrı şekilde bulunmaktadır. Astarlar monte edildikten sonra kaldırma plakaları astarlara ters bir şekilde monte edilebilmektedir. Bazı durumlarda kaldırma plakaları oluklu olduğu halde astarların düz yüzeylerinden dolayı aşınma kaçınılmaz olmaktadır. Bu tipteki astar ve kaldırma plakaları, inişli çıkışlı sistemler olarak adlandırılmaktadır. Kaldıraç plakalarının aşınma sonucu yükseklikleri minimum değere ulaştığında değiştirme işlemi gerçekleştirilmektedir. Eskimiş kaldırma plakalarının kullanılmaması ve her zaman yeni kaldırma plakalarının tercih edilmesi değirmen performansındaki büyük salınımları önleyici etkiye sahiptir.

Bazı operatörler yekpare astar ve kaldırma plaka sistemlerini de tercih edebilmektedir. Bu tasarımın en büyük avantajı, değiştirilmelerinin oldukça kolay ve hızlı olmasıdır. Bu sayede tesis duruş süreleri kısaltılabilmektedir.

Üçüncü tasarım ızgara şekilli olan tasarımıdır. Bu tip ızgaralı sistemlerde boşlukların bilya veya malzeme ile dolması sonucunda aşınma yüzeyleri oluşmaktadır. Izgara şeklinde, inişli çıkışlı sistemlerin ve yekpare sistemlerin de üzerine kolayca monte edilebilmesi için farklı tasarımlar mevcuttur. Izgaralı sistemlerin, çelik sistemlere göre daha ucuz olması, hafif olmaları ve kolay değiştirilebilir olmaları en büyük avantajlarından. Fakat ızgara aralarına sıkışmış iri tane boylu malzemeler ve bilyalar yüzünden değiştirilmeleri sırasında çok dikkatli olunması gerekmektedir. Izgara aralarından düşebilecek malzeme ve bilyalar ciddi yaralanmalara yol açabilmektedir.

Uygulamada farklı astar tiplerinin ve kaldıraç plakalarının kullanılmasının değirmen performansı üzerindeki etkisini belirlemek çok güçtür. Çünkü aşınmaya bağlı olarak performansta sürekli olarak değişmektedir. Fakat operatörler tarafından kötü tasarımların öğütme performansı üzerinde olumsuz etkileri olduğu tecrübe edilmiştir. Örnek olarak kaldıraç plakalarının birbirlerine çok yakın yada uzak olması, kaldıraç plakalarının birbirlerine göre çok yüksek veya alçak olmaları doğrudan öğütme performansını etkileyebilmektedir.



Şekil 2.4 Otojen değirmenler için kaldıraç plakaları ve astar sistemleri

2.2 Otojen Öğütme Sistemleri ve Devre Tasarımı

Farklı ülkelere ait değirmen tasarımları olduğu gibi devre konfigürasyonları da mevcuttur. Örnek olarak Güney Afrika'daki altın madenlerinde tek kademe otojen ve yarı otojen değirmen uygulamalarına rastlamak mümkündür. Tek kademe otojen ve yarı otojen değirmenler genellikle sınıflandırıcı ekipmanlar ile kapalı devre olarak çalıştırılmaktadır. Nihai öğütme boyuna, tek kademe öğütme ile ulaşılması yaygın bir uygulamadır. Avustralya'daki otojen öğütme sistemleri incelendiğinde açık devre yarı otojen değirmenlerden sonra kapalı devre bilyalı değirmenlerin kullanılması daha yaygındır.

Otojen ve yarı otojen değirmen uygulamalarında genellikle çeneli kırıcı çıkışı değirmene beslenirken bazen doğrudan tüvenan cevher ile besleme yapılan uygulamalara da rastlanabilmektedir. İkincil kırıcı çıkışının beslendiği otojen ve yarı otojen değirmen uygulamaları az da olsa mevcuttur [4]. Temel olarak otojen öğütme uygulamaları açık devre olarak çalıştırılmaktadır. Fakat trommel eleği veya titreşimli eleklerle iri tanelerin sınıflandırılarak tekrar otojen değirmene döndürüldüğü uygulamalara sıkça rastlanmaktadır. İri malzemeler sürekli olarak konveyör bantla taşınabildiği gibi stoklandıktan sonra yükleyiciler vasıtasıyla da değirmene beslenebilmektedir. Alternatif tasarımlarda ise iri tanelerin, trommel eleği ile birlikte çalışan ters spiral uygulaması veya su jeti uygulamaları ile değirmenin içine gönderildiği uygulamalar mevcuttur [4].

Otojen veya yarı otojen değirmenlerin genellikle hidrosiklonlar ile kapalı devre çalıştırıldığı durumda devrenin tüvenan besleme kapasitesi, açık devre çalışan ve aynı tane boyu değerine öğüten otojen devrelerine göre daha düşük kalmaktadır. Bu durumun sebebi hidrosiklon alt akımından gelen malzeme miktarının çok fazla olması sebebiyle tüvenan besleme tonajının arttırılamamasına bağlanmaktadır.

Bir başka devre tasarımında ise otojen ve yarı otojen değirmenler kırıcı ile kapalı devre olarak çalıştırılmaktadır. Bu tasarıma olan ilgi geçtiğimiz yıllarda oldukça artmıştır. Özellikle açık devre tasarımına göre tüvenan besleme tonajını arttırmada daha etkili olmaktadır. Kırıcının değirmen ile kapalı devre çalıştırılması operasyonun doğası gereği doğrudan tüvenan besleme tonajını etkilemektedir. Özellikle değirmen içerisinde yük oluşturan kritik boylu tanelerin (25 - 50 mm) ortadan kaldırılmasıyla değirmen içerisindeki yük miktarı azalmaktadır. Böylece tüvenan besleme tonajı arttırılabilmektedir [4].

Bazı devrelerde otojen ve yarı otojen değirmen ile birlikte hidrosiklon ve çakıl kırıcısının çalıştırıldığı durumlara da rastlanmaktadır. Değirmen içerisindeki iri tanelerin kırıcıda kırılması sonucu ince taneler için gerekli olan öğütme ortamı sağlanamadığından dolayı hidrosiklon üst akımından oldukça iri boyda malzeme alınmaktadır. Böylece ince tane boyuna sahip hidrosiklon üst akımı elde etmek için devrenin tüvenan besleme kapasitesi düşürülmektedir. Diğer taraftan kırıcı kullanılarak yaratılan olumlu etki hidrosiklonların kapalı devre çalıştırılması ile maskelenmektedir [4].

Yarı otojen öğütme sistemlerinde öğütücü ortam olarak kullanılan bilyaların ızgaralardan çıkarak kırıcıya gitme ihtimali oldukça yüksektir. Bu sebepten dolayı kırıcı ile kapalı devre çalıştırılan yarı otojen öğütme devrelerinde elektromıknatis sistemi ile bilyaların ayrılması oldukça önemli bir husustur [4].

2.3 Otojen Değirmen Beslemesinin Önemi

Otojen öğütme operasyonlarında en önemli parametrelerden biri değirmen beslemesinin tane boyu dağılımıdır. Çünkü değirmene beslenen malzeme, hem öğütücü ortam hem de öğütülen malzeme olmaktadır. Bu yüzden besleme içerisinde iri ve ince tane oranlarına dikkat edilmesi gerekmektedir. Fakat iri tanelerin değirmen içerisindeki ince taneleri kırmak için yeterli enerjiye sahip olması gerçeği de göz ardı edilmemelidir. Öğütücü ortamı oluşturan iri tanelerin değirmen içerisine sürekli olarak beslenmesi sağlanmalıdır. Bundan dolayı otojen değirmen uygulamalarında selektif madencilik yapılması ve patlatma tasarımlarının buna göre belirlenmesi oldukça büyük önem arz etmektedir. Otojen değirmen uygulamalarında besleme tane boyu dağılımının % 25 - 30'luk kısmını, 150 – 200 mm arasında olan tanelerin oluşturması gerekmektedir. Bu boydaki tanelerin öğütücü ortam olması için yeterli özellikte ve aşınmaya karşı dayanıklı olması gerekmektedir. İnce tanelerin ise çabuk öğünür özellikte olduğuna dikkat edilmelidir. Otojen değirmen içerisinde esas yükü oluşturan kritik boylu taneler öğütme için yetersiz kalmakta iken öğütücü ortam tarafından öğütülmeleri de oldukça zordur. Bu yüzden kritik boylu tanelerin değirmenden çıkarılması ve kırıcıda kırılması sonucu tekrar değirmene döndürülmesi gerekmektedir. Ayrıca kritik boylu taneler otojen öğütme uygulamalarından sonra çakıl veya bilyalı değirmenlerde öğütücü ortam olarak kullanılabilir [5].

Değirmenin maksimum gücünü çekmesini sağlayacak en uygun besleme tane boyu Eşitlik 2.1 ile hesaplanabilmektedir. [6]:

F_{80} = Beslemenin %80' inin geçtiği boy (mm)

D = Değirmen iç çapı (m)

$$F_{80} = 53.5 * D^{0.87}$$

Eşitlik 2.1

3. ÇAKILLI DEĞİRMENLER

Çakıllı değirmen uygulamaları genellikle otojen öğütme operasyonlarından sonra gelen ikincil öğütme kısmında tercih edilmektedir. Tasarım olarak bilyalı değirmenlere oldukça benzeyen çakıllı değirmenlerde öğütücü ortam olarak çelik bilya yerine iri boylardaki çakıllar tercih edilmektedir. Bazı durumlarda çakıllı değirmen uygulamalarında öğütücü ortam oluşturması için seramik çakıllar veya çakmaktaşı kullanımına da rastlanabilmektedir. Çakıllı değirmen uygulamalarında kullanılan çakılların kırılmaya ve aşınmaya karşı dayanıklı olması önemli bir husustur. Çakıllı değirmenlerde kullanılan iri boydaki çakılların ağırlığı çelik bilyalara göre % 35 - 55 oranında daha hafiftir. Bundan dolayı hem güç tüketimi hem de kapasitesi bilyalı değirmenlere göre düşük kalmaktadır. Aynı besleme tonajı işlendiği koşullarda çakıllı değirmenlerin boyutlarının bilyalı değirmenlere göre oldukça büyük olması gerekmektedir. Bu yüzden ilk yatırım maliyeti bilyalı değirmenlere göre daha yüksek olmaktadır.

Öğütücü ortam sarfiyatının olmamasından dolayı bilyalı değirmenlere göre işletme maliyetleri oldukça düşüktür. Diğer taraftan ton başına nihai ürün üretimi için gerekli olan enerji miktarının yüksek olması, çakıllı değirmenlerin bu avantajını kısmen dengelemektedir [7].

Flotasyon ile zenginleştirme operasyonlarında ve seramik öğütme işlemlerinde çakıllı değirmen kullanılmasının çok ciddi avantajları bulunmaktadır. Örneğin, çelik bilya kullanılmadığı için değirmen içerisinde herhangi indirgeyici bir ortam oluşmamaktadır. Ayrıca seramik öğütme işlemlerinde demir kirlenmesi istenmeyen bir durumdur. Bu sebeplerden dolayı çakıllı değirmenler ile öğütme uygulamaları sıkça tercih edilmektedir.

Çakıllı değirmen işletmeciliği diğerleri ile karşılaştırıldığında daha çok dikkat gerektirir. Öğütülecek cevher ve öğütücü malzeme boyutu iyi ayarlanıp kontrol edilmelidir. Bu değirmenlerde palptaki katı oranı, bilya kullanılan palptaki katı oranından % 3 – 5 oranında daha düşüktür [8].

3.1 Gövde Tasarımı

Çakıllı değirimen için yapılan gövde tasarımlarında genellikle boy çap oranı 3:1 olarak tercih edilmektedir. Değirimen içerisinde kullanılan öğütücü ortamın çakıllardan oluşmasından dolayı bilyalı değirimenlere göre daha hafif malzemelerden yapılmış gövde malzemesi tercih edilebilir. Özellikle değirimen gövdesi ile öğütücü ortam arasında şiddetli çarpışmaların gerçekleşmemesinden dolayı gövde çeliğinin aşırı dayanıklı olmasına gerek duyulmamaktadır. Ayrıca akıllı değirimenin, içerisindeki şarjla birlikte olan ağırlığı, bilyalı değirimenin şarjla ile birlikte olan ağırlığına göre çok daha azdır. Bu yüzden değirimen yataklarının üzerindeki eksenel yükler de bilyalı değirimenlere göre daha az olmaktadır.

3.2 Boşaltma Mekanizmaları

Çakıllı değirimenlerin boşaltma mekanizmaları bilyalı değirimen boşaltma mekanizmaları ile neredeyse aynıdır.

Bilyalı değirimenler çıkış mekanizmalarına göre taşmalı değirimenler ve ızgara çıkışlı değirimenler olarak sınıflandırılmışlardır. akıllı değirimenler içinde aynı sınıflandırma geçerli olmaktadır. Iızgara ıkışlı değirimenlerde silindirik gövde ile değirimen çıkışı arasına ızgara plakaları yerleştirilmiştir. Bu tip değirimenlerde, palp ızgara açıklıklarına doğru kendi cazibesi ile akmaktadır. Daha sonra kaldıraç plakaları tarafından kaldırılarak değirimen çıkışına yönlendirilmektedir. ıkış mekanizması farklılıklarından dolayı tanelerin değirimen içerisindeki durma zamanı azalabilmektedir. Bu yüzden ızgara çıkışlı değirimenlerin taşmalı değirimenlere göre daha düşük katı yoğunluğunda çalıştırılması sıkça tercih edilen bir uygulamadır. Iızgaralar aynı zamanda sınıflandırıcı görevi gördüğünden aşırı ğnmeyi engellerken iri boydaki tanelerin de dışarı çıkmasına izin vermemektedir. Kapalı devre olarak yüksek geri dönüş yükü ile çalıştırılan değirimenlerin, açık devre çalıştırılanlara göre dar tane boyu aralığında öğütülmüş nihai ürün kapasitesi daha yüksek olmaktadır. Iızgara ıkışlı değirimenlerin besleme tane boyu dağılımı, taşmalı değirimenlere göre daha iri olabilmektedir. İri boyda ufalanan çakılların ızgaralardan hızlı bir şekilde çıkmasıyla ince tane boylarında öğütme yapmak zorlaşmaktadır. Bunun aksine, üstten taşmalı değirimenlerde ise daha ince tane boylarında öğütme yapılabilmektedir. Bu yüzden ikincil ve tekrar öğütme devrelerinde üstten taşmalı değirimenler daha çok tercih edilmektedir. Aynı zamanda üstten taşmalı değirimenlerin operasyonel olarak işletilmesinin daha kolay olmasından dolayı sıkça

bilyalı değirmen uygulamalarında tercih edilmektedir. Aynı öğütme performansında ve aynı boyutlarda olan üstten taşmalı değirmenlerin, ızgara çıkışlı değirmenlere göre enerji tüketimi % 15 daha düşüktür.

3.3 Astarlar ve Kaldırma Plakaları

Değirmen astarları, gövdenin korunması açısından önemli bir role sahiptir. Uygulamalara göre astarlarda farklılıklar gözlenebilmektedir. Örneğin, bilyalı ve çubuklu değirmen uygulamalarında yanyana dizilmiş dalga tipi astarlar tercih edilmektedir. Çakıllı değirmenlerde de dalga tipi astar tasarımına oldukça sık rastlanmaktadır. Dalga tipi astar tasarımlarında da kauçuk ve çelik alaşımlar kullanılmaktadır.

Çakıllı değirmen içerisindeki öğütücü ortamın kaldırılarak yeniden düşmesinin sağlanması için ara boşlukların maksimum çakıl boyutuna yakın olması gerekmektedir. Aksi takdirde öğütücü ortam aşağıya kayma eğiliminde bulunacağından astarlarda daha kısa zamanda aşınma meydana getirecektir.

4. OTOJEN DEĞİRMEN BOYUTLANDIRILMASINDA KULLANILAN DENEYSEL YÖNTEMLER

Endüstriyel öğütme devrelerinin tasarımı, öğütme performansının tahmin edilmesi ve kırılma mekanizmalarının anlaşılması için laboratuvar ölçekli kırılma karakterizasyonu testlerinin geliştirilmesine günümüzde de devam edilmektedir. Bu testler genel olarak üç başlık altında toplanmıştır; konvansiyonel kaya ve çatlak mekanizması ölçümleri, standart öğütme testleri ve tek tane ile yapılan testlerdir.

Standart öğütme testleri, Bond tarafından geliştirilen boyut küçültmenin üçüncü yasasına dayanmaktadır. Boyut küçültme makinalarının tasarımında uzun süreden beri en geçerli yöntemlerden birisidir. Geniş bir veri tabanına sahip olmasından dolayı endüstriyel uygulamalarda güvenilir sonuçlar vermektedir. Kapalı devre öğütme sistemlerinde, Bond yaklaşımında da olduğu gibi geri dönen malzemenin miktarı, malzemenin sertliği ile ilişkilendirilmiştir. Fakat otojen ve yarı otojen değirmen tasarımlarında iyi bir tahmin aracı olmadığından kullanımı tavsiye edilmemektedir.

Otojen, yarı otojen ve kırıcı boyutlandırılmasında tek tane ile yapılan testler proses modelleri ile birleştirildiğinde oldukça etkili bir tahmin aracı olmaktadır. Bu testlerin, iri tane boylarında ve 5 mm'den iri beslemesi olan bilyalı değirmenlerin boyutlandırılmasında tahmin kapasitesi oldukça yüksektir. Fakat, 100 μm ' den ince tane boylarında kullanılmaması önerilmektedir.

4.1 Otojen ve Yarı Otojen Değirmenler için Güç İndeksi Tayini (SPI)

Otojen ve yarı otojen değirmen boyutlandırmasının doğru bir şekilde yapılabilmesi için farklı test yöntemleri uzun yıllardır geliştirilmektedir. Güç indeksi tayini yöntemi, temel olarak Bond yaklaşımının üçüncü yasasına dayanmaktadır. Bond teorisinin üçüncü yasasına göre ürünün tane boyu dağılımı uygulanan enerji ile doğrudan ilişkilidir.

MacPherson tarafından geliştirilen ve kuru değirmen ile yapılan otojen öğütme testlerinde iş indeksi (AWi) hesaplanabilmektedir. Test değirmeninin boyutları 457 mm çapında ve 152 mm boyundadır. Değirmen % 16 bilya doluluğunda sürekli olarak çalıştırılmaktadır. Öğütme işleminde tamamı 3.175 mm'nin altına kırılmış malzeme kullanılmaktadır. Öğütülen malzemenin özelliğine bağlı olarak ürün tane boyu dağılımı 0.2 ile 0.5 mm arasında değişmektedir. Bu yöntem sayesinde öğütülen malzeme için ölçülen güç değeri ve otojen bond iş indeksi değeri elde edilmektedir [9].

Geliştirilen yarı otojen güç indeksi tayini yönteminde ise AWi değerinin, üretilen ürünün tane boyuna bağlı olarak değişebildiği bilinmektedir. Büyük ölçekli otojen ve yarı otojen değirmenlerde ürün tane boyu dağılımının % 80'inden geçen tane boyu çoğunlukla 2 mm'den iri olmaktadır. MacPherson tarafından geliştirilen otojen iş indeksi testinde ürün tane boyunun 0.2 ile 0.5 mm arasında olduğu varsayılmaktadır. Bu sebeplerden dolayı, elde edilen sonuçların doğruluğu tartışma yaratmaktadır. Daha doğru sonuçların elde edilebilmesi ve değirmen boyutlandırılmasının doğru bir şekilde yapılabilmesi için güç indeksi tayini yöntemi geliştirilmiştir. Bu yaklaşım, bilyalı değirmen bond iş indeksi değeri ile birlikte kullanıldığında son derece doğru sonuçlar vermektedir.

Yarı otojen güç indeksi testi iki kg numune ile yapılmaktadır. Hazırlanan numunenin % 100'ününün 19 mm'den geçmesi ve aynı zamanda %80'inin ise 12.7 mm'den ince olması gerekmektedir. Test değirmeninin boyutları 305 mm çapında ve 102 mm boyundadır. Starkey yarı otojen değirmeni olarak adlandırılmaktadır. Öğütme işlemi, malzemenin % 80'i 1.7 mm'den ince olana kadar devam ettirilmektedir. Bu boyut küçültme işlemi için gerekli olan zaman dakika olarak ölçülmektedir. Elde edilen zaman değeri ampirik bir formül ile güç değerine çevrilmektedir. Elde edilecek güç değeri Eşitlik 4.1'de gösterilmiştir.

$$W = a * f\left(\frac{SPI}{p^{0.5}}\right)^b$$

Eşitlik 4.1

Bu denklemde, a ve b parametreleri ampirik olarak türetilmiş sabitlerdir. P ise tane boyu dağılımının % 80'inin geçtiği boyu belirtmektedir [9].

4.2 Ağırlık Düşürme Yöntemi ile Otojen Değirmen Boyutlandırılması

Ağırlık düşürme yöntemi prensip olarak belirli bir yükseklikten tane üzerine ağırlık bırakılmasıdır. Daha sonra, düşmenin etkisiyle kırılan tanenin tane boyu dağılımı belirlenmektedir.

Ağırlık düşürme testi genellikle kömür gibi yumuşak malzemelerin kırılma karakteristiğini belirlemek için kullanılmaktadır [10]. Ayrıca kömürün taşınması sırasında oluşan aşınma miktarının simülasyonu için de kullanılmaktadır [11].

Literatürde, farklı tiplerde ağırlık düşürme testi için tasarlanan ekipmanlar bulunmaktadır. İlk olarak, yüzey alanı ile uygulanan enerji arasında bir ilişki olduğu belirtilmiştir [12].

Gross tarafından kullanılan ilk ekipman geliştirilerek gevrek malzemelerin kırılması için kullanılmıştır. Uygulanan enerjinin kırılan malzemenin tane boyu dağılımı ile ilişkili olduğu ortaya konmuştur [13].

Geliştirilen ekipman ile tane yatağı üzerine ağırlık düşürme testleri yapılmıştır. Uygulanan net enerjinin yaratılan yeni yüzey alanı ile ilişkili olduğu belirlenmiştir. Bu testlerden sonra oluşan tane boyu dağılımı Schuhmann eşitliği ile tanımlanmıştır [14].

$$E_{is} = A * k^{(1-n)}$$

Eşitlik 4.2

E_{is} , uygulanan özgül enerji değeridir. A ve n parametreleri sabit değerlerdir. K parametresi ise Schuhmann eşitliğindeki boyut modülünü belirtmektedir.

Schönert tarafından geliştirilen yaklaşımda, ağırlık düşürme ekipmanı tek bir tanenin kırılması için gerekli olan enerji miktarını belirlemek amacıyla kullanılmıştır. Buradan yola çıkarak çalışan bir değirmenin performansının değerlendirilmesine temel oluşturulmuştur. Enerji kullanımı, yeni yüzey alanı yaratmak için gerekli olan enerjinin yeni yüzeylere oranı olarak tanımlanmıştır [15].

Diğer yaklaşımlarda ise ağırlık düşürme yönteminin kayaç sertliğini belirlemek amacıyla kullanıldığına dair bulgulara rastlamak mümkündür. Fakat enerji ve boyut küçültme arasındaki ilişkinin tam olarak ortaya konulamamasından dolayı kullanım alanı bulamamıştır.

Cevherlerin kırılma karakteristiklerini belirlemek amacıyla JKMRC tarafından kullanılan ikiz sarkaç yöntemi, ağırlık düşürme test yöntemi ile değiştirilmiştir [16].

Standart ağırlık düşürme test ekipmanı 20 kilogram ağırlıktan 50 kilogram ağırlığa kadar yüklenebilmektedir. Ayarlanabilir yükseklik ayarı sayesinde 0.05 metreden 1 metreye kadar yükseltilebilmektedir. Tane boyu aralığına bağlı olarak 0.01 kWh/ton değerinden 50 kWh/ton değerine kadar çıkılabilmektedir.

JKMRC tarafından kullanılan ağırlık düşürme testinde gerekli parametrelerin belirlenebilmesi için beş farklı tane boyu aralığında, üç enerji düzeyi tercih edilmektedir. Tane boyu aralıklarına ve enerji düzeylerine ilişkin bilgiler Çizelge 4.1’ de verilmiştir.

Çizelge 4.1 JKMRC tarafından uygulanan ağırlık düşürme testine ait tane boyu aralıkları (mm) ve enerji düzeyleri (kWh/ton)

Test	-63+53 mm	-45+37.5 mm	-31.5+26.5 mm	-22.4+19 mm	-16+13.2 mm
1.Enerji Düzeyi (kWh/ton)	0.10	0.10	0.25	0.25	0.25
2.Enerji Düzeyi (kWh/ton)	0.25	0.25	1.00	1.00	1.00
3.Enerji Düzeyi (kWh/ton)	0.50	1.00	2.50	2.50	2.50

Ağırlık düşürme testi sonucunda özgül ufalanma enerjisi ile kırılmış malzemenin inceliği arasındaki ilişki Eşitlik 4.3 ’de gösterilmektedir.

$$t_{10} = A * (1 - e^{(-E_{cs}*b)})$$

Eşitlik 4.3

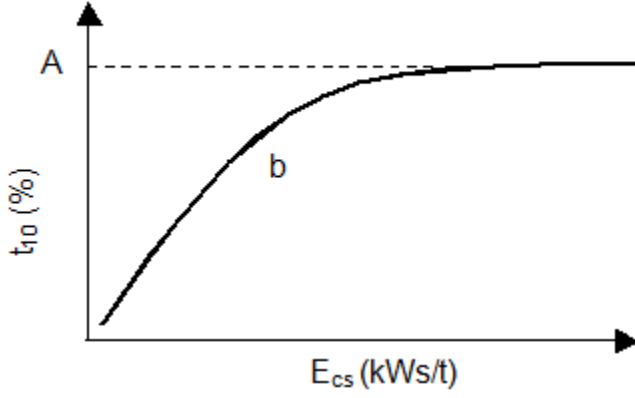
Eşitlikte;

t_{10} : Test edilen tane boyu aralığının geometrik ortalamasının 1/10’ undan geçen malzeme miktarı (%)

E_{cs} : Özgül ufalanma enerjisi (kWh/ton)

A ve b: Cevhere özgü parametrelerdir.

İncelik indeksi (t_{10}) ile özgül ufalanma enerjisi arasındaki ilişki Şekil 4.1 'te verilmiştir.



Şekil 4.1 İncelik indeksi ve özgül ufalanma enerjisi arasındaki ilişki

A parametresi maksimum t_{10} değerini göstermektedir. Belirli bir enerji seviyesinden sonra daha fazla ince malzeme oluşturulamayacağını ifade etmektedir. $A*b$ değeri özgül ufalanma enerjisinin sıfır olması durumunda eğrinin eğimini ifade etmektedir. $A*b$ değeri tane boyu ile değişmektedir. Tane boyu ne kadar irileşirse irileşsin, bu değer artmayacağını göstermektedir.

Ağırlık düşürme testi sonucunda elde edilen cevhere özgül A ve b parametreleri kırıcı ve değirmen boyutlandırılması çalışmalarında kullanılmaktadır.

4.3 SMC Test Yöntemi İle Otojen Değirmen Boyutlandırılması

Bu yöntem, cevhere ait özgül öğütme enerjisinin belirlenmesi ve öğütme devrelerinin tasarımında gerekli olan parametrelerin elde edilmesi amacıyla geliştirilmiştir. SMC testinin sonucunda üretilen indeks (DWi) sayesinde otojen ve yarı otojen öğütme devrelerinin model bazlı ve güç bazlı yaklaşımları ortaya konmaktadır. Model bazlı yaklaşımda JK kaya kırılma parametreleri olan A ve b değerleri doğrudan DWi değeri ile ilişkilendirilebilmektedir. Güç bazlı yaklaşımda ise özgül öğütme enerjisi ve DWi indeksi arasında geliştirilen korelasyonlar ile güç tahminleri yapılabilmektedir. Bu yöntem, JK Tech firması tarafından geliştirilen JK Simmet yazılımı ile yapılan otojen, yarı otojen ve kırıcı devrelerinin simülasyonunda gerekli olan A, b ve ta parametreleri ile kırıcılar için gerekli t_{10} - Ecs enerji matrislerinin belirlenmesini oldukça kolay hale getirmiştir. Bu yaklaşım, boyut küçültme makinalarını temelde üç gruba ayırmaktadır;

- Otojen, Yarı Otojen, Bilyalı Ve Çubuklu Değirmenler
- Çeneli Kırıcı, Döner Kırıcı Ve Konik Kırıcılar
- Yüksek Basınçlı Öğütme Ruloları (HPGR)

Dar tane boyu aralığında sınıflandırılmış kayaç taneleri veya sondaj karotlarının düzgün şekillerde kesilmesi ile elde edilen taneler bu test kapsamında kullanılabilir. Seçilen taneler farklı enerji düzeylerinden ağırlık düşürme test düzeneği ile kontrollü olarak kırılmaktadır. Deneysel sonuçların tekrarlanabilirliği açısından besleme tane boyunun önemi oldukça büyüktür. Bu test çalışması için 15 – 20 kg malzeme yeterli olmaktadır. Ağırlık düşürme testi ile kıyaslandığında tek tane boyu aralığında yapılması en büyük avantajlarından. Aynı zamanda, veri tabanından elde edilen düzeltme faktörleri sayesinde oldukça doğru sonuçlar elde edilebilmektedir. SMC testi için önerilen boyut fraksiyonları – 31.5 + 26.5 mm, - 22.4+19.0 mm, -16.0+13.2 mm'dir.

Döner değirmenlerde M_{ia} ve M_{ib} indisleri kullanılmaktadır. Kırıcılarda ise M_{ic} indisi kullanılmaktadır. Yüksek basınçlı öğütme ruloları için kullanılan indis ise M_{ih} 'dir.

Döner değirmenler için kullanılan iki indis sırasıyla iri ve ince cevher özelliklerini tanımlamaktadır. Bu durumda, iri boy olarak tanımlanan aralık, % 80'inin 750 mikrondan iri, son kırıcı devresinin ürün boyundan ince olduğu durumdur. İnce olarak tanımlanan aralık ise şu şekilde belirtilmiştir; % 80'inin 750 mikrondan ince olduğu ve konvansiyonel bilyalı değirmen ile ulaşılabilen tane boyu değeridir.

Konvansiyonel bilyalı değirmen ile ulaşılabilen tane boyu değeri 45 mikron olarak kabul edilmiştir. Bu yaklaşımda, iri ve ince tane boyu arasındaki değer 750 mikron olarak seçilmiştir. Bunun sebebi, yapılan testlerde en iyi sonucun bu tane boyunda elde edilmiş olmasıdır. Bu yaklaşımda da besleme ve ürün tane boyu dağılımları diğer tüm güç yaklaşımlarında olduğu gibi logaritmik ekseninde paralel ve lineerdir. Döner değirmenlerde iri boylar için kullanılan iş indeksi M_{ia} olarak belirtilmiştir. İnce boylar için iş indeksi ise M_{ib} olarak gösterilmiştir [17]. M_{ia} değeri doğrudan SMC testinden standart çıktı olarak sağlanabilmektedir [18]. Fakat, M_{ib} değeri konvansiyonel bilyalı değirmenler için geliştirilen Bond iş indeksi değerinden hesaplanmaktadır. (M_{ib} değeri bilyalı değirmenler için kullanılan Bond iş indeksi değeri değildir.) M_{ic} ve M_{ih} değerleri de SMC testinin standart çıktısı olarak elde edilmektedir. [19].

Genel boyut küçültme eşitliği şu şekildedir [20].

$$W_i = M_i 4(x_2^{f(x_2)} - x_1^{f(x_1)}) \quad \text{Eşitlik 4.4}$$

M_i : Cevherin kırılmasına bağlı iş indeksi değeri (kWh/ton)

W_i : Özgül ufalanma (kWh/ton)

X_2 : Ürünün % 80'inin geçtiği tane boyu değeri (μm)

X_1 : Beslemenin % 80'inin geçtiği tane boyu değeri (μm)

$f_{x(j)}$: $-(0.295+x_j/1000000)$

Döner değirmenler için güç hesaplaması aşağıda gösterildiği gibidir.

İri taneler için geçerli olan formül Eşitlik 4.5'te verilmiştir.

$$W_a = K_1 M_{ia} 4(x_2^{f(x_2)} - x_1^{f(x_1)}) \quad \text{Eşitlik 4.5}$$

K_1 : Çakıl kırıcısı bulunan devrelerde bu değer 0.95 olarak alınırken diğer tüm koşullarda bu değer 1 olarak alınmaktadır.

X_1 : Öğütmeden önce kırıcı devresinden çıkan ürünün % 80'inin geçtiği tane boyu değeri

X_2 : 750 μm

M_{ia} : İri boy için SMC testinden elde edilen değer

İnce taneler için geçerli olan formül Eşitlik 4.6 'da verilmiştir.

$$W_b = M_{ib} 4(x_3^{f(x_3)} - x_2^{f(x_1)}) \quad \text{Eşitlik 4.6}$$

x_2 : 750 μm

x_3 : Ürün tane boyunun % 80'inin geçtiği tane boyu değeri (μm)

M_{ib} : Standart bilyalı değirmenler için kullanılan Bond iş indeksi testinden sağlanmaktadır [21].

$$M_{ib} = \frac{18.18}{P_1^{0.295}(Gbp)(p_{80}f(p_{80}) - f_{80}f(f_{80}))} \quad \text{Eşitlik 4.7}$$

M_{ib} : İnce taneler için iş indeksi (kWh/ton)

P_1 : Deney elek açıklığı (μm)

Gbp : Her bir dönüşte elek altına geçen malzeme miktarı (g)

P_{80} : Ürün tane boyunun % 80'inin geçtiği değer (μm)

F_{80} : Besleme tane boyunun % 80'inin geçtiği değer (μm)

4.4 Pilot Ölçekli Testler ile Otojen Değirmen Boyutlandırılması

Laboratuvar ölçekli deneylerin yaygınlaşmasından önce otojen ve yarı otojen değirmenler için boyutlandırma işlemleri genellikle pilot ölçekli testlerin sonuçlarına göre yapılmaktaydı. Bazı tasarımlarda, çalışan otojen ve yarı otojen değirmenlerin bulunduğu öğütme devrelerinden alınan numuneler kullanılıyordu. Test numunesi seçilirken cevher yatağının tamamını temsil etmesi en önemli noktalardan birisidir. Fakat cevher yatağının işletilmeye başlandığı ilk zamanlarda tüm yatağı temsil edecek numune alınması neredeyse imkansızdır. Büyük yarmalar ve kuyular açılması gerektiğinden numune alma çalışmaları oldukça maliyetli hale gelebilmektedir. Test merkezlerinin maden sahalarına uzak olması sebebiyle nakliye masrafları da ağır bir yük oluşturmaktadır. Pilot ölçekli testler, çalışılan numune miktarının çok fazla olması ve testlerin uzun sürmesinden dolayı günümüzde de artık tercih edilmemektedir. Pilot ölçekli testler sonucunda boyutlandırılan otojen ve yarı otojen değirmenlerin güç ve kapasite bakımından yetersiz kaldığı durumlara da sıkça rastlanmaktadır.

Pilot ölçekli testler için numune seçimi yapılırken otojen öğütmeye uygunluğuna ve tane boyu dağılımına dikkat edilmesi gerekmektedir. Cevher yatağı içerisinde değişiklik söz konusu ise her bölgeden ayrı ayrı numune alınması önem arz etmektedir. Pilot ölçekli testlerde kullanılan numune miktarı 20 ile 100 ton arasında değişmektedir [5].

Cevherin otojen öğütme için yeterli duraylılıkta ve iri boyda olması istenirken kendi kendini de öğütebilmesi gerekmektedir. Ayrıca ince taneleri kırmak için yeterli sertliğe de sahip olması beklenmektedir. Cevherin otojen öğütmeye olan uygunluğu şu şekilde tanımlanmıştır; tek eksenli basma dayanımı 180 MPa'ın üzerinde, Bond kırıcı indeksi 20 kWh/ton'dan fazla ve bilyalı değirmen Bond iş indeksi değeri 15 kWh/ton'dan fazla ise otojen öğütme uygulamaları için uygundur [5].

Otojen öğütmeye uygunluğun belirlenmesi amacıyla geliştirilen Allis Chalmers düşürme testi yöntemi de kullanılabilir. Bu testin sonuçları, darbe, aşınma ve öğütülebilirlik sonuçları ile birlikte değerlendirildiğinde otojen öğütmeye uygunluk hakkında bilgi vermektedir. Test beş farklı fraksiyonda yapılmaktadır. Her bir fraksiyon için 10 adet tane seçilmektedir. Toplamda ağırlıkları 180 kg ile 270 kg arasında değişen 50 adet tane gerekmektedir.

Bu taneler 1.83 metre çapında ve 0.305 metre uzunluğundaki değirmende 26 devir/dakika ile kritik hızın % 83'ünde döndürülmektedir. 500 devir döndürüldükten sonra değirmenden çıkarılan tanelerin içerisinde 63x50 mm üzerinde olan taneler ayrılarak tartılmaktadır. – 50.0 + 6.7 mm aralığında kalan malzemeye elek analizi yapılarak alt boylara doğru olan dağılım belirlenmektedir. Aynı numunelere bond darbe indeksi ve aşınma testleri yapılarak değirmenin çekeceği güç tahmin edilmeye çalışılmaktadır.

Numune temini ve uygunluk testlerinden sonra pilot ölçekte testler ızgara boşaltmalı 1.83 metre çapında ve 0.91 metre boyunda değirmen ile yapılmaktadır. Bu ölçüler kullanılabilecek en küçük pilot ölçekli değirmene aittir. Boyut ölçülerinin daha da küçülmesi sonucunda besleme tane boyu da aynı oranda küçülecek ve oluşturulan öğütme ortamı gerçekliğini kaybedecektir. Pilot ölçekli test değirmeninin yaklaşık kapasitesi bir veya iki ton/saat civarındadır. Değirmen elek veya hidrosiklon ile kapalı devre olarak çalıştırılmaktadır. Besleme tonajının düşük olmasından kaynaklı hidrosiklon kullanımını oldukça zordur.

Ölçek büyütme işlemlerinin doğru bir şekilde yapılabilmesi için güç tüketimi ölçümlerinin titizlikle yürütülmesi gerekmektedir. Testlere başlamadan önce değirmen boş olarak on beş saat çalıştırılmaktadır. Aynı şekilde test bittikten sonra değirmen yedi saat boyunca boş olarak çalıştırılmaktadır. Bu uygulamanın temel amacı güç ölçümlerinde meydana gelen dalgalanmanın ortadan kaldırılması içindir. Uzun süre boyunca güç tüketiminin takip edilmesi ile ölçümlerin güvenilirliği kontrol edilmektedir. Ortalama bir test süresi dört gün sürmektedir. Testlerde ölçülen güç net olup her ton besleme için kWh olarak ölçülmektedir. Deneylerin sonunda işlemsel iş indeksi (Woi) belirlenmekte ve endüstriyel değirmenin enerji tüketiminin hesaplanmasında kullanılmaktadır [22].

Ölçek büyütme çalışmalarının en büyük dezavantajlarından birisi pilot ölçekli değirmen içerisinde meydana gelen öğütme koşulları ile endüstriyel ölçekli değirmenlerin içerisinde oluşan öğütme koşullarının farklılık göstermesidir. Aynı kritik hızda çalışsalar dahi endüstriyel ölçekli değirmenlerin dakika başına devir sayılarının pilot ölçekli değirmenlere göre farklı olmasından dolayı ürünün tane boyu dağılımı değişiklik gösterebilmektedir [18].

Matematiksel modellere dayalı simülasyon programlarının kullanılmaya başlanması ve daha pratik laboratuvar testlerinin geliştirilmesi sonucunda pilot ölçekli testler günümüzde geçerliliğini kaybetmiştir.

5. OTOJEN DEĞİRMEN MODELLERİ

Otojen değirmenlerin matematiksel olarak modellenmesi ile ilgili pek çok yaklaşım bulunmaktadır. Geliştirilen modellerden bazıları şunlardır; [23], [24], [25], [26], [27], [28], [29], [30], [31].

Austin ve arkadaşları tarafından geliştirilen modelde kinetik model yaklaşımı kullanılmıştır. Bu modelde, değirmen içerisindeki tanelerin ortalama durma zamanı kullanılmıştır.

Bu çalışmada da kullanılan Leung modeli kabul görmüş otojen değirmen modellerinden birisidir. Leung modelinde, bilyalı değirmenler için geliştirilen mükemmel karışım modeli ile birlikte ampirik malzeme transferi (mass transfer) ilişkisi bir arada kullanılmıştır. Kırılmanın daha iyi anlaşılabilmesi için malzemeye özgü darbe ve aşınma karakteristiğini tanımlayan birleştirilmiş kırılma dağılımı fonksiyonu da geliştirilmiştir.

Bu çalışmada kullanılan ikinci model değişken hızlar modelidir. Morrell ve Morrison tarafından geliştirilen modelde pilot ve endüstriyel ölçekli test sonuçları değerlendirilerek öğütme hızıyla değirmenin çalışma koşulları arasında korelasyon kurulmuştur. Ayrıca değirmen besleme boyutu ile malzemeye özgü kırılma karakteristiği arasındaki ilişki tanımlanmıştır. Günümüzde de kullanılan tahmin kapasitesi en yüksek modellerden bir tanesidir.

5.1 Austin Yaklaşımı

Austin yaklaşımında, değirmen karıştırıcı olarak nitelendirilmektedir. Değirmen çıkışında bulunan ızgara ise sınıflandırıcı görevi üstlenmektedir. Izgara, iri boydaki tanelerin değirmenden çıkmasını engellemektedir. Durma zamanının kullanılması bazı sistemlerde anlamsız kalmaktadır. Çünkü durma zamanı kırılma hızı ile ilişkilendirilmiştir. Bu durumda, beslemenin ızgaradan geçebilecek tane boyuna ulaşması gerekmektedir. Bu yüzden hakim olan etkenler besleme tane boyu dağılımı ve malzemenin özgül kırılma hızıdır.

Değirmen içerisindeki tüm tane boyu aralıklarındaki malzemenin kırılmasının tanımlanması, kırılma dağılımının Eşitlik 5.1’ de birikimli olarak ifade edilmesi ile anlaşılmaktadır.

$$B_{ij} = \sum_{k=n}^i b_{kj} \quad \text{Eşitlik 5.1}$$

Burada Bij matrisi, j tane boyu aralığındaki tanelerin kırıldıktan sonra i tane boyu aralığına geçen birikimli yüzdesini ifade etmektedir.

Otojen değirmen modellerinde kullanılan temel madde denkliği formülü Eşitlik 5.2’de verilmiştir.

$$p_i = f_i - s_i * w_i + \sum_{\substack{j=1 \\ i>1}}^{i-1} b_{ij} * s_j * w_j \quad \text{Eşitlik 5.2}$$

Austin tarafından geliştirilen otojen değirmen modelinde yukarıdaki eşitliğe ek olarak durma zamanı da eklenmiştir. Austin tarafından geliştirilen yaklaşıma ait düzenleme Eşitlik 5.3’de verilmiştir.

$$p_i = f_i + \tau \left(\sum_{\substack{j=1 \\ i>1}}^{i-1} b_{ij} * s_j * w_j \right) - \tau * s_i * w_i \quad \text{Eşitlik 5.3}$$

f_i: Beslemedeki i boyu aralığındaki tanelerin ağırlık fraksiyonu

s_i: i boyu aralığındaki tanelerin özgül kırılma hızı

w_i: Değirmen içinde i boyu aralığında bulunan tanelerin ağırlık fraksiyonu

b_{ij}: j boylu tanelerin kırıldıktan sonra i boyundaki tanelere oranı

p_i: üründe i tane boyu aralığında bulunan tanelerin ağırlık fraksiyonu

τ: Ortalama durma zamanı $\tau = \frac{W}{F}$

W: Değirmen içerisindeki malzeme miktarı

F: Değirmen beslemesinin miktarı

Otojen ve yarı otojen değirmenlerin çıkışında bulunan ızgaralar aynı zamanda sınıflandırıcı görevi görmektedir. Bundan dolayı, ızgara açıklığından büyük boyuta sahip taneler değirmen içerisinde kalmaktadır. Izgara açıklığından geçebilen taneler ise sınıflandırma işleminden sonra değirmeni terk etmektedir. Izgaradan geri dönen malzeme miktarı ile birlikte düşünüldüğünde değirmen içerisindeki yük şu şekilde açıklanmaktadır;

Değirmen içerisine geri dönen devreden yük miktarı C_s olarak gösterilmiştir. Değirmen içerisindeki devreden yük miktarı Eşitlik 5.4'de verilmiştir.

$$F_s = (1 + C_s) * F \quad \text{Eşitlik 5.4}$$

Buradan yola çıkarak değirmen içerisindeki madde denklığı Eşitlik 5.5'te şu şekilde yazılmaktadır.

$$(1 + C_s) * F * f_i = F * f_{si} + F * (1 + C_s) * w_i * c_i \quad \text{Eşitlik 5.5}$$

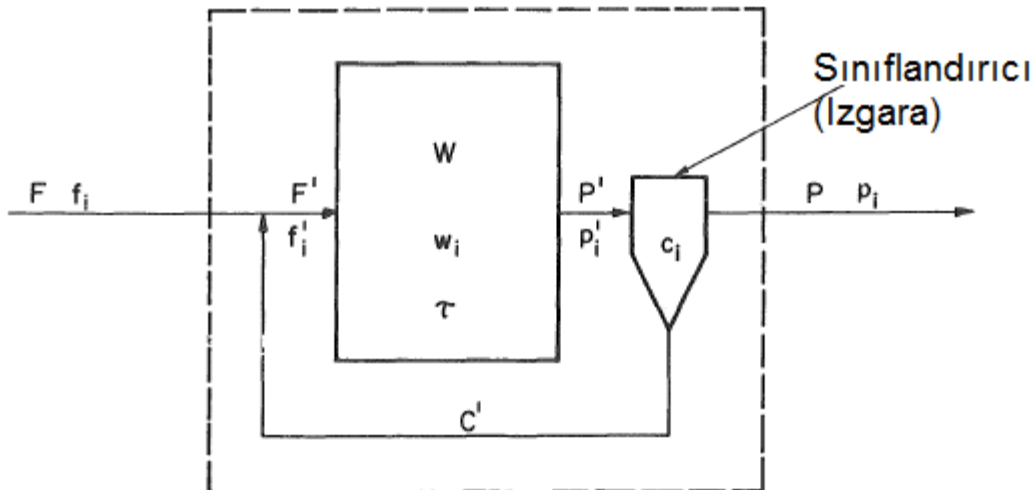
c_i : Değirmene geri dönen i boylu malzemenin fraksiyonu

w_i : p_{si} olduğundan,

$$C_s = \frac{\sum_i F * (1 + C_s) * w_i * c_i}{\sum_i F * (1 + C_s) * w_i * (1 - c_i)} = \frac{\sum_i w_i * c_i}{\sum_i w_i * (1 - c_i)} \quad \text{Eşitlik 5.6}$$

Veya,

$$1 + C_s = \frac{1}{\sum_i w_i (1 - c_i)} \quad \text{Eşitlik 5.7}$$



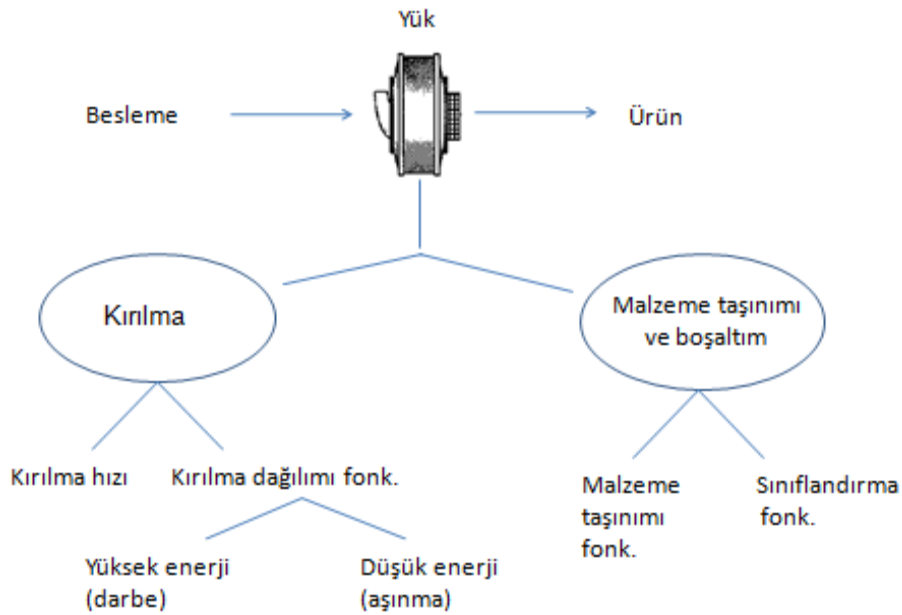
Şekil 5.1 Austin yaklaşımının şematik gösterimi

5.2 JKMRC Tarafından Geliştirilen Otojen Değirmen Modelleri

JKMRC (Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre) uzun yıllardan beri otojen ve yarı otojen değirmenlerinin matematiksel modelleri üzerinde çalışmaktadır. Modellerin geliştirilmesi yaklaşık olarak 150 farklı pilot ölçekli testlerin sonuçlarına ve endüstriyel tesis verilerine dayandırılmaktadır. İlk geliştirilen Leung modeli ile otojen ve yarı otojen değirmen modelleme çalışmalarında önemli mesafe kat edilmiştir. Daha sonra geliştirilen değişken hızlar modelinde ise değirmenlere ait operasyonel parametreler de kullanılarak modelin tahmin kapasitesi arttırılmıştır.

Otojen öğütme ortamı içerisinde temel olarak iki olay meydana gelmektedir;

- Boyut küçültme
 - Kırılma hızı fonksiyonu
 - Kırılma dağılımı fonksiyonu
- Boyutu küçültülmüş malzemenin ortamdaki uzaklaştırılması
 - Malzeme taşınımı fonksiyonu
 - Sınıflandırma fonksiyonu

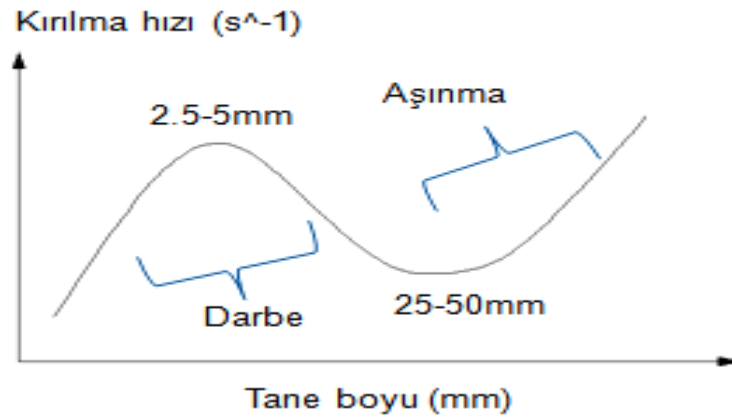


Şekil 5.2 JKMRC tarafından otojen ve yarı otojen değirmenler için geliştirilen model yapısı

5.2.1 Kırılma Hızı Fonksiyonu

Otojen ve yarı otojen değirmen uygulamalarında besleme ve ürünün tane boyu dağılımı ile kırılma dağılımı fonksiyonu verildiğinde kırılma hızı geri hesaplanabilmektedir. Bu dağılım büküm (cubic spline) fonksiyonu olarak elde edilmektedir [32]. Kırılma hızı fonksiyonu tipik olarak beş adet düğüm noktası ile ifade edilmektedir. Bu düğüm noktaları sırasıyla 0.25, 4, 16, 44 ve 128 mm'dir.

Kırılma hızı fonksiyonu tane boyu ile ilişkilidir. Öğütme işleminde bütün tanelerin kırılma olasılığı mevcuttur. Otojen değirmenlerde belli boy aralıklarında kırılma hızı artarken belli boy aralıklarında kırılma hızı azalmaktadır. Otojen değirmenlerde kırılma hızı ile tane boyu arasındaki ilişki Şekil 5.3'de verilmiştir.



Şekil 5.3 Otojen ve yarı otojen değirmenler için kırılma hızı fonksiyonu

2.5 – 5 mm tane boyu aralığında kırılma hızının en yüksek değerinde olduğu görülmektedir. Bu aralıkta darbe mekanizmasına bağlı olarak kırılma hızı yüksek olmaktadır. 2.5 mm'den daha ince tanelerde kırılma hızının düştüğü görülmektedir. Bu tane boyu aralığında kırılma hızının düşmesi şu şekilde açıklanmaktadır; değirmen içerisinde ince tanelerin miktarının artması ile birlikte kırılma hızı düşmektedir. Diğer bir sebebi ise ince tanelerin su ile taşınarak öğütme ortamından uzaklaşmasıdır. Kırılma hızının tekrar düşmeye başladığı aralık 25 - 50 mm tane boyu aralığına denk gelmektedir. Bu aralıkta bulunan taneler kritik boylu taneler olarak adlandırılmaktadır. Bu taneler değirmen içerisindeki ince tanelerin öğütülmesine katkıda bulunmaz iken aşınma ve çentiklenme sonucunda ufalanma işlemine de maruz kalmamaktadır. Bu yüzden bu tanelerin değirmenden uzaklaştırılması gerekmektedir.

5.2.2 Kırılma Dağılımı Fonksiyonu

Kırılma dağılımı fonksiyonu malzemenin kırıldıktan sonra alt boylara nasıl dağılacığını tanımlamaktadır. Otojen ve yarı otojen değirmen uygulamalarında kırılma olayı yüksek enerjili ve düşük enerjili olarak iki şekilde gerçekleşmektedir. JKMRC tarafından yapılan laboratuvar uygulamaları sonucunda iki farklı şekilde kırılan malzemenin karakterizasyonu yapılabilmektedir. Daha önceden yüksek enerjili kırılmayı tanımlamak için ikiz sarkaç yöntemi kullanılmıştır [33]. Fakat son yıllarda JKMRC tarafından yüksek enerjili kırılmayı tanımlamak için ağırlık düşürme testi kullanılmaktadır. Düşük enerjili kırılmayı tanımlamak için ise aşındırma testi kullanılmaktadır [30]. Ağırlık düşürme testinden elde edilen A ve b parametreleri ile aşındırma testi sonucunda elde edilen t_a değeri modelleme çalışmalarında kullanılmaktadır.

Aşındırma testi sonucunda t_a değerinin belirlenebilmesi için standart bir test yöntemi geliştirilmiştir. – 55 + 38 mm fraksiyonundaki 3 kilogram malzeme 53 devir/dakika dönüş hızında on dakika boyunca öğütülmektedir. Öğütme değirmeni 300 mm x 300 mm boyutlarında olup içerisinde kaldırıcı plakalar bulunmaktadır. Öğütme sonucunda elde edilen malzeme $\sqrt{2}$ elek serisinden elenmektedir. Tane boyu aralığının geometrik ortalamasınının 1/10'undan geçen değer 1/10'u t_a değerini göstermektedir. Eğer t_a değeri 0.2 den küçükse kayacın çok sert olduğunu 2'den büyük ise yumuşak olduğunu belirtmektedir.

5.2.3 Boşaltma Hızı Fonksiyonu

Boşaltma hızı fonksiyonu iki şekilde tanımlanmaktadır;

- Malzemenin ızgaraya taşınması
- Izgarada gerçekleşen sınıflandırma

Boşaltma hızı aşağıdaki eşitlik kullanılarak modellenmiştir;

$$d_i = d_{ci}$$

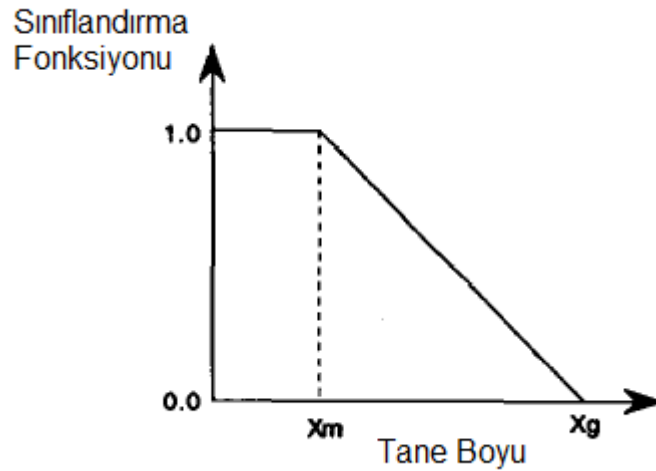
Eşitlik 5.8

d_i : i tane boyundaki malzemenin boşaltma hızı

c_i : i tane boyundaki malzemenin sınıflandırma fonksiyonu

d : maksimum boşaltma hızı

Maksimum boşaltma hızı (d) model tarafından tekrarlı olarak belirlenmektedir. Bu tanımlamada, değirmenden çıkan palpın hacimsel akış miktarı ile değirmen içerisindeki palp miktarı arasında ampirik bir ilişki bulunmaktadır. Sınıflandırma fonksiyonu olan c_i basit sınıflandırıcı modelini temel almaktadır. X_g değeri efektif ızgara açıklığını simgelemektedir. X_m değeri ise sınıflandırmaya maruz kalmadan su ile taşınabilen tane boyunu temsil etmektedir.



Şekil 5.4 Boşaltma hızı fonksiyonu

5.3 Leung Modeli

Otojen ve yarı otojen değirmenler için ilk üretilen ve kullanılabilir tahminler yapabilen model Leung modelidir [30]. Bu model, laboratuvar ölçekli testler kullanılmadan cevhere özgü belirlenmiş kırılma dağılımı kullanılarak geliştirilmiştir. Leung modelinde mükemmel karışım modeli ile birlikte ampirik malzeme transferi (mass transfer) ilişkisi de kullanılmıştır. Oldukça basit bir model olmasına rağmen otojen ve yarı otojen değirmen boyutlandırmalarında başarılı uygulamaları mevcuttur. Pilot ölçekli test sonuçlarına bağlı ölçek büyütme çalışmalarında kullanılmaktadır. Morrell tarafından geliştirilen güç modeli 1992 yılında Leung modeline adapte edilmiştir.

Leung modelinin genel yapısı şu şekildedir;

- Yüksek enerji gerektiren darbe kırılması, ikiz sarkaç veya tek tane kırma testlerinden sağlanmaktadır.
- Düşük enerji gerektiren aşınma mekanizması, laboratuvarda yapılan aşınma testleri sonucunda elde edilmektedir.

Her iki durum için elde edilen veriler temsili örneklerden sağlanmadıysa operasyonel veriler ile uyumsuzluk göstermesi muhtemeldir. Yüksek enerjili kırılma dağılımı fonksiyonu değirmen içinde oluşan ortalama enerjiden hesaplanmaktadır. Bu da değirmenin çapı ile ilişkilidir.

Ürünün değirmen içerisinden boşalma hızı ızgara tipi, ızgara açıklığı ve ızgarada gerçekleşen sınıflandırma ile belirlenmektedir. Maksimum ızgara açıklığının belirlenmesi için ızgara açıklığından çıkan malzeme oranının değirmen içerisindeki orana eşit olması gerekmektedir. Bunun için maksimum ızgara açıklığı model tarafından yapılan iterasyon ile belirlenmektedir. Böylece besleme hızı basit bir güç fonksiyonu ile değirmen hacmi cinsinden belirtilmektedir.

Modelin ölçek büyütme kapasitesi, 9 metre ve daha büyük çapa sahip değirmenlerin tasarımında kısıtlı kalmaktadır. Değirmen hızı, katı içeriği, ızgara açık alanı, astar karakteristiği ve palp reolojisi gibi operasyonel parametreler bu modelde çok iyi açıklanamamıştır. Leung modeli % 60 - 70 katı içeriğinde ve kritik hızın yaklaşık % 70'inde çalışan değirmenler ile yapılan uygulamalarda başarılı sonuçlar üretmektedir.

5.4 Değişken Hızlar Modeli

Morrell ve Morrison tarafından geliştirilen modelde pilot ve endüstriyel ölçekli test sonuçları değerlendirilerek öğütme hızıyla değirmenin çalışma koşulları arasında korelasyon kurulmuştur. Ayrıca değirmen besleme tane boyu dağılımı ile malzemeye özgü kırılma karakteristiği de ilişkilendirilmiştir. Bu yöntemin pilot ölçekli test verilerine ve endüstriyel tesis verilerine dayanmasından dolayı tahmin kapasitesi diğer modellere göre daha yüksektir.

Otojen ve yarı otojen değirmen modellemelerinde laboratuvar ölçekli test sonuçları temel alınırken pilot tesis çalışmaları da göz önünde bulundurulmaktadır. Laboratuvar ölçekli olarak elde edilen verilerin kullanılmasından dolayı pilot ölçekli testlerdeki zaman sarfiyatı ve gereksiz maliyetler azaltılmıştır. Pilot tesis verileri kullanılmadan gerçekleştirilen tasarımlarda ve çapı 9 metreden daha yüksek değirmenlerin boyutlandırılmasında meydana gelen riskler bu model sayesinde oldukça azaltılmıştır.

Bu modelde, otojen ve yarı otojen değirmenler için geçerli olan operasyonel parametreler de değerlendirilmiştir. Operasyonel parametrelerin kırılma hızı fonksiyonu üzerindeki etkileri incelenmiştir. Bu parametreler; değirmen hızının etkisi, yarı otojen değirmenler için kullanılan bilya boyutu, şarjın hacmi ve besleme tane boyu dağılımının etkisi olarak özetlenebilir.

5.5 Bilyalı Değirmenler için Mükemmel Karışım Modeli

Öğütme devresinde bulunan çakıllı değirmenin modelleme çalışmalarında bilyalı değirmenler için geliştirilen mükemmel karışım modeli tercih edilmiştir [34]. Kütle balans modelinden bağımsız olarak geliştirilmesine rağmen bu model ile arasında bir takım benzerlikler bulunmaktadır. Kütle balans modelinde karıştırma sonucu oluşan aksaklıklar mükemmel karışım modelinin geliştirilmesi ile ortadan kaldırılmıştır.

Mükemmel karışım modeli, kinetik model ve matris modelinin birleşiminden meydana gelmektedir. Değirmeni mükemmel karışım sağlayan tek bir birim olarak ifade etmektedir. Sürekli besleme koşulunda çalışan bir değirmene giren ve çıkan her fraksiyon için gerçekleşen kırılma olayının dengede olduğunu savunmaktadır.

Whiten terminolojisine göre değirmen içerisinde gerçekleşen boyut küçültme işlemleri her bir fraksiyondaki malzeme için kırılma hızı (r_i) ve taşınma hızı (d_i) olarak gösterilmektedir. Kırılma olayının gerçekleşmesi ile beraber kırılma dağılım fonksiyonu (a_{ij}) kullanılmaktadır. Kırılma dağılım fonksiyonu, j tane boyundaki malzemenin gerçekleşen kırılmanın ardından i tane boyuna ne şekilde dağılacığını belirlemektedir.

$$p_i = d_i * s_i \text{ veya } s_i = p_i/d_i \quad \text{Eşitlik 5.9}$$

Değirmen içerisinde bulunan her bir tane boyu için kütle denklığı şu şekilde yazılmaktadır;

$$f_i + \sum_{j=1}^i \left[\frac{a_{ij} * r_j * p_j}{d_j} \right] = p_i + \frac{r_i * p_i}{d_i} \quad \text{Eşitlik 5.10}$$

f_i : Beslemedeki i tane boyundaki malzeme miktarı

a_{ij} : j boyundaki malzemenin kırılması sonucu oluşan i tane boyundaki malzeme miktarı

r_i : i tane boyundaki malzemenin kırılma hızı

s_i : Değirmen içindeki i tane boyundaki malzeme miktarı

d_i : i tane boyundaki malzemenin boşalma hızı

Değirmen beslemesinin ve ürünün tane boyu dağılımları biliniyorsa kırılma dağılımı fonksiyonu kullanılarak her bir tane boyu için r_i/d_i oranı hesaplanabilmektedir. Hesaplanan bu değerler büküm fonksiyonu olarak ifade edilebilmektedir.

5.6 Tek Bileşenli Verimlilik Eğrisi

Bu çalışmada, hidrosiklon modelleme çalışmaları için JK Simmet yazılımı içinde bulunan tek bileşenli verimlilik eğrisi kullanılmıştır. Bu model herhangi bir sınıflandırıcının performansını belirlemek için de kullanılabilir. Model tarafından yapılan tahminlerde, düzeltilmiş tane boyu (d_{50c}) ve ince ürüne giden su miktarı sabit tutularak çözüm bulunmaktadır. Farklı sınıflandırıcılar için kullanılabilirdiğinden model parametrelerinin dikkatli bir şekilde kullanılması önem arz etmektedir.

Verimlilik eğrisi Eşitlik 5.11'de şu şekilde tanımlanmıştır;

$$E_0 * \left(\frac{d}{d_{50c}} \right) = \frac{C * \left(1 + \beta * \beta' * \frac{d}{d_{50c}} \right) * e^{(\alpha-1)}}{\left(e^{\left(\alpha * \beta' * \frac{d}{d_{50c}} \right)} + e^{(\alpha)-2} \right)} \quad \text{Eşitlik 5.11}$$

β değeri 0, ve β' değeri 1 olarak alındığında eşitlik şu şekilde olmaktadır.

$$E_0 * \left(\frac{d}{d_{50c}} \right) = \frac{C * e^{(\alpha-1)}}{\left(e^{\left(\alpha * \frac{d}{d_{50c}} \right)} + e^{(\alpha)-2} \right)} \quad \text{Eşitlik 5.12}$$

Modelde kullanılan parametrelerin açıklaması şu şekildedir;

α : Malzemeye özgü eğrinin eğimini tanımlayan parametre

β : İncelerin irilerle birlikte gelmesiyle oluşan balık oltası etkisini tanımlayan parametre

β' : Düzenleme parametresi

C: Sınıflandırma işleminde kaçak miktarını yüzde olarak tanımlayan parametre

$E_0(d)$: Besleme içerisindeki üst akıma gidecek malzeme miktarı

d: Ortalama tane boyu (mm)

d_{50c} : Santrifüj etkisi ile üst akıma veya alt akıma gitmek için eşit şansa sahip tane boyu (mm)

Şekil parametresi olan β , eğrinin ilk kısmını tanımlamaktadır. α parametresi ise artan tane boyu değerlerinde eğrinin eğimini belirlemektedir ($d \sim d_{50c}$). β ve α değerlerinin her ikisinde besleme katısı verildiğinde normal olarak sabit değer olmaktadır. C ve d_{50c} değerleri ise hidrosiklonların geometrik parametrelerine ve operasyonel koşullarına göre değişiklik gösterebilmektedir. β' parametresi, verilen α ve β değerlerine göre aşağıda koşul altında model tarafından iterasyon ile belirlenmektedir;

$$E_0 * (1) = C/2 \quad \text{Eşitlik 5.13}$$

α parametresi için geçerli olan aralık 0.5 ile 4 arasında değişmektedir. Verilen değer büyüdükçe ayırım keskinliği artmaktadır. Eğer üst değer sınırı aşılrırsa elde edilen sonuçlar gerçekçiliğini yitirmektedir. Optimum bir sınıflandırma işlemleri için tercih edilebilecek değer 2 civarındadır. β değeri, gerçek verimlilik eğrisinin negatif kısmını tanımlamaktadır. β değeri için kullanılan tipik değer 0'dır. İnce tane boylarındaki sınıflandırma işlemleri için 0.01 ile 0.5 arasında değişen değerler verilebilmektedir. Fakat önerilen bir yaklaşım değildir.

Tek bileşenli verimlilik eğrisi ile yapılan modelleme çalışmalarında herhangi bir hidrosiklon boyutlandırması veya ölçek büyütme yapılması söz konusu değildir.

6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Deneysel çalışmalarda kullanılan numuneler, Eti Bakır A.Ş'ye ait izabe tesisi içerisinde bulunan bakır cürufu öğütme tesisinden temin edilmiştir. Çalışmalar tesis örnekleme ve laboratuvar çalışmaları olmak üzere iki aşamada yürütülmüştür.

İzabe tesisinde bakır konsantresinden bakır metali üretimi pirometalürjik yöntemler ile gerçekleştirilmektedir. Blister bakır (% 99.3) üretimi iki aşamada mümkün olmaktadır. İlk aşamada, flaş izabe sonucunda %50 - 60 bakır içeriğine sahip eriyik haldeki mat ile % 1.5 – 3 arasında bakır içeren cüruf elde edilmektedir. Cüruf bünyesinde, ağırlıklı olarak demir oksit ve silikat bileşiklerini bulundurmaktadır. Eriyik haldeki malzeme mat Pierce Smith konverterinde iki aşamalı olarak oksidasyona maruz bırakılarak blister bakır üretimi gerçekleştirilmektedir. Konverter aşamasından elde edilen cüruf ise % 3 – 5 aralığında bakır içermektedir.

Her iki aşama sonucunda elde edilen cüruf, 30 - 35 cm kalınlığında yatak oluşturacak şekilde dökülerek açık havada evleklerde soğumaya bırakılmaktadır. Soğutulan cüruf otojen öğütme devresinde öğütüldükten sonra flotasyonla zenginleştirilmektedir. Elde edilen flotasyon konsantresi tekrar izabe tesisinde değerlendirilmektedir.

Deneysel çalışmalar kapsamında, otojen öğütme tesisinin kapasitesinin artırılması için modelleme ve simülasyon çalışmaları yürütülmüştür. Otojen öğütme devresi ve flotasyon devresinden alınan numuneler ile yapılan çalışmalar sonucunda akışlara ait tane boyu dağılımı, % katı içerikleri ve hacimsel akış değerleri belirlenmiştir. Elde edilen veriler ile devrenin madde denklığı oluşturulmuştur. Madde denklığı çalışmalarının sonuçlarına göre mevcut devrenin performansı belirlenmiştir. İkinci dönemde de gerçekleştirilen numune alma çalışmaları sonucunda tesisin performansı bir kez daha incelenerek farklı iki dönemin performansları üzerinden değerlendirme yapılmıştır.

Madde denklığı çalışmalarının ardından modelleme çalışmaları yürütülmüştür. Modelleme için gerekli değirmenlere ait geometrik parametreler ve numune alınan koşuldaki güç tüketimleri kayıt altına alınmıştır. Otojen değirmen modelleri için gerekli A ve b parametreleri JK standartlarına göre yapılan ağırlık düşürme testi sonucunda bulunmuştur. Aşınma indeksi olan t_a parametresi ise aşındırma testi sonucunda elde edilmiştir.

6.1 Kırma ve Harmanlama Devresi

Evleklerde soğutulan cüruf lastikli yükleyici vasıtasıyla çeneli kırıcı üzerinde bulunan 400 mm'lik ızgaranın üzerine boşaltılmaktadır. Çeneli kırıcı çıkışı herhangi bir sınıflandırma yapılmadan doğrudan stoklanmaktadır. Otojen değirmene apron besleyici ve bant konveyör aracılığıyla stoktan besleme yapılmaktadır. Bazı durumlarda eleme yapılarak - 40 mm tane boylu malzeme ayrılıp evlek tabanına yatak malzemesi olarak serilmektedir.

6.2 Öğütme Devresi

Öğütme devresinde otojen ve çakıllı olmak üzere iki adet değirmen bulunmaktadır. Otojen değirmenin boyutları astarsız iç çap \emptyset olarak 6.096 metredir. Otojen değirmenin boyu ise 1.829 metredir. Değirmenin motor voltajı 6300 voltdur. Kurulu motor gücü ise 750 kW'dır. Motor çalışma sistemi sabit hızlı olarak tasarlanmıştır. Kritik hızın % 75' inde çalıştırılmaktadır. Devir sayısı ise 13.1 devir/dakika'dır. Değirmen çıkışında ızgara bulunmaktadır. Otojen değirmende kauçuk tip astar tercih edilmiştir.

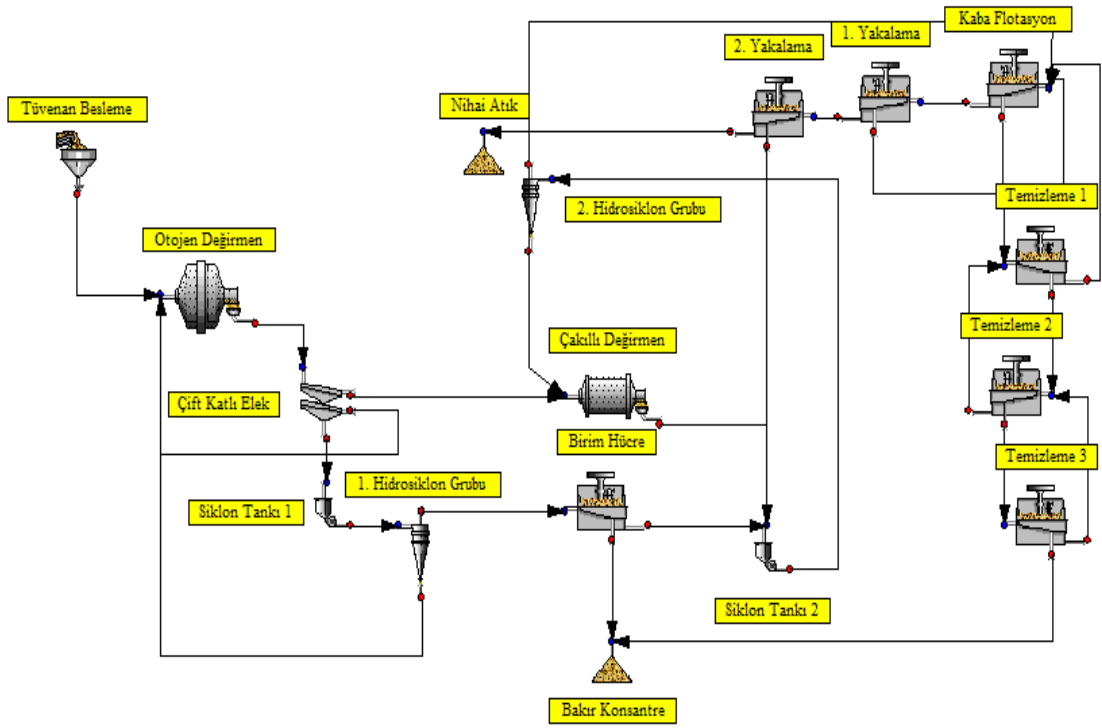
Çakıllı değirmen boyutları astarsız iç çap olarak \emptyset 3.65 x 4.60 metredir. Motor voltajı 6300 volt olup kurulu motor gücü ise 530 kW'dır. Çakıllı değirmenin de motor çalışma sistemi sabit hızlı olarak tasarlanmıştır. Devir sayısı ise 17.23 devir/dakika olarak belirlenmiştir. Değirmen çıkışında poliüretan malzemedan üretilmiş trommel elek bulunmaktadır. Çakıllı değirmende de kauçuk malzemedan yapılmış astar kullanılmaktadır.

Otojen değirmen. çıkışında bulunan 30 mm'lik ve 2 mm'lik çift katlı elek kapalı devre olarak çalıştırılmaktadır. + 30 mm tane boyuna sahip taneler çakıllı değirmene öğütücü ortam olarak beslenirken - 30 + 2 mm tane boyuna sahip taneler otojen değirmene geri döndürülmektedir. Elek altına geçen - 2 mm tane boylu malzeme birinci hidrosiklon grubunun beslemesi olmaktadır. Hidrosiklon da otojen değirmen ile kapalı devre olarak çalışmaktadır. Hidrosiklon üst akımı birim flotasyon hücresine gönderilmektedir.

Çakıllı değirmende kendi hidrosiklon grubu ile kapalı devre olarak çalıştırılmaktadır. Birim hücre atığı ve ikinci yakalama hücresinin konsantresi ikinci hidrosiklon grubunun tankına gönderilmektedir. Çakıllı değirmen çıkışı da aynı hidrosiklon tankında toplanmaktadır. Hidrosiklon alt akımı çakıllı değirmene geri dönerken üst akımı kaba flotasyon hücrelerine gönderilmektedir.

6.3 Flotasyon Devresi

Flotasyon devresi birim hücre flotasyonu ve grup hücre flotasyonu olarak iki aşamadan oluşmaktadır. Otojen değirmen ile kapalı devre olarak çalışan hidrosiklon üst akımı birim flotasyon hücresine gönderilmektedir. Bu hücrede iri boyda serbest halde bulunan bakırın kazanılması hedeflenmiştir. Grup flotasyonu kısmı ise çakıllı değirmen ile kapalı devre olarak çalışan hidrosiklon üst akımından itibaren başlamaktadır. Devrenin bu kısmında üç paralel batarya ve her bataryada on iki adet hücre bulunmaktadır. İlk iki hücre kaba flotasyon devresi, bunları takip eden üç hücre birinci süpürme aşaması, sonraki dört hücre ise ikinci süpürme aşamasıdır. Birinci süpürme aşamasının yüzeni kaba flotasyon devresinin başına dönerken İkinci süpürme aşamasının yüzeni hidrosiklon tankına gönderilerek çakıllı değirmende tekrar öğütülmektedir. İkinci süpürme devresinin atığı nihai atık olarak değerlendirilmektedir. Kaba flotasyon hücrelerinin konsantresi üç aşama temizlenmektedir. Üç aşama temizleme sonucunda elde edilen nihai bakır konsantresi birim hücre konsantresi ile birleştirilmektedir. Tikiner aşamasından sonra disk filtre kullanılarak filtrelenmektedir. Tesis akım şeması Şekil 6.1' de verilmektedir.

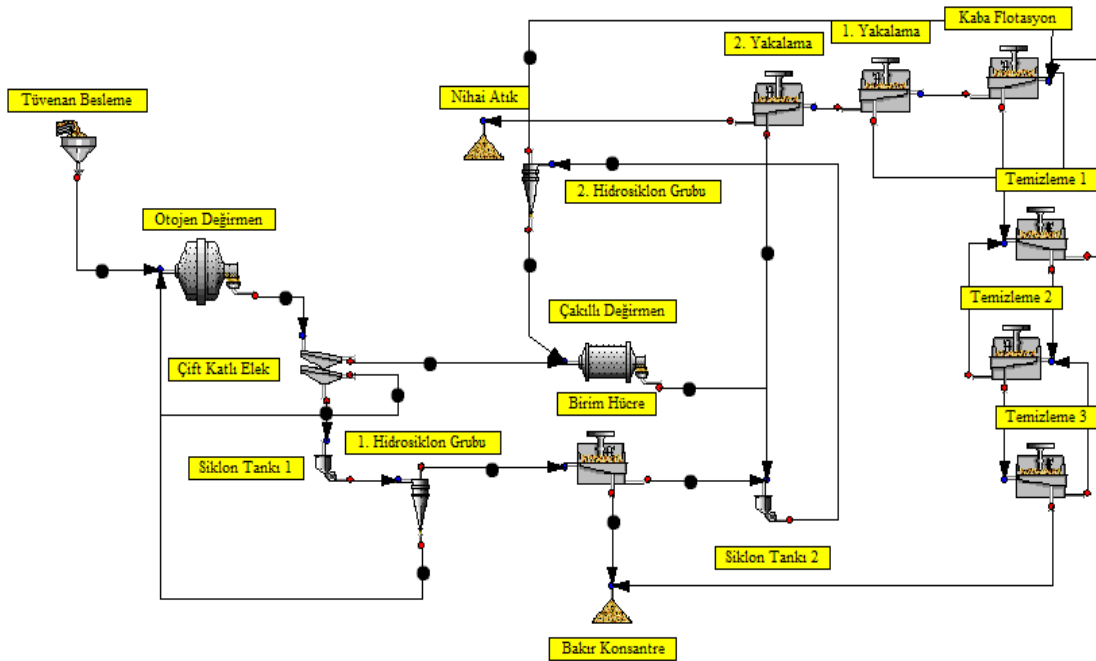


Şekil 6.1 Tesis akım şeması

6.4 Birinci Dönem Numune Alma Çalışması

Cüruf öğütme tesisinden iki farklı dönemde numune alma çalışması gerçekleştirilmiştir. Birinci dönemde devrenin tamamı örneklenerek madde denklığı ve performans değerlendirme çalışmaları yürütülmüştür. Modelleme ve simülasyon çalışmalarında bu dönemde alınan örnekler kullanılmıştır. İkinci dönemde ise birim flotasyon hücresinden başlayarak örnekleme çalışması yürütülmüştür. Çakıllı değirmen ile kapalı devre çalışan ikinci hidrosiklon grubunun performansı değerlendirilmiştir.

Birinci örnekleme döneminde, numune alma işlemine başlamadan önce tesisin, kontrol odası verileri takip edilerek kararlı durumda çalıştırılması sağlanmıştır. Numune alma işlemi bitene kadar devrede herhangi bir değişiklik yapılmamıştır. Numune alma işlemlerinde akış kesiciler kullanılarak akışın tamamının doğru bir şekilde örneklenmesi sağlanmıştır. Numune alınması için belirlenen noktalar Şekil 6.2’de gösterilmiştir.



Şekil 6.2 Birinci örnekleme dönemi için numune alma noktaları

Herhangi bir öğütme ve sınıflandırma devresinde yer alan ekipmanların verimliliği, ekipmanların etrafındaki mevcut akışların tane boyu dağılımları kullanılarak değerlendirilebilmektedir. Bu nedenle; numune alma işlemi sırasında dikkatli olunması, istatistiksel olarak yeterli miktarda numune alınması ve mümkün olan en

küçük tane boyuna kadar elenerek tane boyu dağılımlarının belirlenmesi oldukça önemlidir.

Öncelikle otojen değirmen çıkışından numune alma işlemine başlanmıştır. Numune alma işlemine elek etrafı akış kollarından devam edilmiştir. Elek etrafında örnekleme çalışması yürütülürken + 30 mm elek katından alınan malzemenin akış hızı belirlenmiştir. Daha sonra birinci hidrosiklon etrafındaki akış kollarına geçilmiştir. Birinci hidrosiklon devresinde 500 mm çapa sahip tek hidrosiklon çalışmaktadır. Her bir akış kolundan yeterli miktarda numune alındığına karar verildikten sonra birim hücre atığı, yakalama köpüğü ve çakıl değirmen çıkışından numuneler alınmıştır. Ayrıca madde denkliği çalışmalarında kullanılmak üzere yakalama konsantresinin debisi ölçülerek not edilmiştir. Son olarak ikinci hidrosiklon grubunun akış kollarından numune alınmıştır. İkinci hidrosiklon grubunda bulunan 6 adet siklondan 3 tanesinin çalıştığı gözlemlenmiştir.

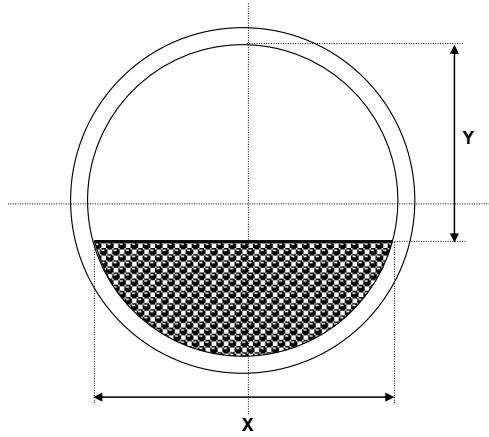
Daha sonra tüvenan besleme bandı ani bir şekilde durdurularak üzerindeki malzeme 28 metre boyunca sıyrılmıştır. Takip eden süreçte, tüvenan besleme bandından alınan numune 55 mm'ye kadar tesiste elenerek tane boyu dağılımı belirlenmiştir. Elek altındaki numune düzgün bir şekilde çuvallara doldurulduktan sonra tüm tane boyu dağılımının belirlenebilmesi için Hacettepe Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümü laboratuvarlarına gönderilmiştir.

Alınan tüm numunelerin % katı içeriklerinin belirlenebilmesi için yaş ağırlıkları herhangi bir kayıp olmaması için tesiste tartılmıştır. Tartılan akış kollarına ait numunelerin % katı içerikleri Çizelge 6.1'de verilmiştir. Birim hücre etrafı akış kolları ve ikinci süpürme devresinin köpüğüne ait bakır içerikleri de Çizelge 6.1'de gösterilmektedir. Tüvenan beslemenin nemi, alınan numuneden % 1.18 olarak belirlenmiştir. Numune alma çalışması boyunca tüvenan besleme tonajının 39.33 ton olduğu kaydedilmiştir. Numunenin yüzey nemi çıkarıldıktan sonra elde edilen tüvenan besleme tonajının 38.86 ton/saat olduğu hesaplanmıştır.

Çizelge 6.1 Akış kollarında belirlenen % katı ve bakır içerikleri

Numune Alma Noktaları	% Katı (Ağırlıkça)	% Cu
Tüvenan Besleme	98.82	
Otojen Değirmen Çıkış	77.96	
1. Hidrosiklon Besleme	62.99	
1. Hidrosiklon Alt Akımı	74.72	
1. Hidrosiklon Üst Akımı	47.11	4.02
Elek +30 mm	99.90	
Elek -30+2 mm	99.70	
Çakıllı Değirmen Çıkış	65.16	
2. Hidrosiklon Besleme	58.49	
2. Hidrosiklon Altı	73.84	
2. Hidrosiklon Üstü	40.53	
İkinci Süpürme Köpük	33.71	3.47
Birim Hücre Konsantre	11.64	35.71
Birim Hücre Atık	43.85	3.70

Matematiksel modelleme çalışmaları için gerekli olan değirmelerin detay çizimleri, ızgara açık alanının hesaplanabilmesi için gerekli çizimler, numune alma dönemindeki güç ölçümleri ve hidrosiklonlara ait ölçüler tesis yetkililerinden temin edilmiştir. Değirmen detay çizimleri incelendiğinde malzeme dolu yükseklik ve boş yükseklikler otojen ve çakıllı değirmenler için Çizelge 6.2'de verilmiştir.

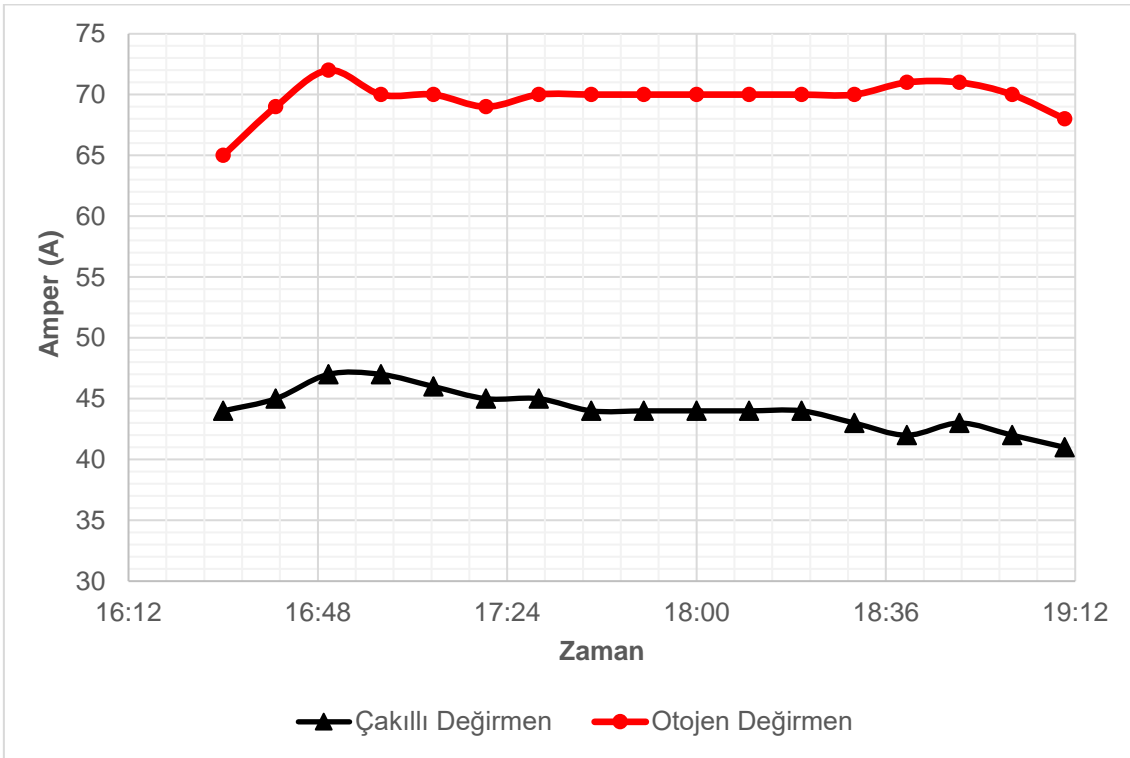


Şekil 6.3 Örnek değirmen kesiti

Çizelge 6.2 Değirmen içi ölçüleri ve doluluk oranları

	X (m)	Y (m)	Doluluk Oranı (%)
Otojen Değirmen	5.65	4.20	26.60
Çakıllı Değirmen	3.35	2.50	25.38

Numune alma çalışması boyunca kontrol odasından değirmenler tarafından çekilen akım değerleri takip edilmiştir. Alınan değerler otojen ve çakıllı değirmen için amper olarak Şekil 6.4'de verilmiştir. Kontrol odasından alınan veriler otojen değirmen için EK – 1'de, çakıllı değirmen için ise EK – 2'de verilmektedir. Güç değerlerinde ciddi boyutta bir dalgalanma olmadığı gözükmemektedir.



Şekil 6.4 Otojen ve çakıllı değirmen için numune alma çalışması boyunca kaydedilen zamana bağlı amper değerleri

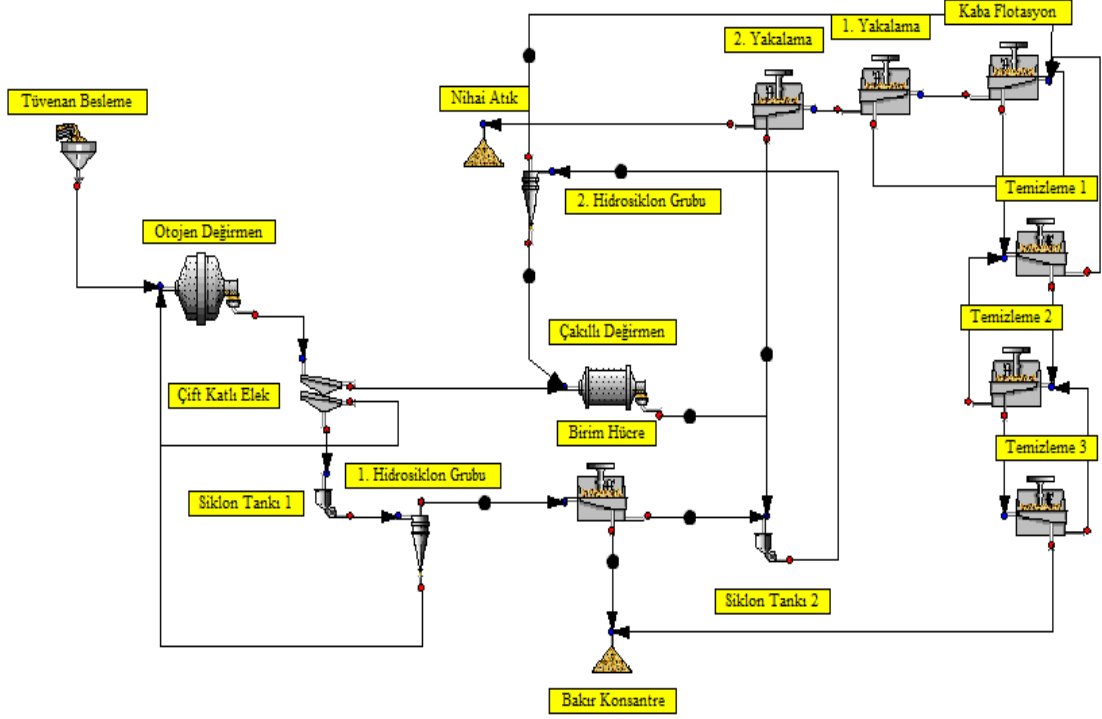
Her iki hidrosiklon devresinde de hidrosiklon basınç değerlerinin ölçülmediği not edilmiştir. Her iki devrede bulunan hidrosiklonlara ait ölçüler Çizelge 6.3'de verilmiştir.

Çizelge 6.3 Hidrosiklonlara ait ölçüler

1. Hidrosiklon Grubu	Ölçüler (mm)	2. Hidrosiklon Grubu	Ölçüler (mm)
Giriş Çapı	145	Giriş Çapı	73
Gövde Çapı	500	Gövde Çapı	250
Vortex Üst	195	Vortex	72
Vortex Alt	160	Apex Üst	76
Apex	50	Apex Alt	42

6.5 İkinci Dönem Numune Alma Çalışması

Bu dönemde gerçekleştirilen numune alma çalışmasının amacı ikinci hidrosiklon grubunun performansının belirlenmesidir. Otojen değirmenin etrafındaki akışlardan ve tüvenan beslemeden numune alınmamıştır. İkinci örnekleme dönemine ait numune alma noktaları Şekil 6.5’de verilmiştir.



Şekil 6.5 İkinci örnekleme dönemi için numune alma noktaları

Numune alma çalışmalarına başlamadan önce tesisin kararlı durumda çalıştırılması sağlanmıştır. Numune alma çalışması boyunca devrede herhangi bir değişiklik yapılmamıştır. Numune alma işlemi sırasında tüvenan besleme tonajı 31 ton/saat değerinde sabit tutulmuştur. Numune alma işlemlerinde, akışın tamamının doğru bir şekilde örneklenebilmesi için akış kesiciler kullanılmıştır.

Numune alma işlemine ilk olarak birinci hidrosiklon üst akımından başlanmıştır. Daha sonra birim hücre konsantresi ve atığından numune alınmıştır. Madde denliği çalışmalarında kullanılmak üzere ikinci süpürme devresine ait konsantre akışının debisi ölçülmüştür. Debi numunesi olarak alınan örnek kimyasal analiz ve tane boyu dağılımı için kullanılmıştır. Çakıllı değirmen çıkışından da numune alınarak ikinci hidrosiklon etrafı örnekleme çalışmasına geçilmiştir. İkinci hidrosiklon devresinde altı adet hidrosiklondan üç tanesi çalışmaktadır. İkinci hidrosiklon alt akımı ve üst akımından numune alındıktan sonra yedek hidrosiklonlardan bir tanesinin alt akım

çıkışı kapatılarak beslemenin üst akımdan taşması sağlanmıştır. Böylece siklon besleme numunesi alınmıştır. Yeterli miktarda numune alındığına karar verildikten sonra numune alma işlemi sonlandırılmıştır.

Alınan numunelerde herhangi bir kayıp söz konusu olmaması için yaş ağırlıkları tesiste tartılmıştır. Numuneler süzöldükten sonra paketlenerek Hacettepe Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümü laboratuvarlarına gönderilmiştir. Birim hücre etrafındaki akış kollarına ait numuneler ve ikinci süpürme hücresine ait konsantre numunesi tesiste filtrelenip kurutularak kimyasal analize tabi tutulmuştur. Kimyasal analiz sonucunda bakır içerikleri belirlenmiştir. Bakır tenöründen yola çıkarak birim hücre etrafında madde dengeli kurulmuştur ve birim hücre atığının tonaj (ton/saat) değeri hesaplanmıştır. İkinci numune alma dönemine ait akışların % katı içerikleri ve bakır tenörü değerleri Çizelge 6.4'te verilmiştir.

Çizelge 6.4 İkinci numune alma döneminde akış kollarındaki % katı içerikleri ve bakır tenörü değerleri

Numune Alma Noktaları	% Katı (Ağırlıkça)	% Cu
1. Hidrosiklon Üst Akımı	42.68	4.36
Çakıllı Değirmen Çıkış	70.97	
2. Hidrosiklon Besleme	56.63	
2. Hidrosiklon Altı	72.17	
2. Hidrosiklon Üstü	40.60	
Birim Hücre Konsantre	8.86	48.00
Birim Hücre Atık	41.03	3.44
İkinci Yakalama Köpük	38.43	1.80

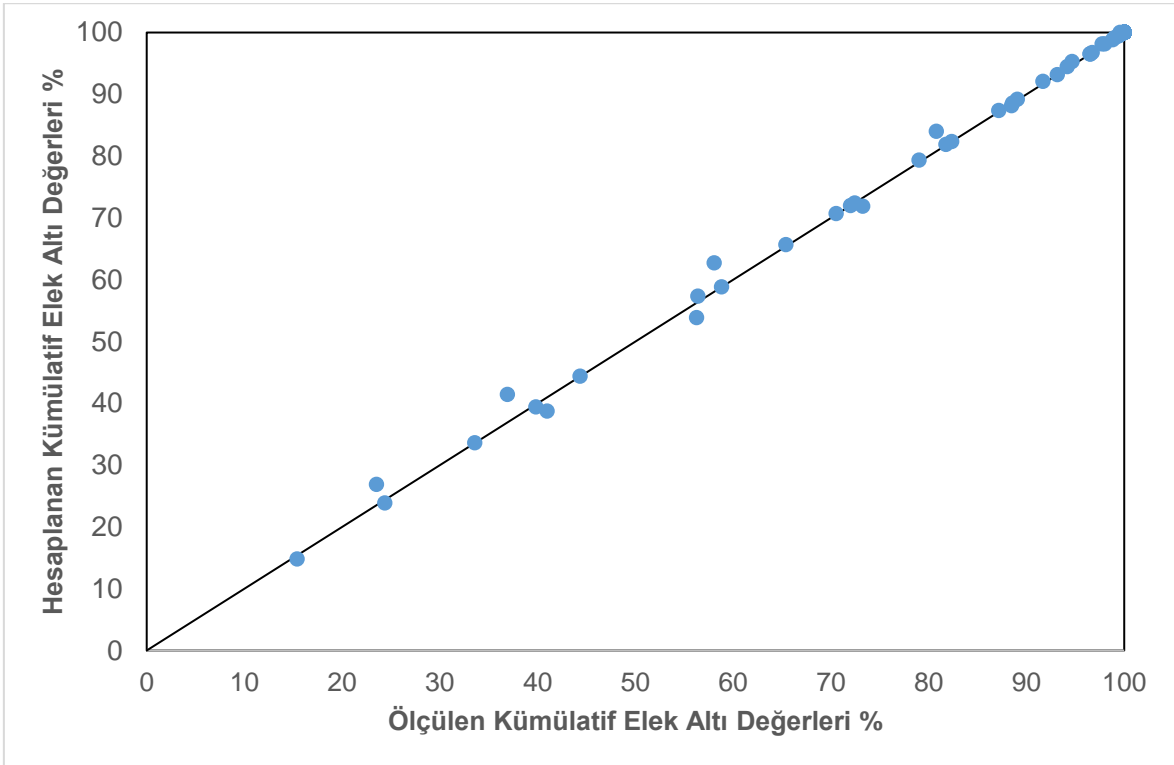
Hacettepe Üniversitesi Maden Mühendisliği bölümü laboratuvarlarına eksiksiz şekilde ulaştırılan numuneler kurutularak tane boyu analizi için hazırlanmıştır. Tüm numuneler 0.150 mm'ye kadar kuru elendikten sonra yarılanarak 0.038 mm değerine kadar yaş elemeye tabi tutulmuştur. Daha sonra ikinci hidrosiklon grubunun performansının belirlenmesi için alt boylara inilmesine ihtiyaç duyulmuştur. Bundan dolayı 0.150 mm'ye kadar kuru elendikten sonra yarılanan numunelerin lazer difraksiyon yöntemi ile tane boyu dağılımı belirlenmiştir. Numunelerin tane boyu dağılımı 0.0018 mm değerine kadar belirlenmiştir.

6.6 Madde Denkliği alışmaları

Tüm akış kollarına ait % katı içerikleri ve tane boyu dağılımları belirlendikten sonra JKSimMet v6.01 yazılımı kullanılarak madde denkliği çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Madde denkliği çalışmaları sonucunda her bir akış koluna ait katı tonajları, % katı içerikleri, tane boyu dağılımları ve hacimsel akış miktarları belirlenmiştir. Madde denkliği yazılımları, numune alma ve deneysel çalışmalar esnasında gerçekleşen kaçınılmaz hataların ölçümlere yansıttığı sapmaları istatistiksel olarak düzelterek verilerin hatalardan arındırılmasına yönelik kullanılan önemli bir araçtır. Ekipman modellerinin doğru oluşturulması ve güvenilir simülasyon çalışmalarının gerçekleştirilmesi için veriler üzerinde madde denkliği çalışmalarının yapılması gerekmektedir.

6.6.1 Birinci Dönem Numune Alma alışmaları Sonucunda Oluşturulan Madde Denkliği

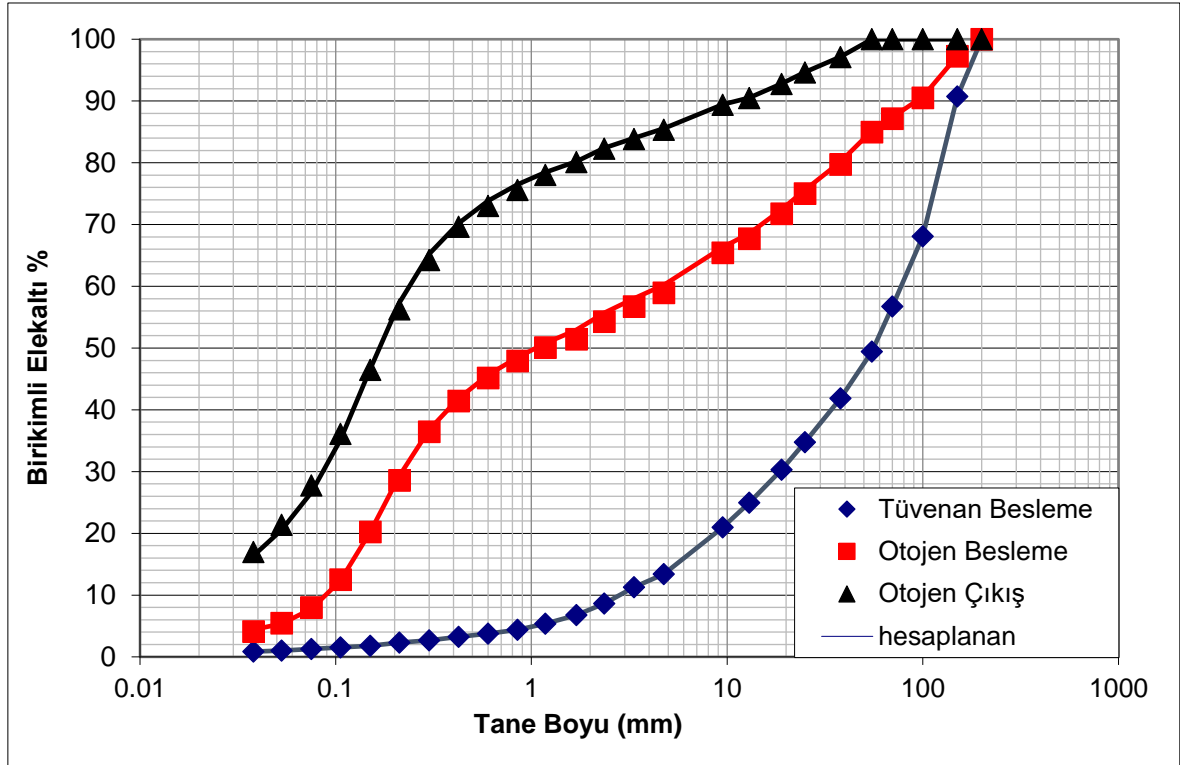
Madde denkliği çalışmaları sonucunda ölçülen ve hesaplanan verilerin büyük oranda uyum içinde olduğu şekil 6.6'da görölmektedir.



Şekil 6.6 Birinci dönem numune alma çalışması sonucunda ölçülen ve hesaplanan tane boyu dağılımları arasındaki ilişki

Ölçülen ve hesaplanan verilerin uyumlu olması, numune alma esnasında toplanan veri kalitesinin iyi olduğunu ve madde denkliği sonucu düzeltilen verilerin ekipman modellemesi için kullanılabilir nitelikte olduğunu göstermektedir.

Otojen değirmen etrafındaki akış kollarından tüvenan besleme, otojen değirmen beslemesi ve otojen değirmen çıkışına ait ölçülen ve hesaplanan tane boyu dağılımları Şekil 6.7’de verilmiştir. Tane boyu dağılımı verileri de EK – 3’de sunulmaktadır. Otojen değirmen beslemesi, tüvenan besleme, birinci hidrosiklon alt akımı ve elek ara katından gelen (- 30 + 2 mm) malzemelerin birleşmesiyle oluşmaktadır. Otojen değirmen etrafındaki ölçülen ve hesaplanan tane boyu dağılımları arasında uyumlu bir ilişki olduğu görülmektedir.



Şekil 6.7 Otojen değirmen etrafındaki akış kollarına ait ölçülen ve hesaplanan tane boyu dağılımları

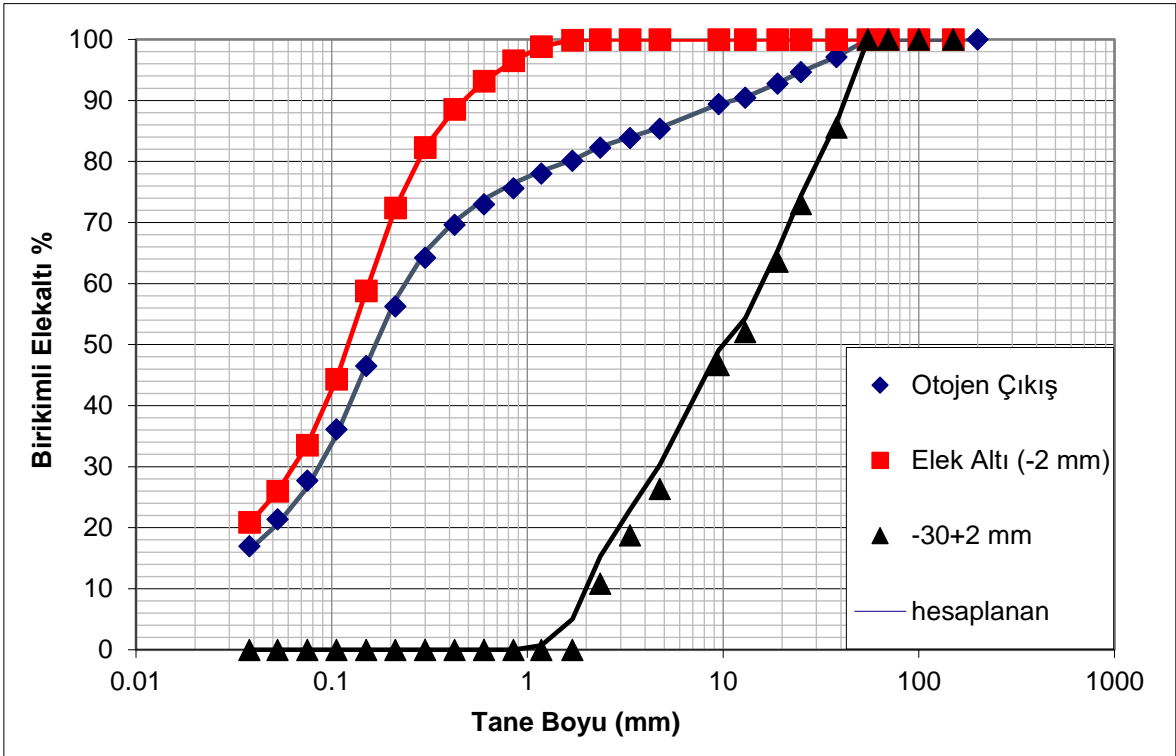
Tüvenan beslemenin % 80’inin geçtiği tane boyu 120.87 mm, otojen değirmen beslemesinin % 80’inin geçtiği tane boyu ise 37.44 mm olarak hesaplanmıştır. Tane boyu dağılımlarının belirlenmesinin ardından otojen değirmenin indirgeme oranı belirlenmiştir. İndirgeme oranı değirmene giren malzemenin % 80’inden geçen tane boyunun (F_{80}), değirmen ürününün % 80’inden geçen tane boyuna (P_{80}) bölünmesi ile hesaplanmaktadır. Otojen değirmen indirgeme oranı 22.97’dir.

Otojen değirmen etrafındaki akış kollarında hesaplanan akış hızları Çizelge 6.5' te verilmiştir.

Çizelge 6.5 Otojen değirmen etrafındaki akış kollarında hesaplanan akış hızları, % katı ve palp yoğunluğu değerleri

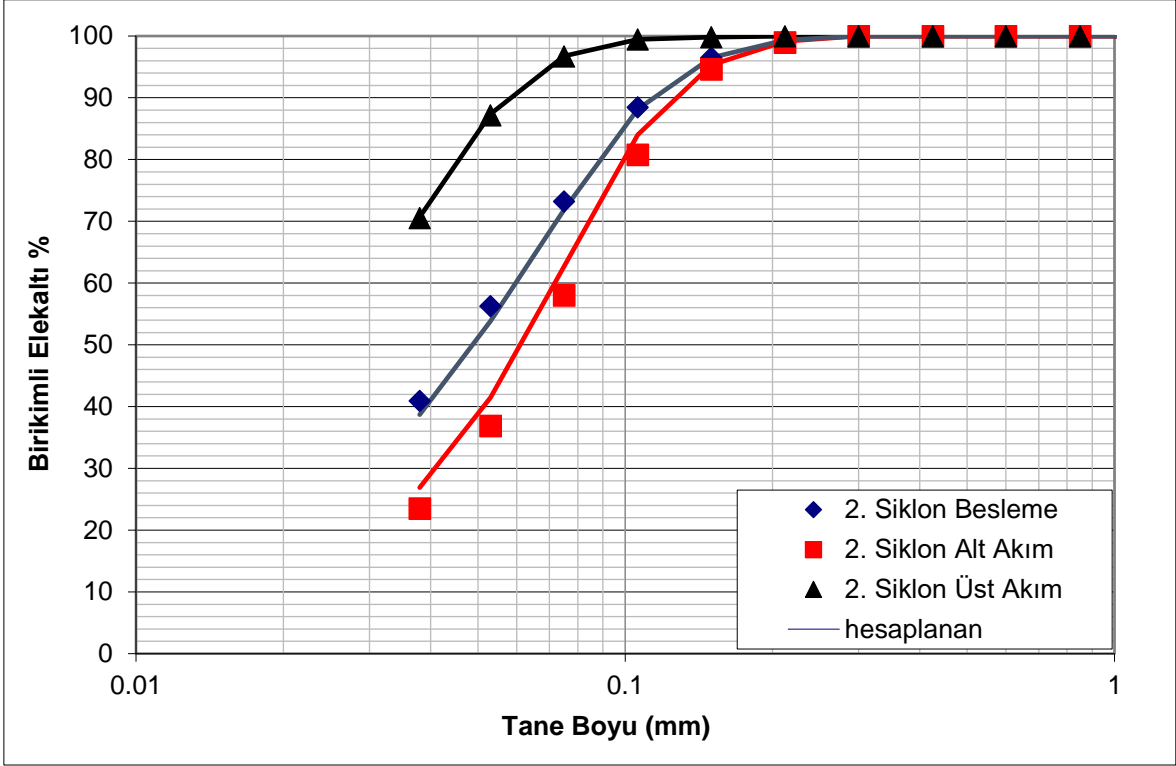
	Tüvenan Besleme	Otojen Besleme	Otojen Çıkış
Katı Tonajı t/s	38.86	132.82	132.82
Su Tonajı t/s	0.00	36.90	36.90
% Katı	100.00	78.26	78.26
Palp Yoğ. (t/m ³)	3.93	2.40	2.40
Hacimsel Akış [m ³ /h]	9.89	70.70	70.70

Elek etrafından alınan numuneler ile yapılan madde denklığı çalışmaları sonucunda ölçülen ve hesaplanan tane boyu dağılımları Şekil 6.8'de verilmiştir. Madde denklığı çalışmalarında elek 2 mm açıklığa sahip tek katlı elek olarak değerlendirilmiştir. +30 mm ve -30+2 mm katlarında kalan tüm malzeme otojen değirmene geri döndürülmüştür.



Şekil 6.8 Elek etrafından alınan numunelerin ölçülen ve hesaplanan tane boyu dağılımları

İkinci hidrosiklon grubuna ait akış kollarındaki ölçülen ve hesaplanan tane boyu dağılımlarının karşılaştırılması Şekil 6.10'da verilmiştir. Bu ekipman için elde edilen ölçülen ve hesaplanan tane boyu değerleri EK – 6'da verilmektedir.



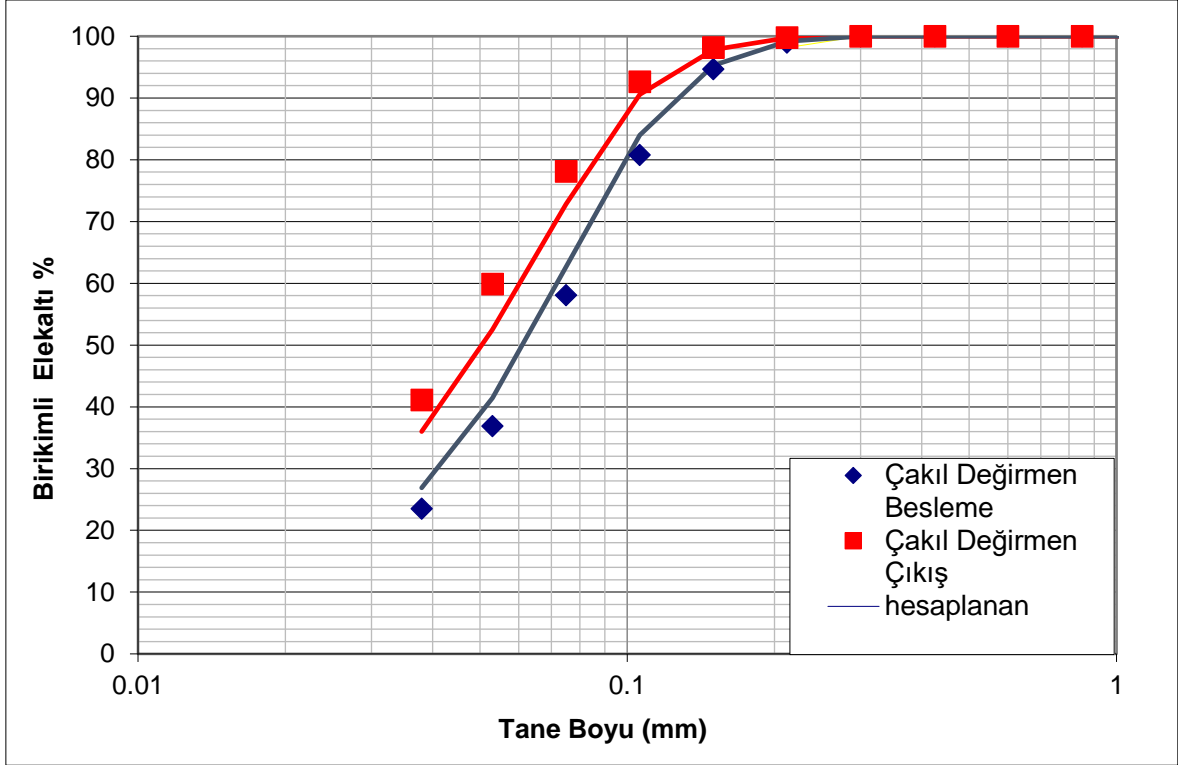
Şekil 6.10 İkinci hidrosiklon grubuna ait ölçülen ve hesaplanan tane boyu dağılımları

Öğütme devresinde bulunan ikinci hidrosiklon grubu etrafındaki akış kollarında hesaplanan tonaj, % katı içerikleri, su miktarı, palp yoğunluğu ve hacimsel akış değerleri Çizelge 6.7'de verilmiştir.

Çizelge 6.7 İkinci hidrosiklon grubu etrafında mevcut numune alma koşullarında hesaplanan akış hızları, % katı ve palp yoğunluğu değerleri

	Besleme	Alt Akım	Üst Akım
Katı Tonajı t/s	162.98	119.03	43.96
Su Tonajı t/s	115.69	53.66	62.03
% Katı	58.49	68.93	41.47
Palp Yoğ. [t/m³]	1.77	2.06	1.45
Hacimsel Akış [m³/h]	157.16	83.94	73.22

Çakıllı değirmen çıkışından alınan numune ile yapılan madde denklığı çalışmaları sonucunda elde edilen ölçülen ve hesaplanan verilerin ilişkisi Şekil 6.11'de verilmiştir. Ölçülen ve hesaplanan veriler EK – 7'de gösterilmektedir. Çakıllı değirmen etrafındaki akış hızları Çizelge 6.8'de verilmiştir.



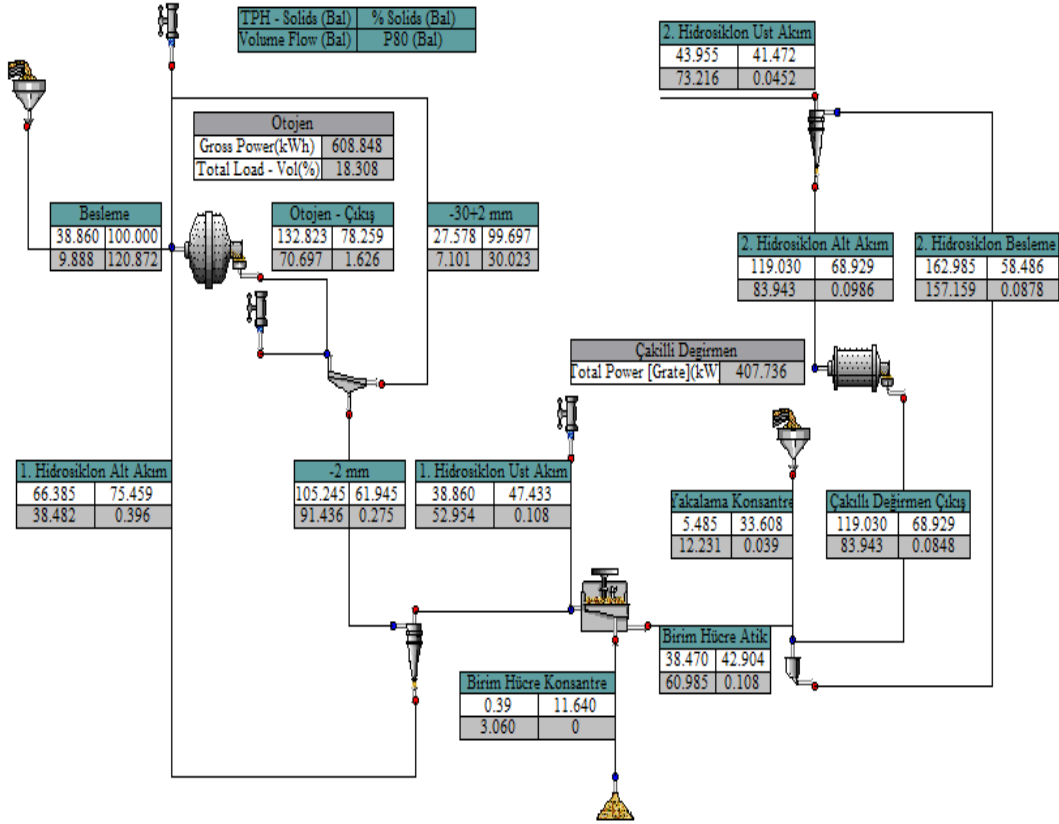
Şekil 6.11 Çakıllı değirmen çıkışı etrafındaki ölçülen ve hesaplanan tane boyu dağılımları

Çizelge 6.8 Çakıllı değirmen çıkışına ait akış hızları, % katı ve palp yoğunluğu değerleri

	Çakıllı Değirmen Çıkış
Katı Tonajı t/s	119.03
Su Tonajı t/s	53.66
% Katı	68.93
Palp Yoğ. [t/m ³]	2.06
Hacimsel Akış [m ³ /h]	83.94

Devredeki ekipmanların etrafındaki akışlara ait tane boyu dağılımları incelendiğinde ölçülen ve hesaplanan verilerin modelleme ve simülasyon çalışmaları için uygun olduğuna karar verilmiştir. Ekipmanların bir arada olduğu akım şeması üzerinde yapılan madde denklığı çalışmaları sonucunda bütün akış kollarındaki akış hızları ve tane boyu dağılımları belirlenmiştir. Elde edilen veriler akım şeması üzerinde

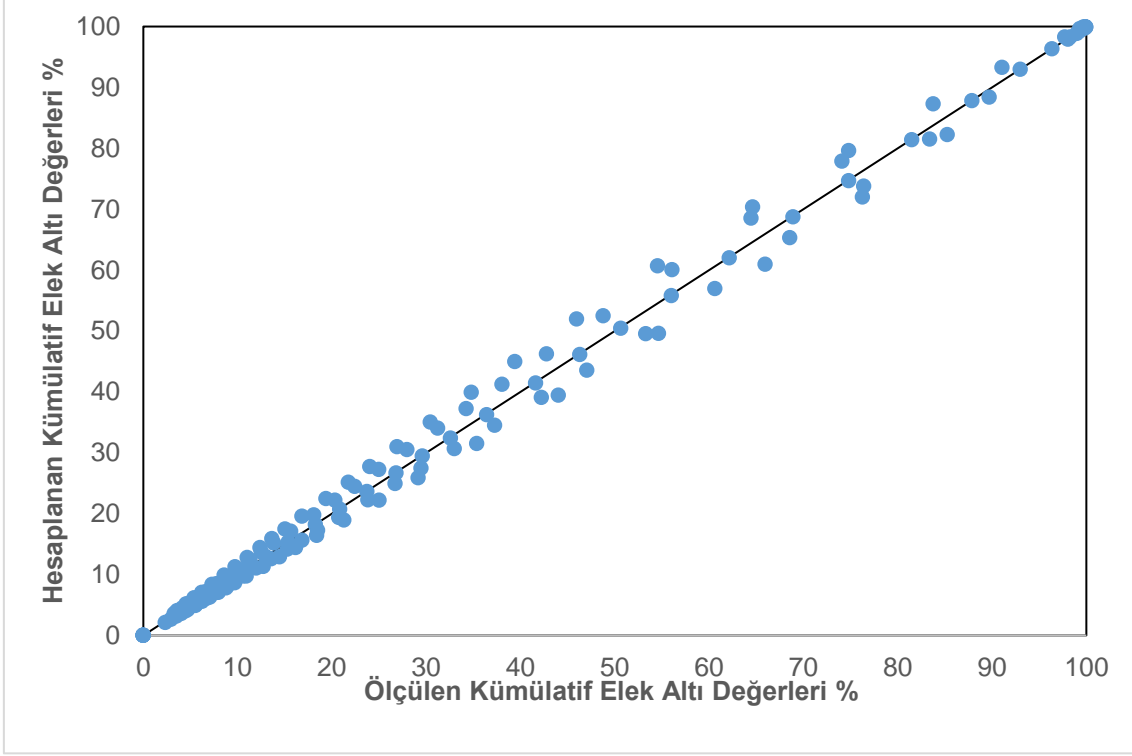
Şekil 6.12’de gösterilmiştir. Birinci dönem numune alma çalışması sonucunda elde edilen akış hızları, % katı ve P80 değerleri EK – 8 de verilmiştir.



Şekil 6.12 Birinci dönemde numune alınan koşula ait madde denklığı

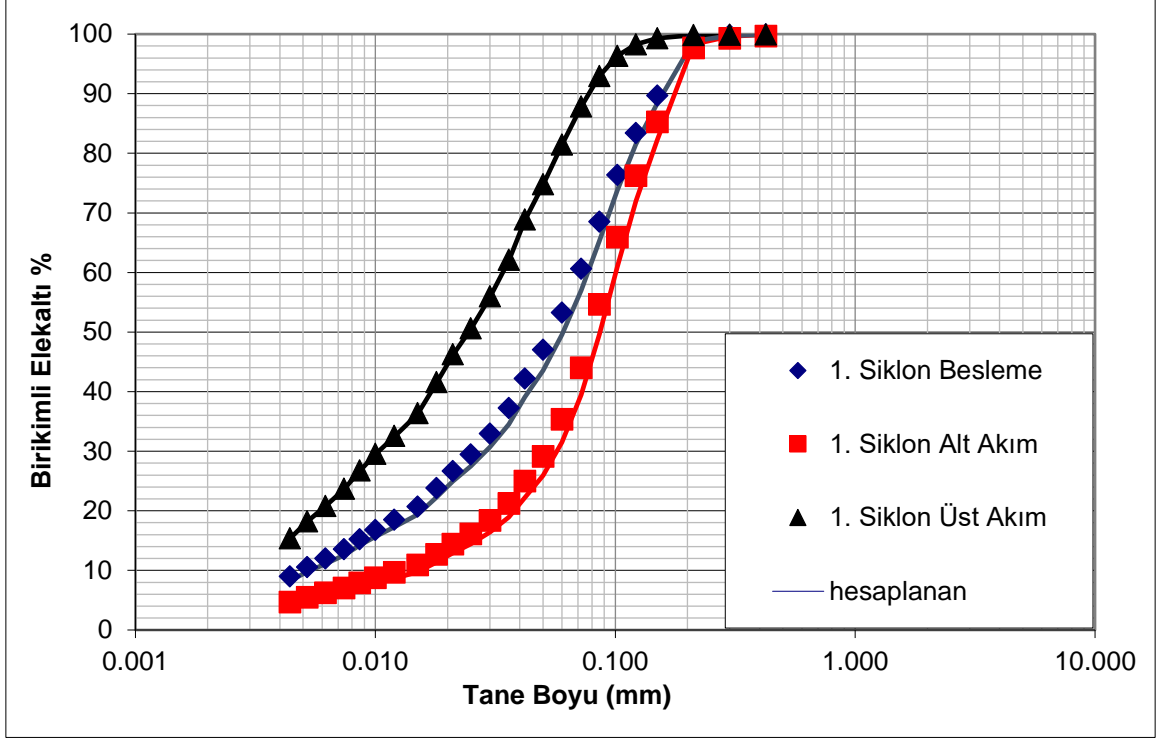
6.6.2 İkinci Dönem Numune Alma Çalışmaları Sonucunda Oluşturulan Madde Denkliği

İkinci dönemde gerçekleştirilen numune alma çalışmalarına ait ölçülen ve hesaplanan tane boyu dağılımları Şekil 6.13'te verilmiştir.



Şekil 6.13 İkinci dönemde alınan numunelerin ölçülen ve hesaplanan tane boyu dağılımları arasındaki ilişki

İkinci dönemde numune alma çalışması sonucunda elde edilen ölçülen ve hesaplanan tane boyu dağılımlarının birbirleriyle oldukça uyumlu olduğu ve verilerin kullanılabilir nitelikte olduğu görülmektedir. Madde denkliği çalışmaları sonucunda elde edilen tonaj ve tane boyu dağılımları kullanılarak ikinci hidrosiklon grubunun performansı değerlendirilmiştir.



Şekil 6.14 İkinci hidrosiklon grubu ölçülen ve hesaplanan tane boyu dağılımları

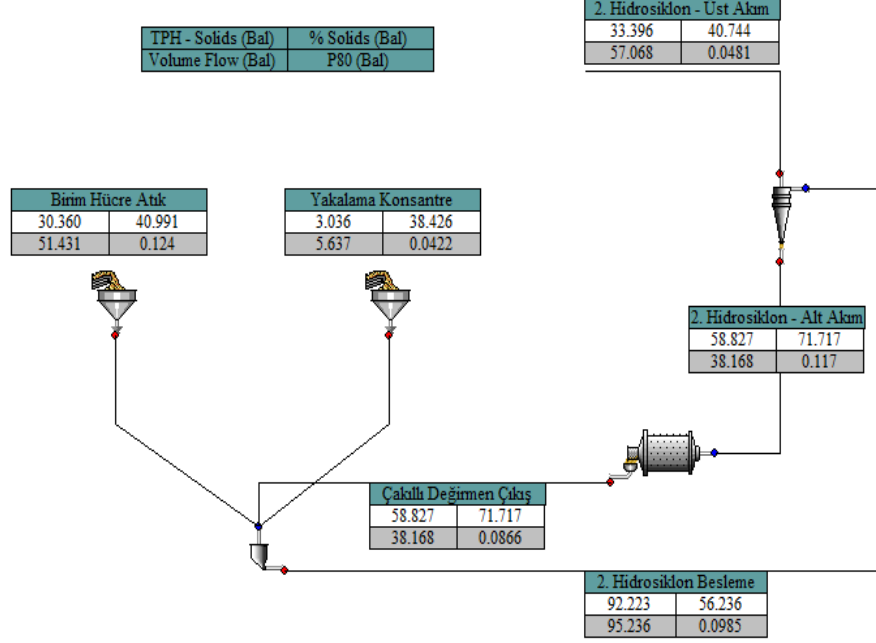
İkinci hidrosiklon grubu etrafında gerçekleştirilen madde denklığı çalışmaları sonucunda ölçülen ve hesaplanan tane boyu dağılımı verilerinin son derece uyumlu olduğu Şekil 6.14'te görülmektedir. Elde edilen veriler EK – 9'da gösterilmektedir.

İkinci hidrosiklon grubu etrafında gerçekleştirilen madde denklığı çalışması sonucunda elde edilen akış hızları Çizelge 6.9'da verilmiştir. İkinci dönem numune alma çalışması sonrasında çakıllı değirmen etrafındaki akış kollarından elde edilen numunelere ait ölçülen ve hesaplanan tane boyu dağılımlarının verileri EK – 10'da sunulmuştur.

Çizelge 6.9 İkinci dönemde alınan numuneler ile ikinci hidrosiklon grubu etrafında hesaplanan akış hızları, % katı ve palp yoğunluğu değerleri

	Besleme	Alt Akım	Üst Akım
Katı Tonajı t/s	92.23	58.83	33.40
Su Tonajı t/s	71.77	23.20	48.57
% Katı	56.24	71.72	40.74
Palp Yoğ. [t/m³]	1.72	2.15	1.44
Hacimsel Akış [m³/h]	95.24	38.17	57.07

İkinci dönem numune alma çalışması sonucunda elde edilen madde denklığı Şekil 6.15'te verilmiştir. Madde denklığı çalışmasına ait veriler EK – 12'de gösterilmektedir.

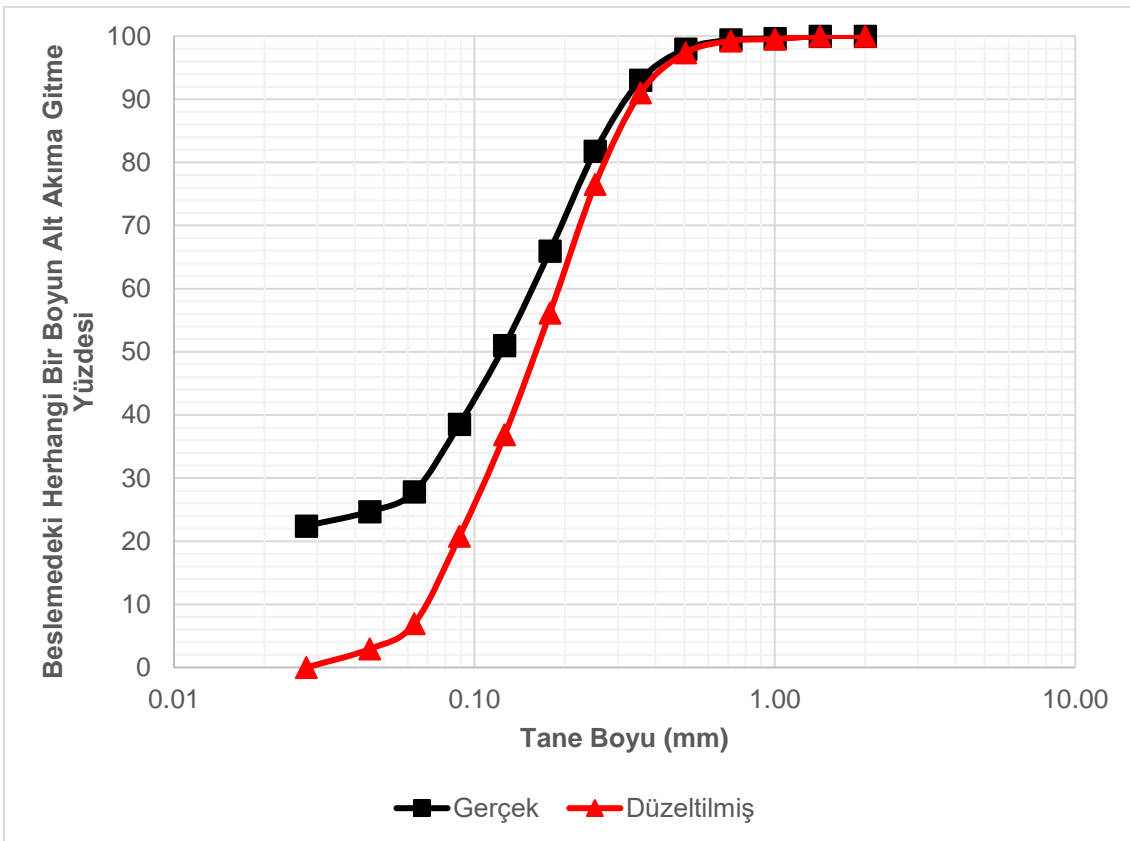


Şekil 6.15 İkinci dönemde alınan numuneler ile yapılan madde denklığı

6.7 Mevcut Hidrosiklonların Performans Değerlendirmesi

Herhangi bir sınıflandırıcının boyut ayırımı yönünden performansı değerlendirilirken performans eğrisi veya tromp eğrisi kullanılmaktadır. Performans eğrilerinin eğimi ayırım keskinliği hakkında bilgi vermektedir; eğrinin dikleşmesi ayırım keskinliğinin arttığını yani daha iyi bir ayırımın meydana geldiğini, eğrinin yatıklaşması ise ayırım keskinliğinin azaldığını göstermektedir. Performansın değerlendirilmesinde kullanılan bir diğer parametre ise kaçak (by-pass) yapan malzeme oranıdır. Performans eğrisinin ulaştığı en düşük değer, kaçak yapan malzeme oranını ifade etmektedir. Bu değer düşük olması ayırımın iyi olduğu anlamına gelmektedir.

Birinci dönemde alınan numuneler ile gerçekleştirilen madde denklığı çalışmaları sonucunda hem birinci siklon grubunun hem de ikinci siklon grubunun gerçek ve düzeltilmiş performans eğrileri çizilmiştir. Birinci siklon grubuna ait gerçek ve düzeltilmiş performans eğrileri Şekil 6.16'da verilmiştir. Hesaplanan veriler EK – 13'de gösterilmektedir.

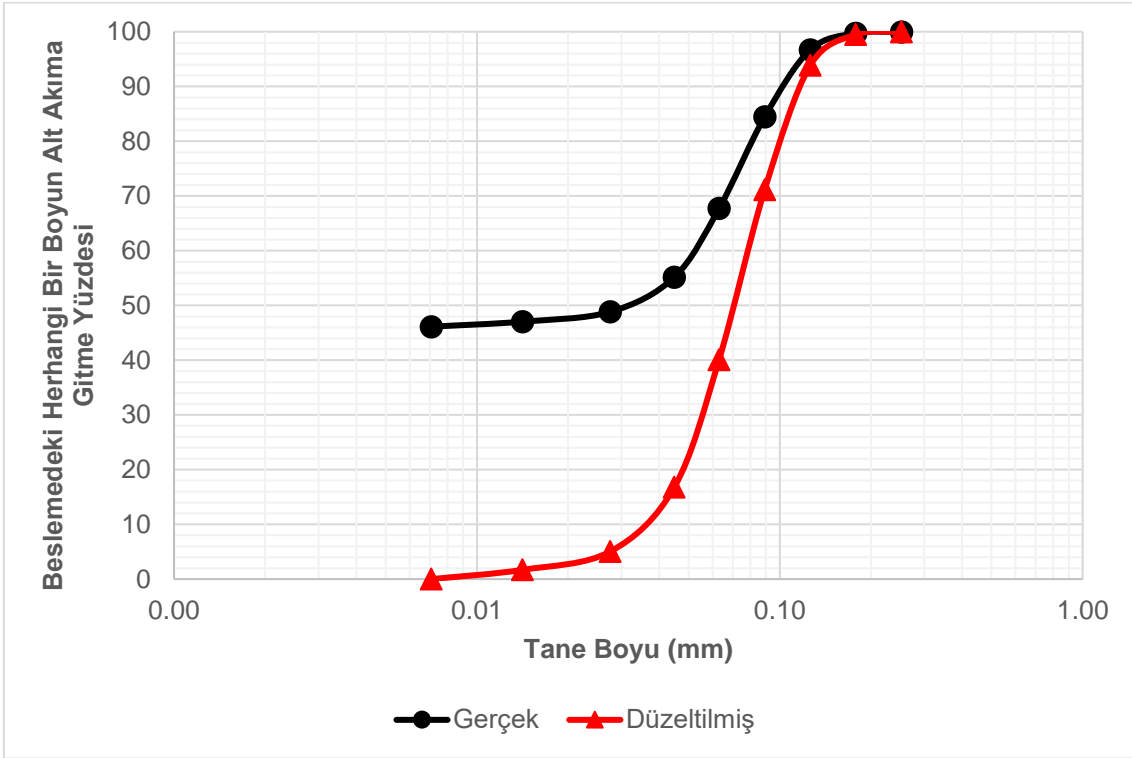


Şekil 6.16 Birinci siklon grubuna ait gerçek ve düzeltilmiş performans eğrileri

Birinci siklon grubuna ait su ile alt akıma kaçak yapan ince malzeme oranı (by-pass) % 22.44 olarak hesaplanmıştır. Gerçek performans eğrisine göre siklon kesme tane boyu (d_{50}) 0.123 mm olarak belirlenmiştir. Düzeltilmiş performans eğrisine göre siklon kesme tane boyunun (d_{50c}) 0.162 mm olduğu görülmektedir. Özellikle flotasyon ile zenginleştirme işlemlerinde tane boyunun etkisi oldukça önemlidir. Birinci siklon grubundaki gerçek ve düzeltilmiş performans eğrilerinden belirlenen kesme tane boyları arasındaki farkın flotasyon performansını doğrudan etkilediği düşünülmektedir.

Birinci siklon grubunda 500 mm çapa sahip iki adet siklon bulunmaktadır. Bu siklonlardan bir tanesi çalışırken diğeri yedek olarak bekletilmektedir. Hidrosiklon içerisindeki basınç farkının sağlanabilmesi için hidrosiklon apeksinin normalden daha fazla daraltıldığı gözlemlenmiştir. Bundan dolayı siklon alt akımında oldukça kıvamlı ve düz bir akış gözlemlenmiştir. Siklon tankı çıkışında değişken hızlı pompa kullanılmadığı da tespit edilmiştir. Sürekli aynı hızda çalışan pompa ile siklon tankı seviyesi kontrol edilememekte ve anlık dolup boşalmalar meydana gelebilmektedir. Tüm bu veriler bir arada düşünüldüğünde birinci siklon grubunda etkili bir sınıflandırma gerçekleşmediği söylenebilir.

Birinci dönemde, ikinci siklon grubu etrafındaki akışlardan alınan numunelerin tane boyu dağılımları yaş eleme yöntemiyle belirlendikten sonra madde denklığı çalışması sonucunda elde edilmiş tonaj değerleri de kullanılarak gerçek ve düzeltilmiş performans eğrileri çizilmiştir. İkinci siklon grubuna ait gerçek ve düzeltilmiş performans eğrileri Şekil 6.17’de gösterilmiştir. Kullanılan veriler EK – 14’te gösterilmektedir.



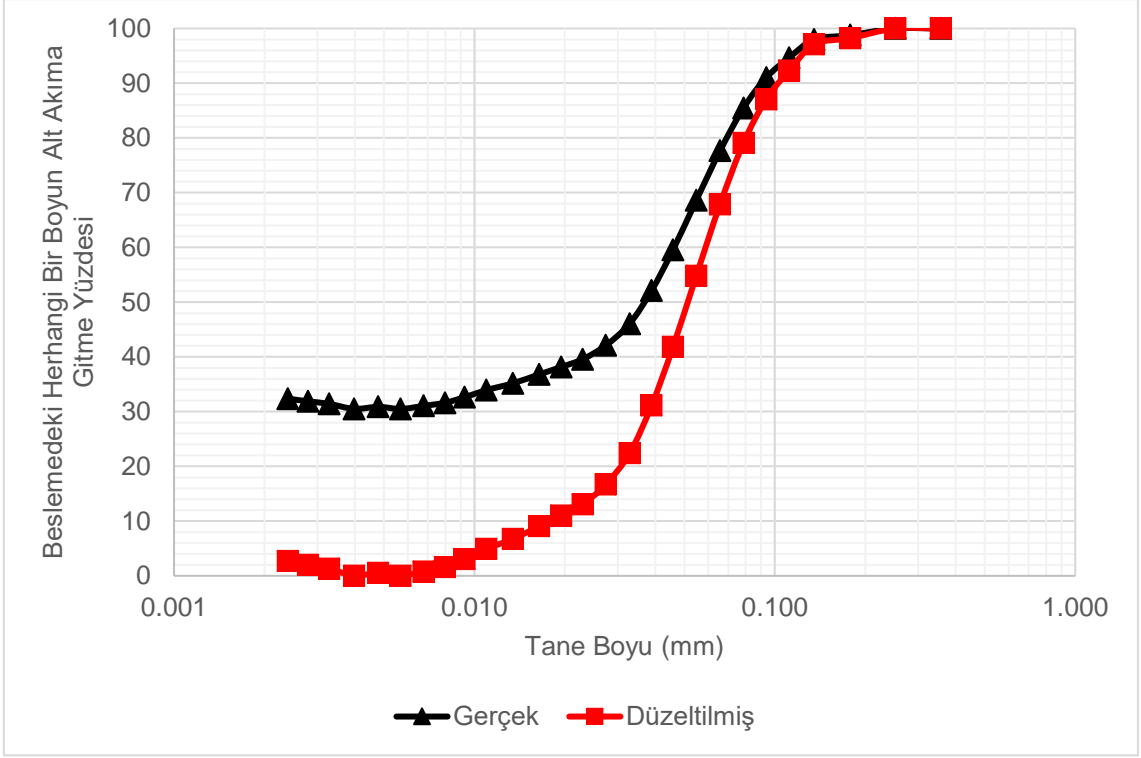
Şekil 6.17 İkinci siklon grubuna ait gerçek ve düzeltilmiş performans eğrileri

Gerçek ve düzeltilmiş performans eğrileri değerlendirildiğinde alt akıma yapılan kaçak oranı (by-pass) ikinci hidrosiklon grubu için % 46.12 olarak belirlenmiştir. Gerçek performans eğrisine göre siklon kesme tane boyunun (d_{50}) 0.031 mm olduğu görülmektedir. Fakat düzeltilmiş performans eğrisine göre kesme tane boyu değeri (d_{50c}) ise 0.073 mm olarak belirlenmiştir. Su ile alt akıma yapılan yüksek kaçak oranından dolayı gerçek ve düzeltilmiş kesme tane boyu değerleri arasında çok büyük bir fark olduğu görülmektedir.

İkinci siklon grubunda 6 adet 250 mm çapa sahip siklon bulunmaktadır. Bu siklonlardan üç tanesi çalışırken diğer üç tanesi yedek olarak tutulmaktadır. Çalışan üç adet siklonun alt akım çıkışları gözlemlendiğinde her siklon alt akımından farklı debilerde akış olduğu gözlemlenmiştir. Siklon grubu dağıtıcısının verimli bir şekilde

akışı dağıtmadığı yargısına varılmıştır. Bu yüzden her bir siklon üzerindeki yükün farklı olması doğrudan siklonların ayırım performansını etkilemektedir.

İkinci dönemde gerçekleştirilen numune alma çalışması sonrasında elde edilen tane boyu dağılımları kullanılarak ikinci hidrosiklon grubunun performansı bir kez daha değerlendirilmiştir. İkinci hidrosiklon grubunun üst akımının % 80'inden geçen tane boyu değeri 0.040 mm civarında olduğundan yaş eleme ile belirlenen tane boyu dağılımı verileri kullanılarak herhangi bir performans değerlendirmesi yapılmasının pek doğru sonuçlar vermeyeceği yargısına varılmıştır. Bu yüzden tane boyu dağılımı verileri yaş olarak lazer difraksiyonu yöntemi ile belirlenmiştir. İkinci dönemde gerçekleştirilen numune alma çalışması sırasında tüvenan besleme tonajı 31 ton/saat olarak ölçülmüştür. Su ile alt akıma kaçak yapan malzeme miktarı % 30.49 olarak belirlenmiştir. Birinci dönem ile kıyaslandığında tüvenan besleme tonajının azalması sonucunda alt akıma yapılan kaçak miktarında da azalma olduğu açıkça görülmektedir. Gerçek partiyon eğrisine göre kesme tane boyu değeri (d_{50}) 0.037 mm olarak belirlenmiştir. Düzeltilmiş partiyon eğrisine göre değerlendirme yapıldığında düzeltilmiş kesme tane boyu değerinin (d_{50c}) 0.052 mm olduğu görülmektedir. Kaçak miktarının azalması sonucunda gerçek ve düzeltilmiş kesme tane boyu değerleri arasındaki farkın da azaldığı belirlenmiştir. İkinci dönemde gerçekleştirilen numune alma çalışması sonucunda ikinci hidrosiklon grubuna ait gerçek ve düzeltilmiş performans eğrileri Şekil 6.18'de verilmiştir. Hesaplanan veriler EK – 15'te sunulmuştur.



Şekil 6.18 İkinci dönem numune alma çalışması sonucunda ikinci siklon grubuna ait gerçek ve düzeltilmiş performans eğrileri

7. MODELLEME VE SİMÜLASYON ÇALIŞMALARI

Örnekleme çalışmaları sonucunda elde edilen veriler kullanılarak yapılan madde denklığı çalışmaları ile devre etrafındaki boyut dağılımları istatistiksel olarak hatalardan arındırılmış ve her bir akış kolundaki değerler hesaplanmıştır. Bu aşamadan sonra modelleme çalışmalarına geçilmiştir. Otojen değirmen, elek, çakıllı değirmen ve hidrosiklonlara ait matematiksel modeller ile devrenin tümü modellenmiştir.

Otojen değirmenin matematiksel modellemesinde hem Leung tarafından 1987'de geliştirilen model hem de değişken hızlar modeli kullanılmıştır. Simülasyon sonuçlarına göre her iki modelin tahmin kapasiteleri kıyaslanmıştır. Çakıllı değirmende ise mükemmel karışım modülü kullanılarak matematiksel modelleme yapılmıştır. Hidrosiklon ve elek modellemesi için tek bileşenli verimlilik eğrisi kullanılmıştır.

Modelleme kısmında yapılan iş; ekipmanlar etrafındaki boyut dağılımları ile akış değerlerinin en iyi şekilde tahmin edilmesini sağlayan model parametrelerinin belirlenmesi şeklinde özetlenebilir. Farklı işletme koşullarında çalışan aynı tasarıma sahip ekipmanların model parametreleri aynı olmak durumundadır. Modelleme çalışmaları sırasında her bir ekipman etrafındaki akışlar ile kendi içerisinde modellenmiştir. En uygun model parametrelerine karar verildikten sonra tüm devre bir araya getirilerek modelleme çalışması tamamlanmıştır. Gerçekleştirilen simülasyon çalışmaları ile oluşturulan modellerin güvenilirliği test edilmiştir. Modelleme sonucunda tüm devre etrafında gerçekleştirilen tahminlerin doğru olduğu belirlenmiştir.

Numune alınan dönemde elde edilen verilere göre öğütme devresinin modellenmesi sonucunda baz simülasyon koşulu elde edilmiştir. Baz simülasyon koşulu, yapılan kapasite artışına yönelik tüm simülasyon çalışmalarının başlangıç noktası olarak kabul edilmektedir. Yapılan tüm simülasyon çalışmalarında tüm değişkenlerin sabit tutularak tek bir değişkenin değiştirilmesi sonucunda veriler üretilmiştir. Böylece elde edilen sonuçların oluşturduğu etkiler baz simülasyon koşulu ile kıyaslanmıştır.

7.1 Cürufun Öğütülebilirlik Parametrelerinin Belirlenmesi

Modelleme ve simülasyon çalışmalarında kullanılmak üzere cürufun öğütülebilirlik parametreleri belirlenmiştir. Cüruf numunesinin sertliği ve öğütmeye karşı direncinin belirlenmesi amacıyla bond öğütülebilirlik testi yapılmıştır. Darbeye bağlı malzemenin nasıl kırılacağına belirlenmesi için ağırlık düşürme testi yapılmıştır. Ayrıca aşınma özelliklerinin tayin edilmesi için numuneye aşındırma testi uygulanmıştır.

7.1.1 Bond Öğütülebilirlik Testi Sonuçları

TSE -7700 standartlarına göre yapılan testte, test eleği olarak 106 mikronluk elek kullanılmıştır. Bond iş indeksi hesaplanırken bilyalı değirmenler için geliştirilen formül kullanılmıştır. Bond öğütülebilirlik testi sonucunda elde edilen değerler Çizelge 7.1'de gösterilmektedir.

Çizelge 7.1 Bond öğütülebilirlik testi sonucunda elde edilen değerler

	Devir Sayısı	Beslemedeki -106 μm miktarı (g)	Ürün - 106 μm (g)	Net Ürün (g)	Öğütülebilirlik. G_{bp} (g/devir)
1	100	142.00	239.77	97.77	0.9777
2	533	18.05	419.25	401.20	0.7527
3	674	31.57	548.50	516.93	0.7670
4	649	41.30	630.83	589.53	0.9084
5	541	47.50	561.82	514.32	0.9507
6	522	42.31	535.18	492.87	0.9442

Bond iş indeksinin hesaplanmasında kullanılan parametreler ve hesaplanan iş indeksi değeri Çizelge 7.2'de verilmiştir. Hesaplama da kullanılan öğütülebilirlik (G_{bp} , g/devir) değeri dengeye gelen son üç periyodun ortalaması olarak verilmektedir.

Çizelge 7.2 Bond iş indeksinin hesaplanmasında kullanılan parametreler ve iş indeksi değeri

W_i (kWh/ton)	19.00
P (Test Eleği) μm	106
G_{bp} (Ortalama)	0.9344
P80 μm	87.84
F80 μm	2070.00

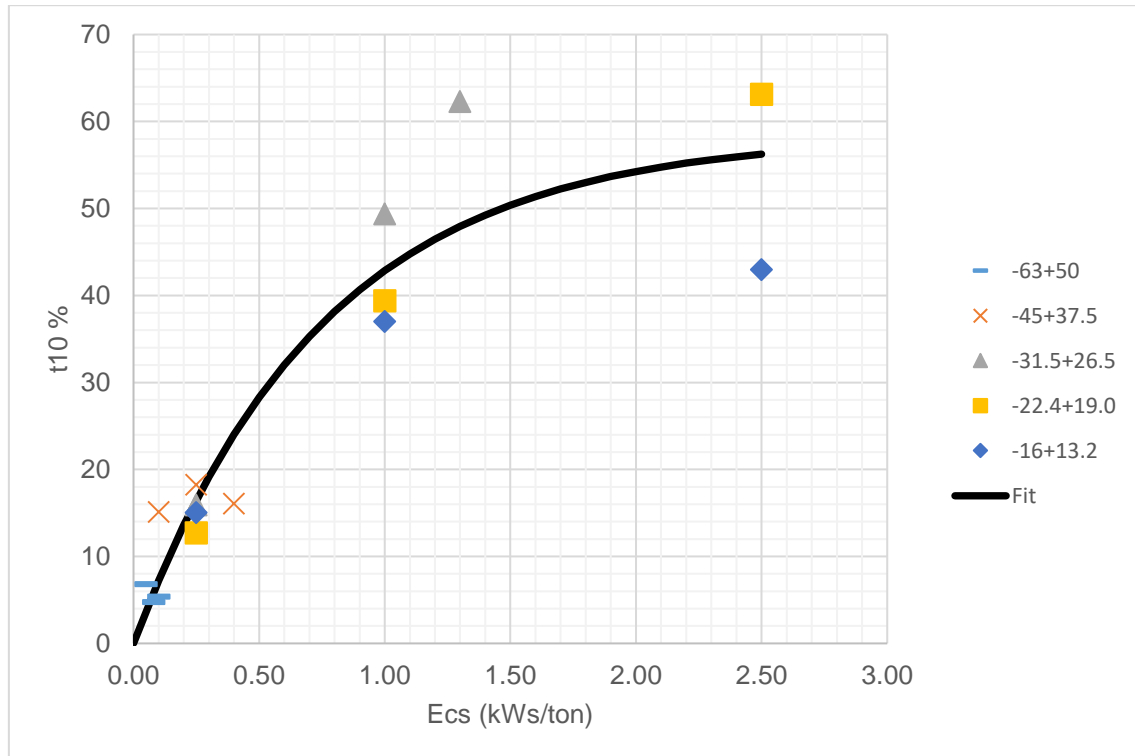
7.1.2 Ağırlık Düşürme Testi Sonuçları

Ağırlık düşürme test düzeneğinde bulunan manyetik kafa yardımıyla yükseltelen ağırlıklar farklı enerji seviyelerinden bırakılarak tanelerin kırıldıktan sonra nasıl bir boyut dağılımına sahip olacağı belirlenmektedir. Ağırlık düşürme testi JKMRC tarafından belirlenen standartlara göre yapılmıştır. Ağırlık düşürme testinde kullanılan enerji seviyeleri ve tane boyu aralıkları Çizelge 7.3'te verilmiştir.

Çizelge 7.3 Ağırlık düşürme testinde kullanılan enerji seviyeleri ve tane boyu aralıkları

Test	-63 +53 mm	-45 + 37.5 mm	-31.5 + 26.5 mm	-22.4 + 19.0 mm	-16 + 13.2 mm
1. Enerji Düzeyi (kWh/ton)	0.05	0.10	0.25	0.25	0.25
2. Enerji Düzeyi (kWh/ton)	0.08	0.25	1.00	1.00	1.00
3. Enerji Düzeyi (kWh/ton)	0.10	0.40	1.30	2.50	2.50

Daha sonra kırılan tanelere elek analizi yapılarak her bir fraksiyonun t_{10} değerinden geçen malzeme miktarı hesaplanmıştır. T_{10} incelik indeksi değerlerine karşılık özgül ufalanma enerjisi (E_{cs}) değerlerinin gösterildiği grafik Şekil 7.1'de verilmektedir.

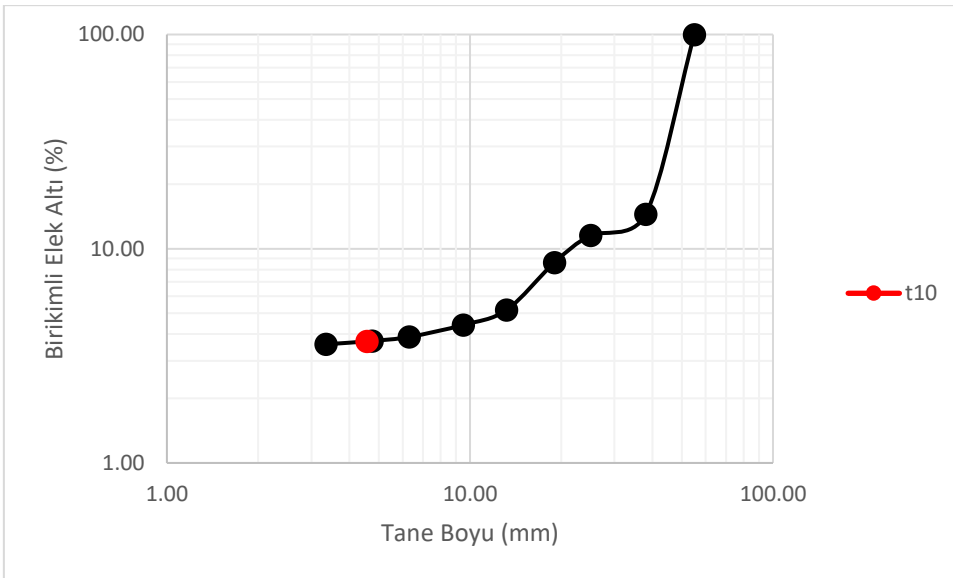


Şekil 7.1 Özgül ufalanma enerjisinin t_{10} incelik indeksi ile ilişkisi

$t_{10} = A * (1 - e^{(-E_{cs}*b)})$ eşitliğine göre A ve b parametreleri lineer olmayan regresyon tekniği ile belirlenmiştir. A parametresinin değeri 58.37 olurken b parametresi 1.33 olarak hesaplanmıştır. Özgül ufalanma enerjisi değerlerine (E_{cs}) karşılık hesaplanan incelik indeksi (t_{10}) değerleri EK – 16’da verilmektedir.

7.1.3 Aşınma Testi Sonuçları

Bu testte, cüruf numunesinin aşınarak kırılmasını tanımlamak için özel olarak üretilmiş 300 x 300 mm boyutlarında tamburlu değirmen kullanılmıştır. JKMRC tarafından belirlenen standartlara göre yapılan testte cüruf numunesinin aşınarak kırılma değerini belirleyen t_a parametresi bulunmuştur. – 55 + 38 mm tane boyu aralığındaki 3 kg’lık test numunesi kritik hızın % 70’ine denk gelmesi için yaklaşık 53 d/dak hızda, 10 dakika boyunca değirmende çevrilmiştir. Değirmenden çıkarılan numune kuru olarak elenmiştir. Tane boyu dağılımı Şekil 7.2’de verilmektedir. Tane boyu dağılımının verileri EK – 17’de gösterilmektedir. Elek analizi sonucuna göre t_{10} değerinden geçen malzeme miktarı % 3.70 olarak belirlenmiştir. Bu değer 1/10’u t_a değerini göstermektedir. Bu sonuçlara göre cüruf numunesinin t_a değeri 0.37 olmaktadır.

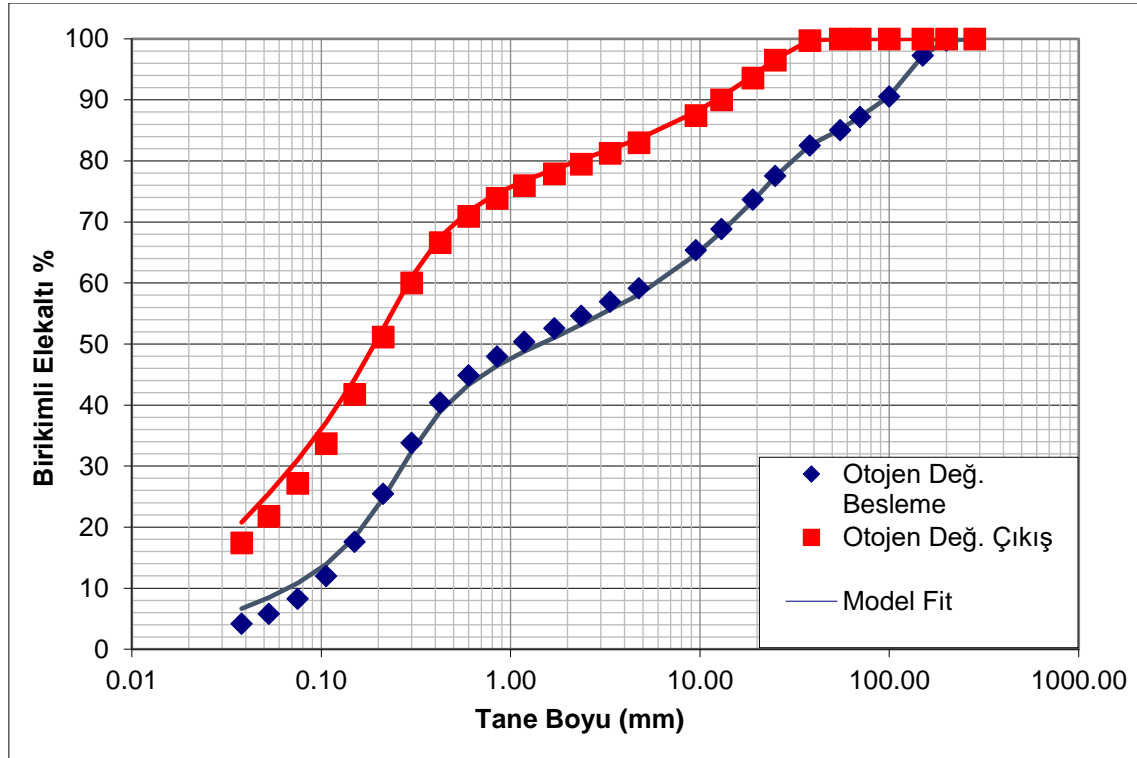


Şekil 7.2 Aşınma testine göre belirlenen t_{10} değeri

7.2 Güvenli Modellerin Oluşturulması

Modellerin güvenilir olması için, istatistiksel olarak hatalardan arındırılmış madde denkleği sonucunda elde edilen veriler kullanılmıştır. Her bir ekipmanın bağlı olduğu akışlardaki tane boyu dağılımı ve tonajları değerlendirilerek model parametreleri JK Simmet v 6.01 programı tarafından tahmin edilmiştir.

Leung modeli ile yapılan otojen değirmen modelinde, değirmen beslemesi ve ürününün madde denkleği sonucunda elde edilmiş tane boyu dağılımı verileri ile matematiksel model tarafından tahmin edilen tane boyu dağılımı verilerinin büyük bir uyumluluk içinde olduğu Şekil 7.3'te görülmektedir. Elde edilen veriler EK – 18'de verilmektedir. Buradan yola çıkarak otojen değirmen modelinin simülasyon çalışmalarında kullanılabileceğine karar verilmiştir.



Şekil 7.3 Otojen değirmen için madde denkleği ve modelleme çalışmaları sonucunda belirlenen tane boyu dağılımları

Kütle transfer kanununu temel alan Leung modelinde m_1 ve m_2 olarak adlandırılan kütle transfer sabitleri 0.37 olarak alınmıştır. Bu değerler Leung tarafından yapılan pilot ölçekli testler sonucunda elde edilmiştir. Otojen değirmenin modellenmesi sonucunda elde edilen model parametrelerinden biri olan optimum ızgara açıklığı 43.80 mm olarak belirlenmiştir. Değirmen içerisinde akışkan davranıma sahip olan

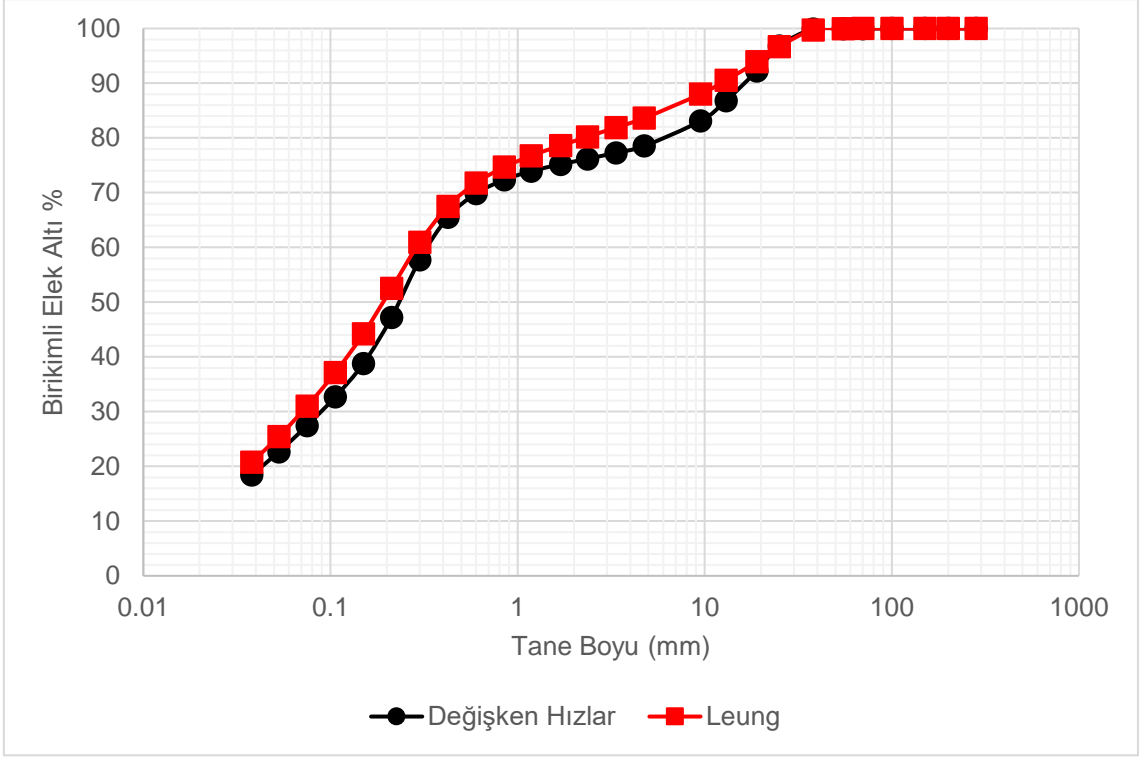
ve ince boyu tanımlayan tane boyu değerinin de 0.042 mm olduğu belirlenmiştir. Modelleme sonucunda otojen değirmenin tükettiği güç değeri 679.893 kW/h olarak tahmin edilmektedir. Bu değer doğrudan şarja aktarılan güç değerini göstermektedir. Değirmen içerisindeki doluluk oranı ise model tarafından % 21.957 olarak hesaplanmıştır.

Tez çalışması kapsamında otojen değirmen için Leung modeli ve değişken hızlar modelinin tahmin kapasiteleri de karşılaştırılmıştır. Değişken hızlar modeli operasyonel parametrelerin modelin içerisinde bulunması sayesinde otojen ve yarı otojen değirmen tasarımına da olanak tanımaktadır. Ayrıca çapı 9 metreden büyük otojen ve yarı otojen değirmen uygulamalarında da gerçeğe çok yakın tahminler üretebilmektedir. Geliştirilen Morrell - C güç yaklaşımı sayesinde değirmen motoru girişinde ölçülen toplam güç değeri 870.781 kWh olarak hesaplanmıştır. Değirmen içerisindeki şarj hareket gücü değeri Eşitlik 7.1 ile hesaplanabilmektedir.

$$\text{Toplam Güç} = \text{Yüksüz Durumda Güç} + k * (\text{Şarj Hareket Gücü}) \quad \text{Eşitlik 7.1}$$

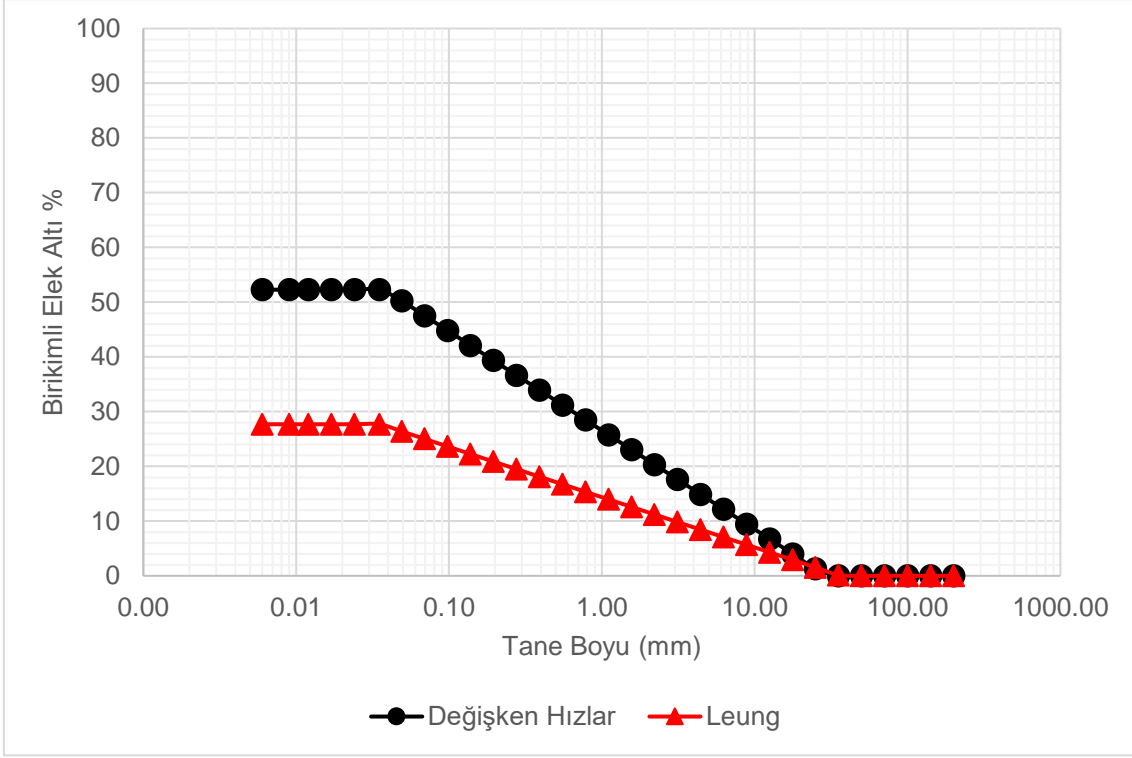
Otojen değirmenin yüksüz çalıştırıldığı durumda ölçülecek güç değeri 108.078 kWh olarak belirlenmiştir. Dönüştürme sabiti olan k değeri 1.26 olarak alınmaktadır. Sonuç olarak şarj hareket gücü 605.32 kWh olarak bulunmaktadır. Pinyon üzerindeki güç kayıplarının tamamı için 0.931 düzeltme katsayısı kullanıldığında net olarak şarja aktarılan güç değeri 563.56 kWh olarak hesaplanmıştır.

Değişken hızlar modelinde değirmen doluluk oranı ise % 21.493 olarak hesaplanmıştır. Her iki modelin değirmen doluluk oranı tahmini tamamen uyuşmaktadır. Her iki model için otojen değirmen çıkışı tane boyu dağılımları Şekil 7.4'te verilmiştir. Tane boyu dağılımı verileri EK – 19'da verilmektedir.



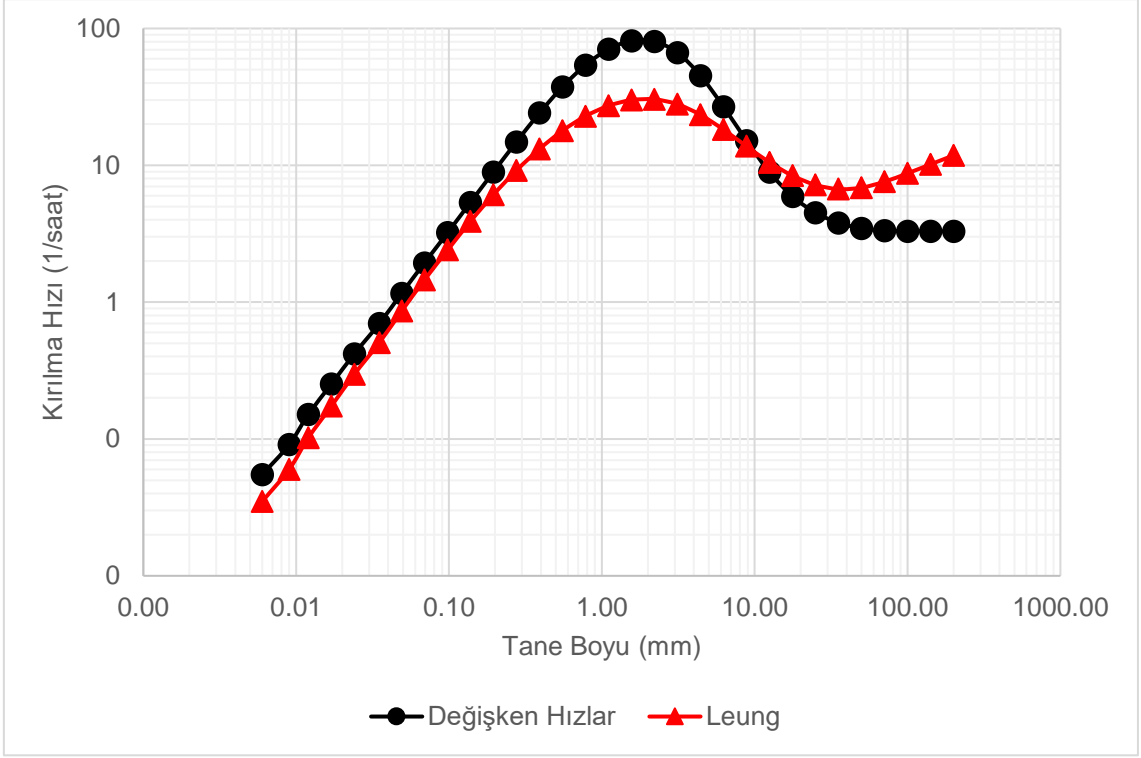
Şekil 7.4 Leung ve değişken hızlar modeline göre elde edilmiş otojen değirmen çıkışı tane boyu dağılımları

Tane boyu dağılımları incelendiğinde Leung modelinin çok farklı olmasa da daha ince bir dağılım tahmin ettiği görülmektedir. Diğer taraftan her iki model için değirmen içerisindeki malzemenin ızgara çıkış hızı fonksiyonları karşılaştırılmıştır. Izgara çıkış hızı fonksiyonunu gösteren grafik Şekil 7.5'te verilmiştir.



Şekil 7.5 Leung ve değişken hızlar modelleri için ızgara çıkış hızı fonksiyonları

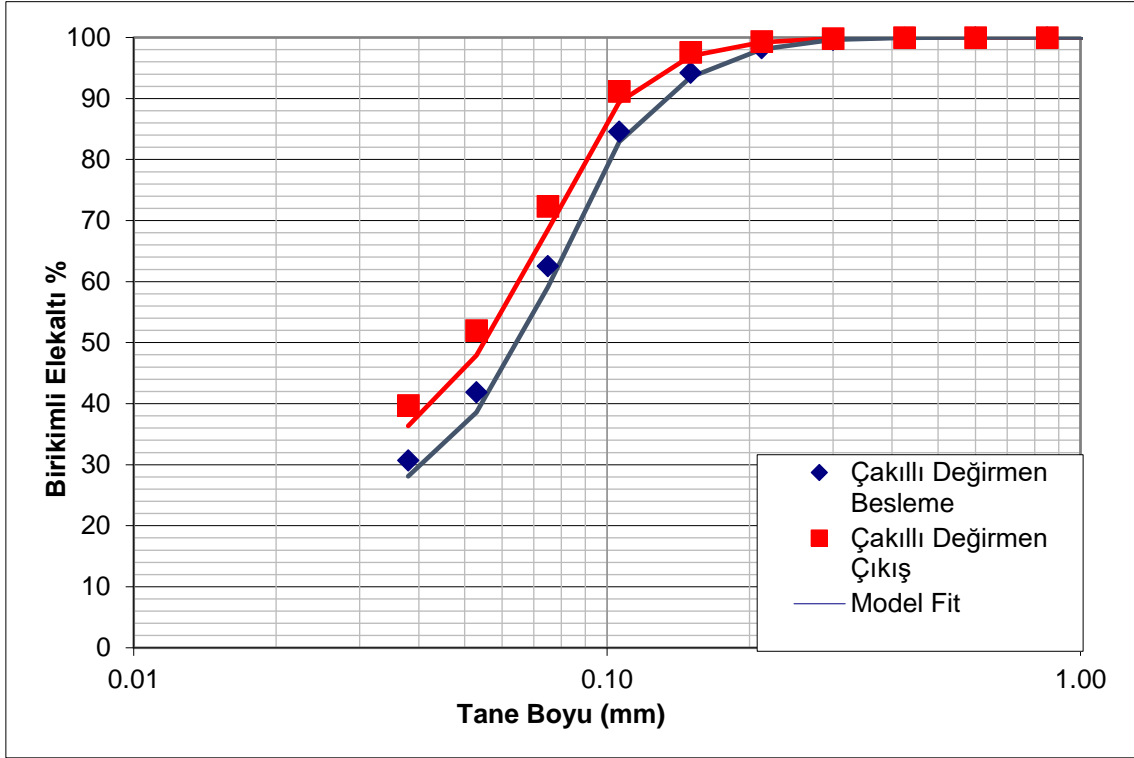
Leung modelinde kullanılan ızgara açıklığı değeri 43.80 mm olurken değişken hızlar modelinde kullanılan ızgara açıklığı değeri 35.00 mm olarak belirlenmiştir. Değişken hızlar modelinde, daha dar açıklığa sahip ızgaradan malzemenin daha hızlı bir şekilde çıkmasının en büyük sebebi kırılma hızı fonksiyonlarındaki farklılıktan kaynaklanmaktadır. Her iki modele ait kırılma hızı fonksiyonları Şekil 7.6'da görülmektedir.



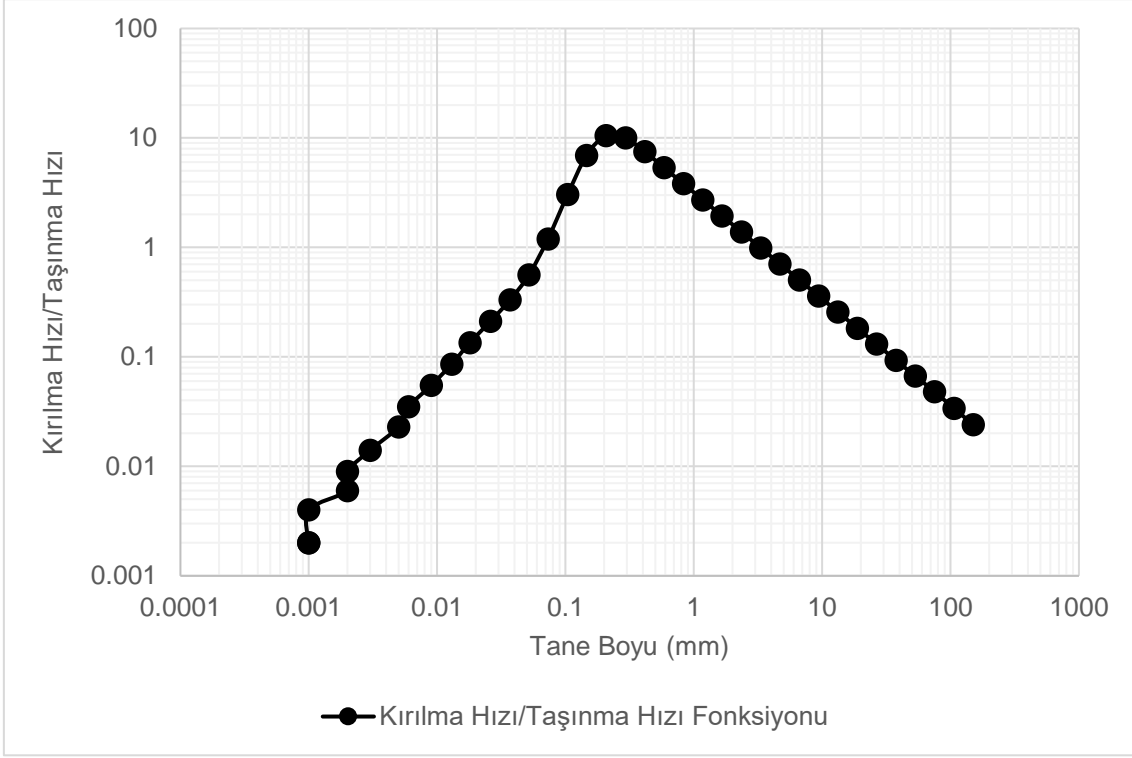
Şekil 7.6 Leung ve değişken hızlar modellerine ait kırılma hızı fonksiyonları

Değişken hızlar modeli tarafından tahmin edilen kırılma hızı fonksiyonunda 0 - 10 mm tane boyu aralığındaki tanelerin Leung modeline kıyasla daha hızlı kırıldığı görülmektedir. Leung modelinde ise 10 mm'den sonra tanelerin kırılma hızının, değişken hızlar modeline göre arttığı belirlenmiştir. Kırılma hızı fonksiyonlarındaki farklılık doğrudan ızgara açıklığı değerini etkilemektedir. Daha hızlı kırılan 0 – 10 mm tane boyulu malzemenin değirmenden çıkarılması kolaylaşmaktadır.

Devrede bulunan çakıllı değirmenin matematiksel modellemesi bilyalı değirmenler için mükemmel karışım modeli kullanılarak yapılmıştır. Madde denkliği çalışması sonucunda elde edilen çakıllı değirmen etrafındaki akışların tane boyu dağılımları ile modelleme sonucunda elde edilen tane boyu dağılımları Şekil 7.7’de kırılma hızı/taşınma hızı fonksiyonu ise Şekil 7.8’de verilmektedir. Tane boyu dağılımlarına ait veriler EK – 21’de, kırılma hızı/taşınma hızı fonksiyonuna ait veriler ise EK – 22’de sunulmaktadır.



Şekil 7.7 Çakıllı değirmen için madde denkliği ve modelleme sonucu elde edilen tane boyu dağılımları

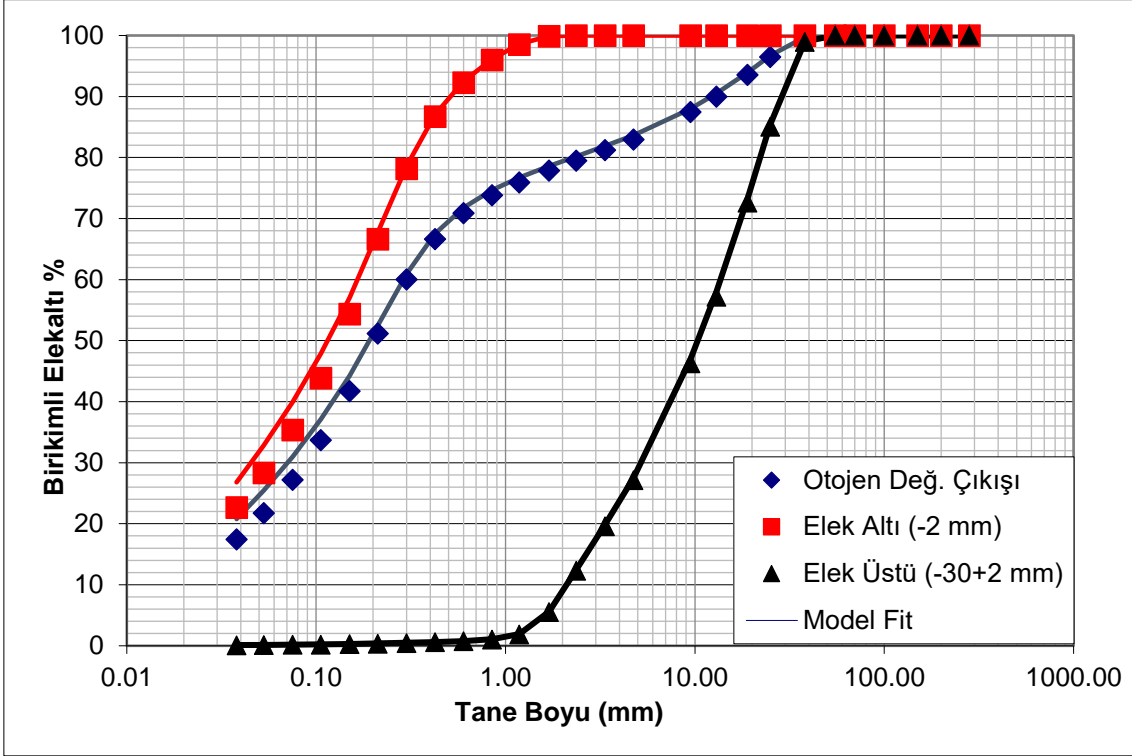


Şekil 7.8 Çakıllı değirmene ait kırılma hızı/taşınma hızı fonksiyonu

Kırılma hızı/taşınma hızı fonksiyonu, değirmen beslemesinin ve çıkışının tane boyu dağılımları ile kırılma fonksiyonu bilindiğinde her tane boyu için hesaplanabilmektedir. Bu eğri kübik spline fonksiyonu ile ifade edilmektedir. Düğüm noktaları kullanılarak oluşturulan fonksiyon çakıllı değirmen performansını belirlemektedir.

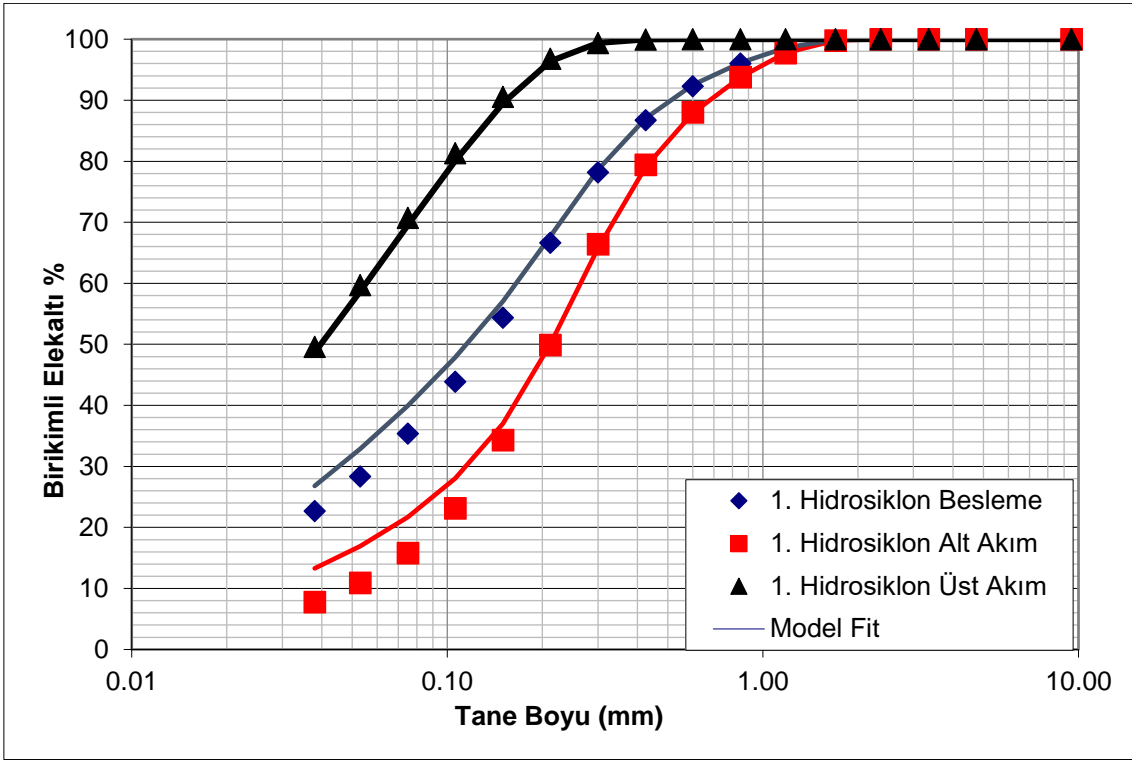
Çakıllı değirmen için elde edilen tane boyuna karşılık kırılma hızı/taşınma hızı eğrisinde 0.276 mm tane boyuna kadar olan tanelerde kırılma hızının arttığı ve bu tanelerin su gibi akışkan davranarak değirmeni terkettiği görülmektedir. Daha iri boylarda ise tanelerin kırılma/taşınma hızının düştüğü ve değirmen içerisinde sınıflandırmaya maruz kaldığı anlaşılmaktadır.

Öğütme devresinde bulunan otojen değirmenin çıkışındaki elek için tek bileşenli verimlilik eğrisi kullanılarak matematiksel modelleme yapılmıştır. Elek tek katlı olarak kabul edilmiştir. Elek etrafındaki akışların madde denklığı sonucunda elde edilen tane boyu dağılımı verileri ile modelleme sonucunda elde edilen tane boyu dağılımı verilerinin uyumluluğu Şekil 7.9'da görülmektedir. Tane boyu dağılımı verileri EK – 23'te sunulmaktadır. Elde edilen matematiksel modelin simülasyon çalışmalarında kullanılmasına karar verilmiştir.

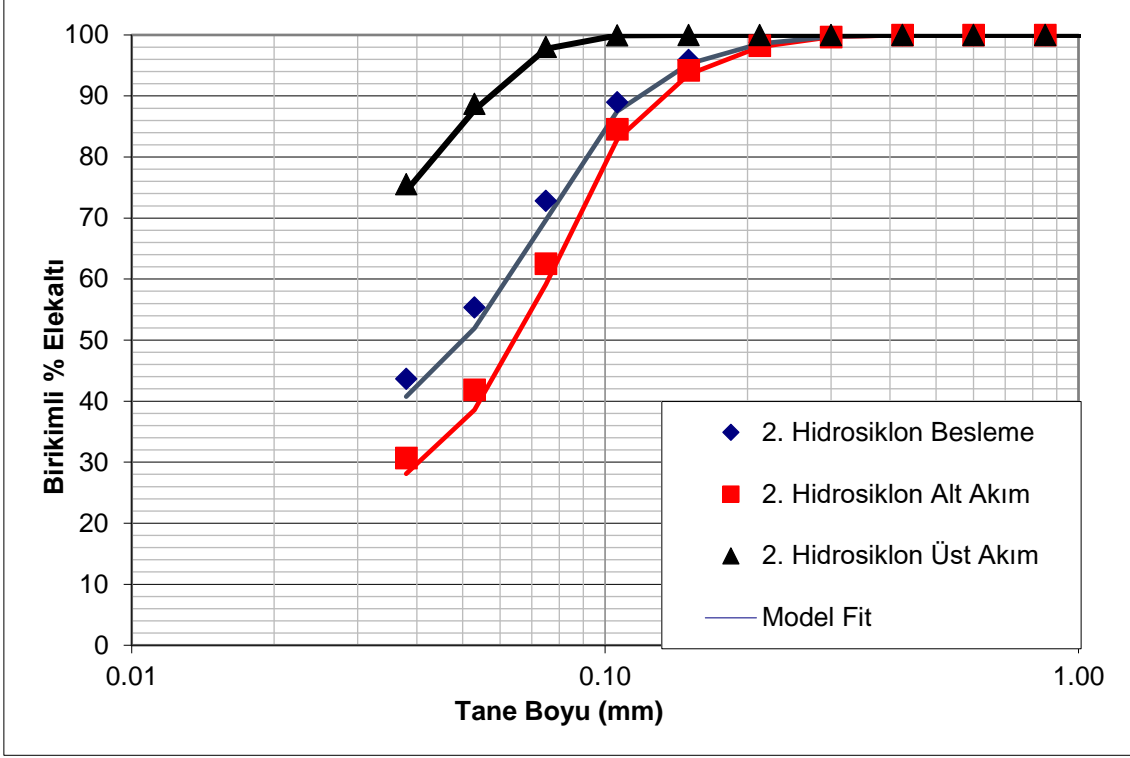


Şekil 7.9 Elek için madde denklığı ve modelleme sonucu elde edilen tane boyu dağılımları

Öğütme devresinde bulunan birinci grup ve ikinci grup olarak adlandırılan hidrosiklonların modellenmesinde de tek bileşenli verimlilik eğrisi kullanılmıştır. Modelleme sonucunda elde edilen tane boyu dağılımları ile madde denklığı sonucunda elde edilmiş tane boyu dağılımlarının karşılaştırılması Şekil 7.10 ve Şekil 7.11'de verilmektedir. Her iki siklon grubunda da tane boyu dağılımlarının oldukça uyumlu bir davranış göstermesinden dolayı simülasyon çalışmalarında belirlenen model parametrelerinin kullanılmasına karar verilmiştir. Birinci hidrosiklon grubunun madde denklığı ve modelleme çalışmaları sonucunda elde edilmiş tane boyu dağılımı verileri EK – 24'te, ikinci hidrosiklon grubuna ait veriler ise EK – 25'te verilmektedir.



Şekil 7.10 Birinci hidrosiklon grubu için madde denkliği ve modelleme çalışmaları sonucunda belirlenen tane boyu dağılımları



Şekil 7.11 İkinci hidrosiklon grubu için madde denkliği ve modelleme çalışmaları sonucunda elde edilen tane boyu dağılımları

Sınıflandırıcı ekipmanlarda tek bileşenli verimlilik eğrisine göre yapılan matematiksel modelleme sonucunda elde edilmiş model parametrelerinin değerleri Çizelge 7.4'te verilmiştir.

Çizelge 7.4 Sınıflandırıcı ekipmanlara ait model parametreleri

Model Parametreleri	Tek Katlı Elek	1.Hidrosiklon Grubu	2.Hidrosiklon Grubu
Malzemeye Özgü Eğrinin Eğimini Tanımlayan Parametre, (α)	7.446	1.958	3.491
İncelerin İrilerle Birlikte Gelmesiyle Olta Etkisini Tanımlayan Parametre, (β)	0.000	0.000	0.000
Kaçak Miktarını Tanımlayan Parametre, (%)	99.868	72.284	54.082
Düzeltilmiş Tane boyu, d_{50c}	1.473	0.139	0.051
Düzenleme Parametresi, (β')	1.000	1.000	1.000

7.3 Baz Simülasyon Koşulu

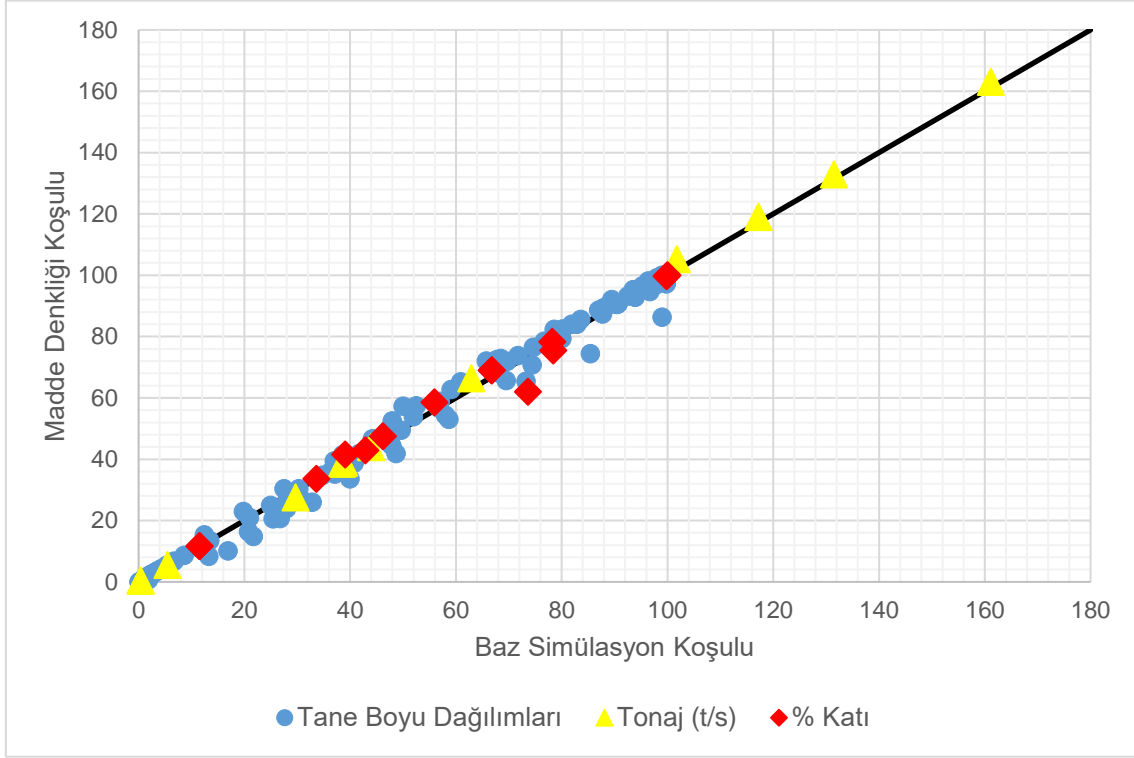
Öğütme devresinde bulunan ekipmanların matematiksel olarak modelleme işlemleri tamamlandıktan sonra numune alınan koşula ait simülasyon çalışması gerçekleştirilmiştir. Elde edilen simülasyon baz simülasyon koşulu olarak adlandırılmaktadır.

Baz simülasyon koşulu ile akış kollarında elde edilen tonaj, % katı ve P80 değerleri, madde denklığı sonucunda elde edilmiş aynı değerler ile karşılaştırılmıştır. Değerler arasındaki uyumun oldukça iyi olduğuna karar verildikten sonra baz simülasyon koşulunun, öğütme devresinde kapasitenin artırılması için gerçekleştirilecek tüm simülasyon çalışmalarının başlangıç noktası olabileceğine karar verilmiştir. Madde denklığı çalışmaları ve baz simülasyon çalışması sonucunda elde edilen akış hızları, % katı değerleri ve P80 değerleri Çizelge 7.5'te gösterilmektedir.

Çizelge 7.5 Madde denklığı ve baz simülasyon koşulunun karşılaştırılması

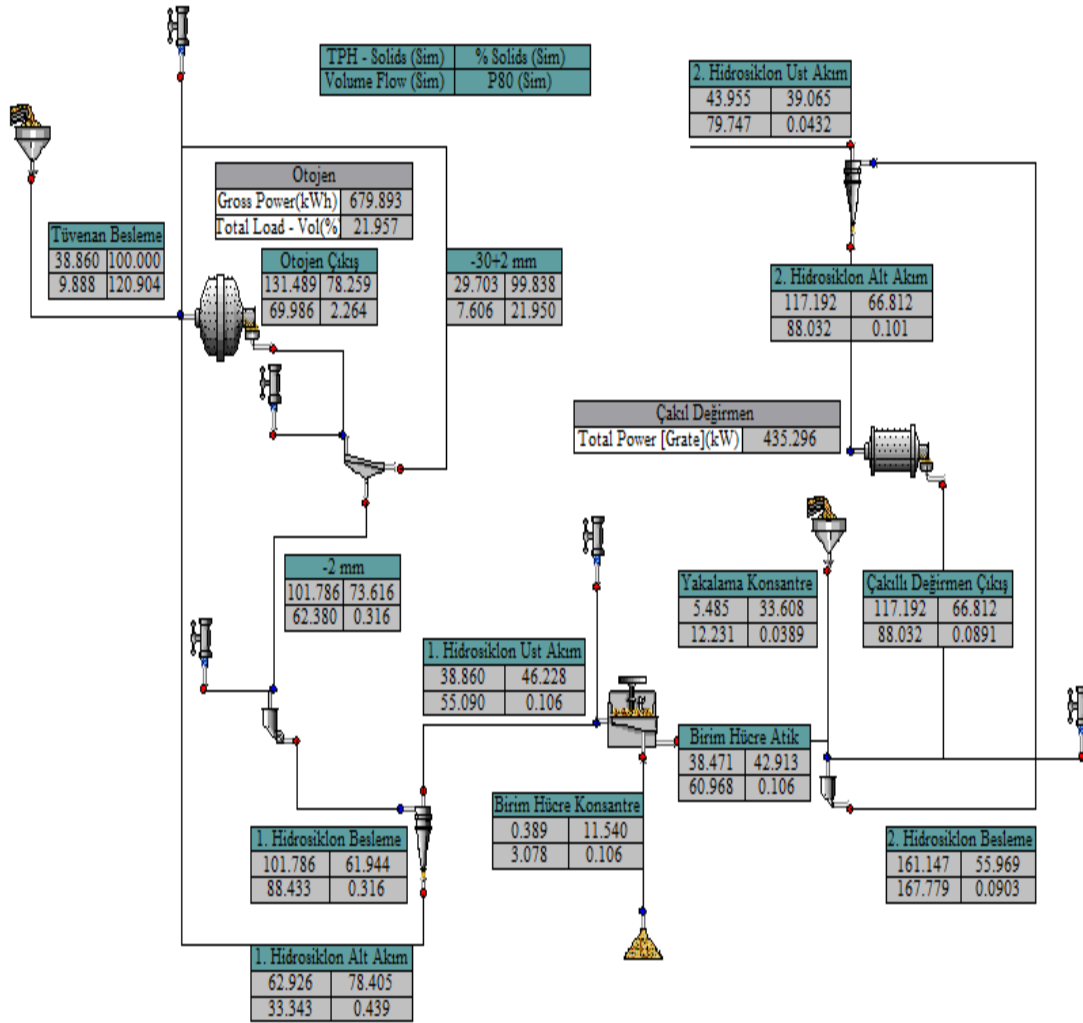
	Madde Denklığı Koşulu			Baz Simülasyon Koşulu		
	Katı (t/s)	% Katı	P80 (mm)	Katı (t/s)	% Katı	P80 (mm)
Tüvenan Besleme	38.86	100.00	120.87	38.86	100.00	120.90
Otojen Çıkış	132.82	78.26	1.63	131.49	78.26	2.26
Elek Üstü	27.58	99.7	30.02	29.7	99.84	21.95
Elek Altı	105.25	61.94	0.28	101.79	73.62	0.32
1. Hidrosiklon Alt Akım	66.39	75.46	0.40	62.93	78.40	0.44
1. Hidrosiklon Üst Akım	38.86	47.43	0.11	38.86	46.23	0.11
Birim Hücre Besleme	38.86	41.78	0.11	38.86	41.78	0.11
Birim Hücre Konsantre	0.39	11.64	0.11	0.39	11.54	0.11
Birim Hücre Atık	38.47	42.90	0.11	38.47	42.91	0.11
2. Hidrosiklon Besleme	162.98	58.49	0.09	161.15	55.97	0.09
2. Hidrosiklon Alt Akım	119.03	68.93	0.10	117.19	66.81	0.10
2. Hidrosiklon Üst Akım	43.96	41.47	0.045	43.95	39.07	0.04
Çakıllı Değ. Çıkış	119.03	68.93	0.085	117.19	66.81	0.09
2. Yakalama Konsantre	5.49	33.61	0.039	5.49	33.61	0.043

Madde denkliği ve baz sim¼lasyon koşulu sonucunda elde edilen tonaj, % katı ve tane boyu dağılımları verilerinin birbirleriyle olan uyumu Şekil 7.12’de verilmiştir.



Şekil 7.12 Madde denkliği çalışmaları ve baz sim¼lasyon koşulunun oluşturulması sonucunda elde edilen tonaj, % katı ve tane boyu dağılımları verilerinin uyumu

Baz simülasyonu koşuluna ait akış hızları ve % 80'inden geçen tane boyu değerleri akım şeması üzerinde Şekil 7.13'te verilmiştir.



Şekil 7.13 Baz simülasyonu koşulunda elde edilen akış hızları, % katı değerleri ve P80 değerleri

7.4 Öğütme Devresi Kapasitesinin Arttırılmasına Yönelik Yapılan Simülasyon Çalışmaları

Öğütme devresi kapasitesinin % 90 emre amadelilikle 550000 ton/yıl değerine arttırılması için yapılan simülasyon çalışmaları iki başlık altında toplanmıştır. İlk aşamada simülasyon çalışmalarında devreye herhangi yeni bir ekipman eklenmeden mevcut kapasitenin ve performansın arttırılması hedeflenmiştir. Tüvenan besleme tane boyu dağılımının devre kapasitesi ve performansı üzerindeki etkisi araştırılmıştır.

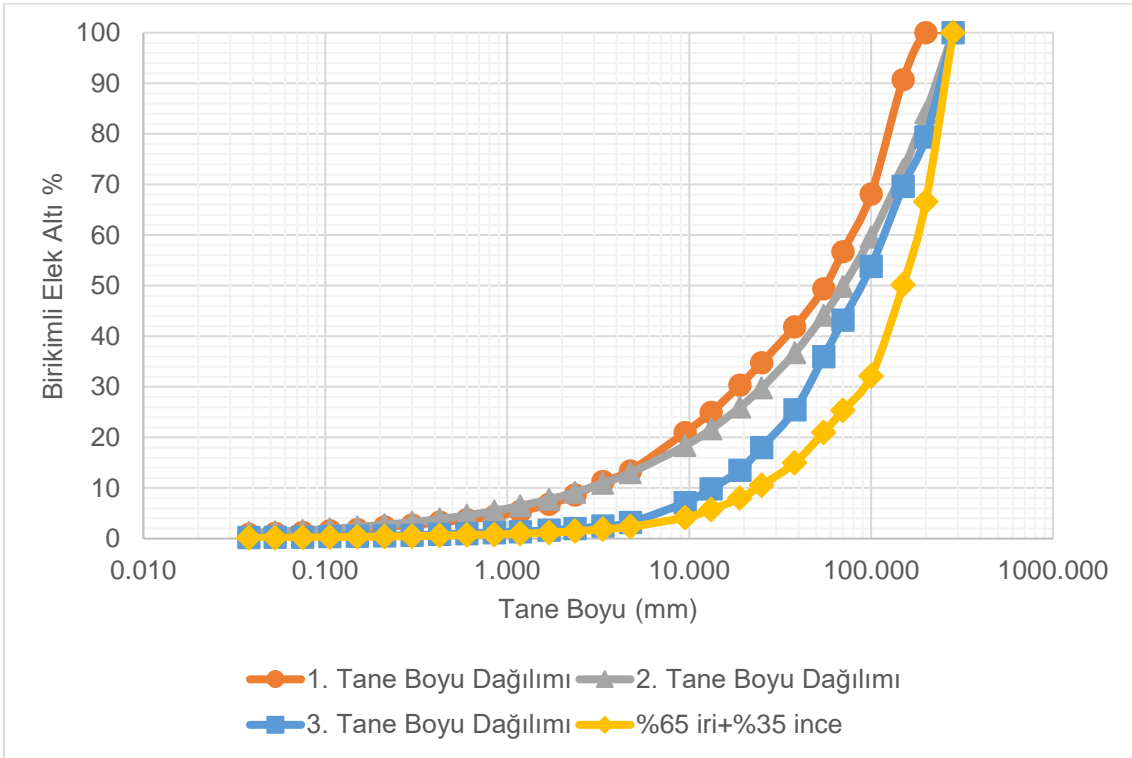
İkinci aşamada öğütme devresinin kapasitesinin ve performansının arttırılması için yatırım gerektiren alternatifler değerlendirilmiştir. Öğütme devresi için önerilen tane boyu dağılımının kullanılmasıyla beraber gündeme gelen alternatif seçenek, devrede bulunan hidrosiklonların daha verimli çalışan hidrosiklonlarla değiştirilmesidir. Öğütme devresinde yapılan simülasyon çalışmaları ile hidrosiklonların daha verimli çalıştırıldığı durumda elde edilecek olan veriler incelenmiştir. Verimli olarak çalıştırmaktaki amaç hidrosiklonların kaçak (by-pass) oranı değerlerinin düşürülmesidir. Su ile birlikte alt akıma taşınan ince tane boyulu malzemelerin çakıl değirmeni içerisinde gereksiz yük oluşturduğu anlaşılmaktadır.

Mevcut durumdaki devreye önerilen tane boyu ile besleme yapıldığı ve siklonların daha verimli çalıştırıldığı durumda konik kırıcı eklenmesi seçeneği değerlendirilmiştir. Önerilen akım şemasında konik kırıcının otojen değirmen ile kapalı devre olarak çalıştırılması ve otojen değirmen çıkışındaki kritik boyulu tanelerin kırılarak otojen değirmene geri beslenmesi hedeflenmiştir. Böylece otojen değirmen yükünün azalması ile kapasite artışı sağlanmıştır.

Yatırım gerektiren üçüncü alternatif olarak devrede bulunan hidrosiklonların yerine ince boyda eleme yapabilen ve yüksek frekans değerlerinde çalışan eleklerin kullanılması gündeme gelmiştir. Yatırım ve işletme maliyetleri hidrosiklonlara göre daha yüksek olan bu elekler çok daha keskin boyut ayırımı yapabilmektedir. Önerilen tane boyu dağılımının kullanıldığı ve konik kırıcının eklendiği akım şemasında hidrosiklonlar ince boyda eleme yapabilen elekler ile değiştirilmiştir. Simülasyon çalışması sonucunda ince boyda tanelerin yüksek performans ile elendiği ve eleklerin düşük kaçak (by-pass) oranına sahip olduğu görülmüştür. Yatırım gerektiren alternatiflerde son seçenek olarak çakıllı değirmen, bilyalı değirmen ile değiştirilmiştir.

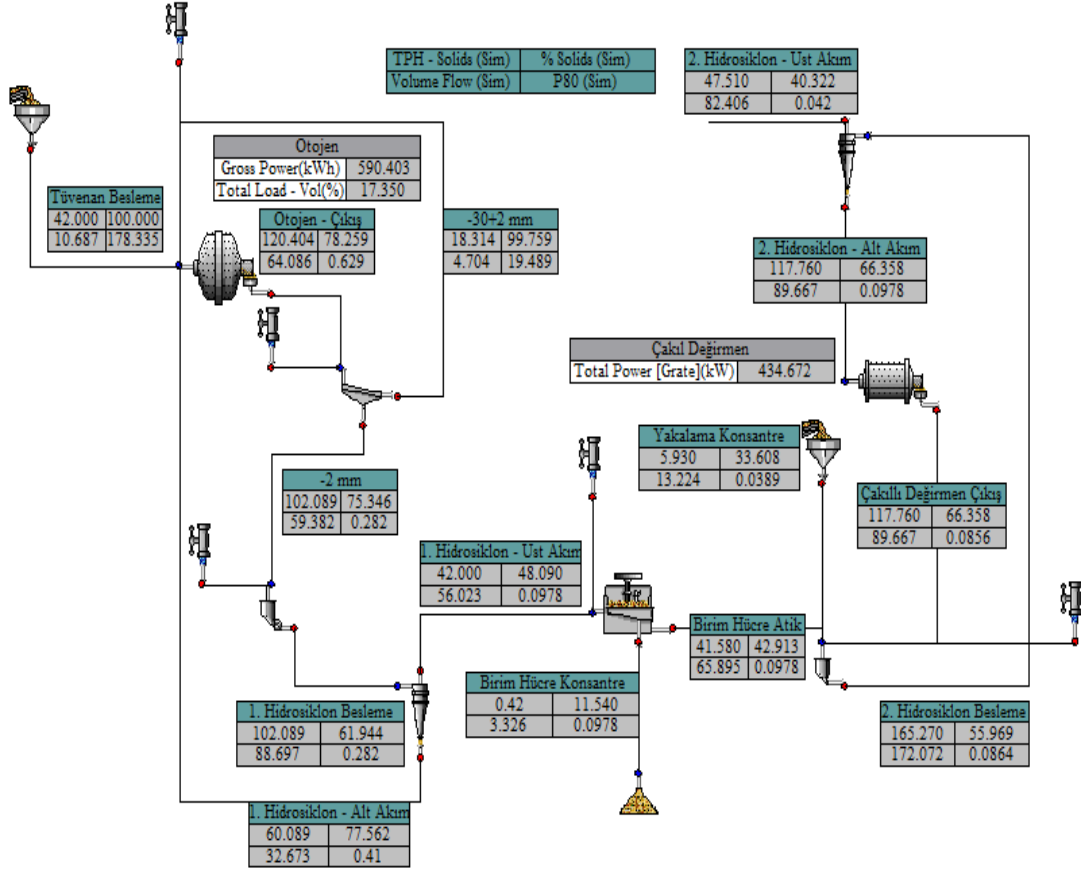
7.4.1 Yatırım Gerektirmeyen Alternatiflerin Değerlendirilmesi

İlk etapta tüvenan beslemenin tane boyu dağılımı üzerinde çalışmalar yürütülmüştür. Tüvenan beslemeye ait farklı tane boyu dağılımları ile gerçekleştirilen simülasyon çalışmalarında öğütme kapasitesinde artış olabileceği gösterilmiştir. Simülasyon çalışmalarında kullanılan bir numaralı tane boyu dağılımı mevcut numune alma koşulunda tesis beslemesinin tane boyu dağılımıdır. İkinci tane boyu dağılımı, Gaudin ve Schuhmann eşitliğinde α parametresinin 0.5 olarak alındığı koşulda elde edilen tane boyu dağılımıdır. Bu dağılım, öğütme devresi için önerilen tane boyu dağılımıdır. Üçüncü tane boyu dağılımı ise daha önceki çalışmalarda tesisten elde edilmiş olan tane boyu dağılımına aittir. Dördüncü tane boyu dağılımı tüvenan beslemenin 100 mm'lik elekten elenmesi sonucunda elek üstü ve elek altı malzemenin sırasıyla % 65 ve % 35 oranlarında karıştırılmasıyla elde edilmiş tane boyu dağılımıdır. Bu tüvenan boyut dağılımları ile yapılan simülasyon çalışmalarında tüvenan besleme tonajını 38.86 ton/saat değerinden 42 ton/saat değerine çıkarmak mümkün olmuştur. Simülasyon çalışmalarında kullanılan farklı tane boyu dağılımlarını gösteren grafik Şekil 7.14'te verilmiştir. Tane boyu dağılımı verileri EK – 27'de sunulmaktadır.



Şekil 7.14 Simülasyon çalışmalarında kullanılan farklı tane boyu dağılımları

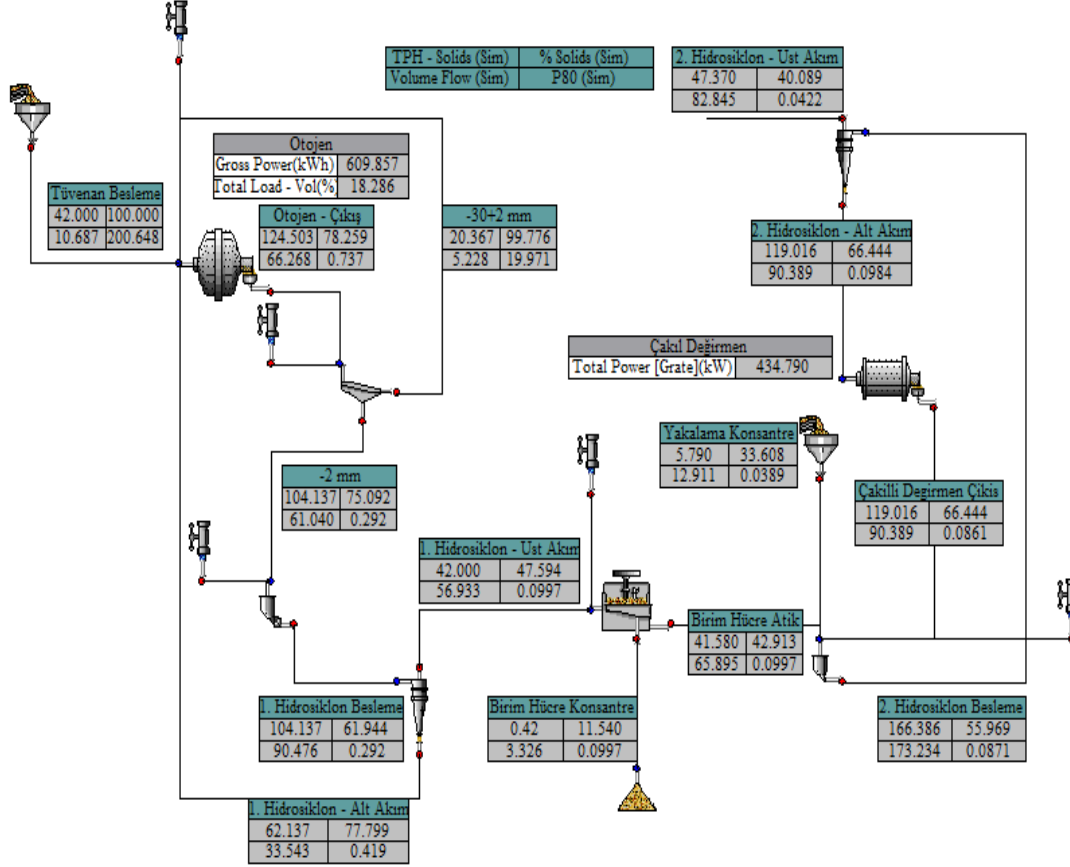
İkinci tane boyu dağılımı verileri kullanılarak yapılan simülasyon çalışması sonucunda elde edilen akış hızları ve % 80'inden geçen tane boyu değerleri Şekil 7.15'te akım şeması üzerinde gösterilmiştir. Elde edilen tüm veriler EK – 28'de verilmiştir.



Şekil 7.15 İkinci tane boyu dağılımı kullanılarak yapılan simülasyon çalışmasında elde edilen akış hızları, % katı ve P80 değerleri

İkinci tane boyu dağılımı, öğütme devresi için önerilen tane boyu dağılımıdır. Otojen değirmenin güç tüketimi baz simülasyon koşulu değeri olan 679.893 kWh değerinden 590.403 kWh değerine düştüğü görülmektedir. Ayrıca otojen değirmen ürününün tane boyu inceliği artırılarak değirmene olan geri dönüş yükü azaltılmıştır.

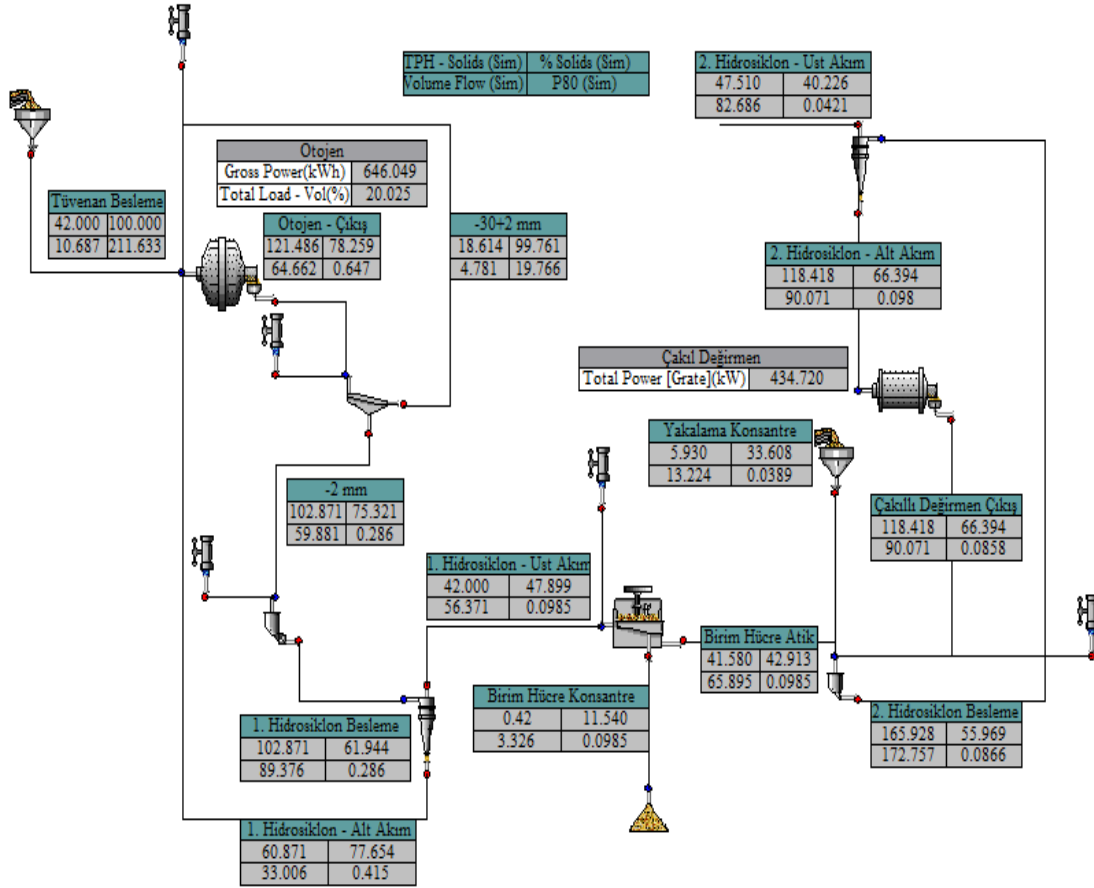
Üçüncü tane boyu dağılımı ile yapılan simülasyon çalışması sonucunda elde edilen akış hızları ve % 80'inden geçen tane boyu değerleri akım şeması üzerinde Şekil 7.16'da verilmiştir. Simülasyon sonucunda elde edilen tüm veriler EK – 29'da sunulmuştur.



Şekil 7.16 Üçüncü tane boyu dağılımı kullanılarak yapılan simülasyon çalışmasında elde edilen akış hızları, % katı ve P80 değerleri

Daha önceki dönemde gerçekleştirilmiş olan çalışma sonucunda elde edilen tane boyu dağılımı kullanılarak yapılan simülasyonda da öğütme devresi kapasitesinin 42 ton/saat değerine çıkarılabileceği belirlenmiştir. Fakat otojen değirmen güç tüketim değeri 609.857 kWh olmuştur. Baz simülasyon koşuluna göre daha düşük güç tüketimine sahip olmasına rağmen önerilen tane boyu dağılımının simülasyonu sonucunda elde edilmiş güç değerine kıyasla yüksek olduğu görülmektedir. Özellikle besleme içerisindeki iri tane oranının artırılması sonucunda daha iyi bir öğütme performansı alınacağı açıkça görülmektedir. Numune alınan koşulda tüvenan besleme içerisinde 200 mm tane boyundan büyük tanelere rastlanmamıştır. 200 mm'den daha iri tane boyuna sahip tanelerin besleme içerisinde bulunması otojen değirmen içerisinde daha iyi bir öğütücü ortam oluşturacağını göstermektedir.

Yatırım gerektirmeyen alternatiflerinin değerlendirilmesinde son olarak tesiste çeneli kırıcı ıkışıında bulunan tek katlı eleğin yeniden devreye alınması durumu gözden geçirilmiştir. Tüvenan beslemenin tek katlı 100 mm'lik elekten elenmesi sonucunda iri ve ince malzeme stokları oluşturulmasının ve bunların farklı oranlarda birleştirilmesinin öğütme performansını nasıl etkileyeceği araştırılmıştır. İri boylu tanelerin tüvenan besleme içerisinde bulunmasının daha iyi bir öğütme ortamı sağladığı ve öğütme performansını arttırdığı önceki simülasyon çalışmalarında incelenmiştir. Oluşturulan tüvenan beslemenin % 65'i 100 mm'lik eleğin üzerinde kalan malzemeden % 35'i ise elek altı malzemeden birleştirilerek tesise beslenmiştir. Tüvenan besleme tonajının 42 ton/saat değerine çıkabileceği belirlenmiştir. Otojen değirmenin güç tüketimi artış göstermesine rağmen baz simülasyon koşuluna ait güç tüketim değerinin altında kalmıştır. Simülasyon alışması sonucunda öğütme devresinde oluşacak akış hızları ve % 80'inden geçen tane boyu değerleri Şekil 7.17'de gösterilmektedir. Elde edilen tüm simülasyon sonuçları EK – 30'da verilmektedir.



Şekil 7.17 Dördüncü tane boyu dağılımı kullanılarak yapılan simülasyon çalışmasında elde edilen akış hızları, % katı ve P80 değerleri

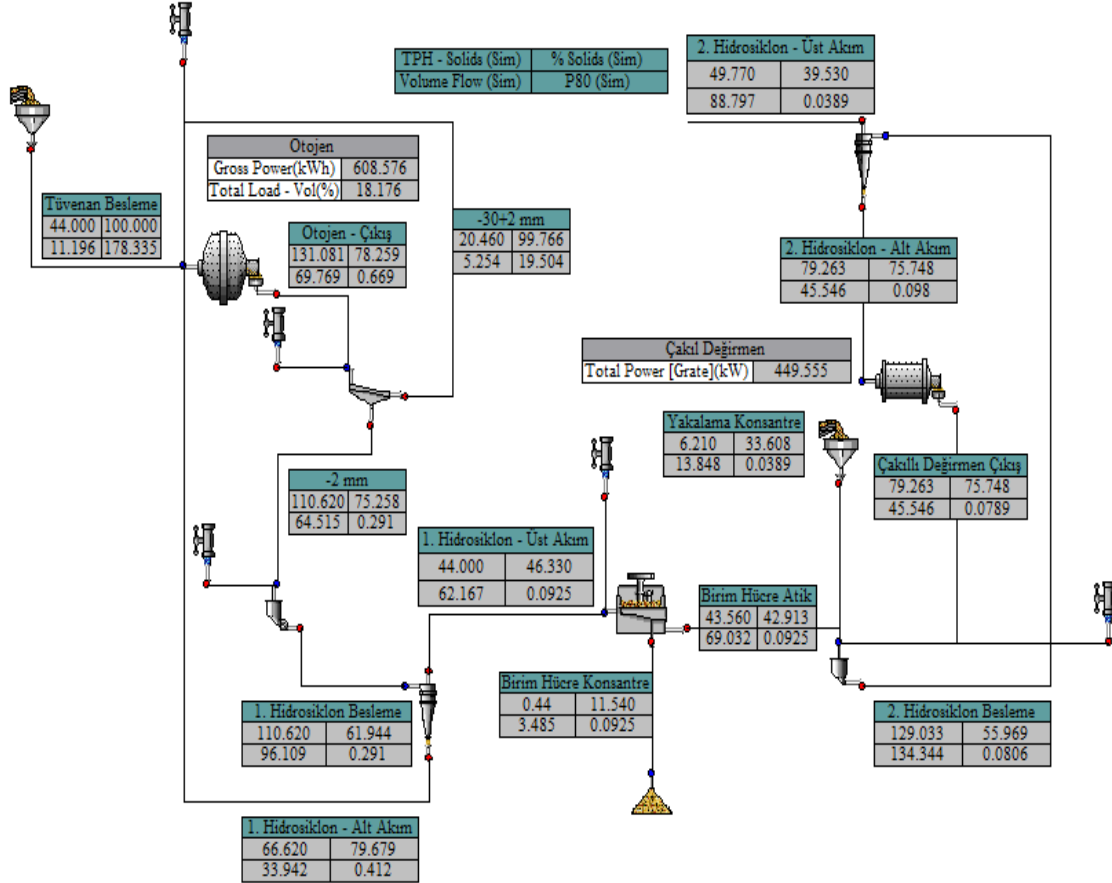
7.4.2 Yatırım Gerektiren Alternatiflerin Değerlendirilmesi

Öğütme devresinin kapasitesinin artırılması için yatırım gerektiren alternatifler bu başlık altında değerlendirilmiştir. Simülasyon çalışmalarında tüvenan besleme için önerilen tane boyu dağılımı kullanılmıştır. İlk olarak öğütme devresinde bulunan hidrosiklonların daha verimli hidrosiklonlar ile değiştirilmesine karar verilmiştir. Daha verimli hidrosiklonlar kullanılarak yapılan simülasyon çalışmalarında öğütme devresinin kapasitesi 44 ton/saat değerine ulaşmıştır. Daha iyi sınıflandırma performansı sayesinde öğütme devresinin tüvenan besleme tonajında artış meydana gelmiştir. Baz simülasyon koşulunda ve siklonların verimli olduğu koşulda kullanılan model parametreleri karşılaştırmalı olarak Çizelge 7.6'da verilmiştir.

Çizelge 7.6 Baz simülasyon koşulu ve siklonların verimli olduğu koşulda kullanılan model parametreleri

Model Parametreleri	1.Hidrosiklon Grubu Baz Koşul	1.Hidrosiklon Grubu Verimli Koşul	2.Hidrosiklon Grubu Baz Koşul	2.Hidrosiklon Grubu Verimli Koşul
Malzemeye Özgü Eğrinin Eğimini Tanımlayan Parametre (α)	1.958	2.500	3.491	3.000
İncelerin İrilerle Birlikte Gelmesiyle Olta Etkisini Tanımlayan Parametre (β)	0.000	0.000	0.000	0.000
Kaçak Miktarını Tanımlayan Parametre (%)	72.284	75.000	54.082	75.000
Düzeltilmiş Tane boyu. d_{50c}	0.139	0.130	0.051	0.045
Düzenleme Parametresi (β')	1.000	1.000	1.000	1.000

Verimli siklonlar kullanılarak yapılan simülasyon sonucunda elde edilen akış hızları ve % 80'inden geçen tane boyu değerleri Şekil 7.18'de akım şeması üzerinde gösterilmektedir. Simülasyon çalışmasında elde edilen tüm değerler EK – 31'de verilmektedir.



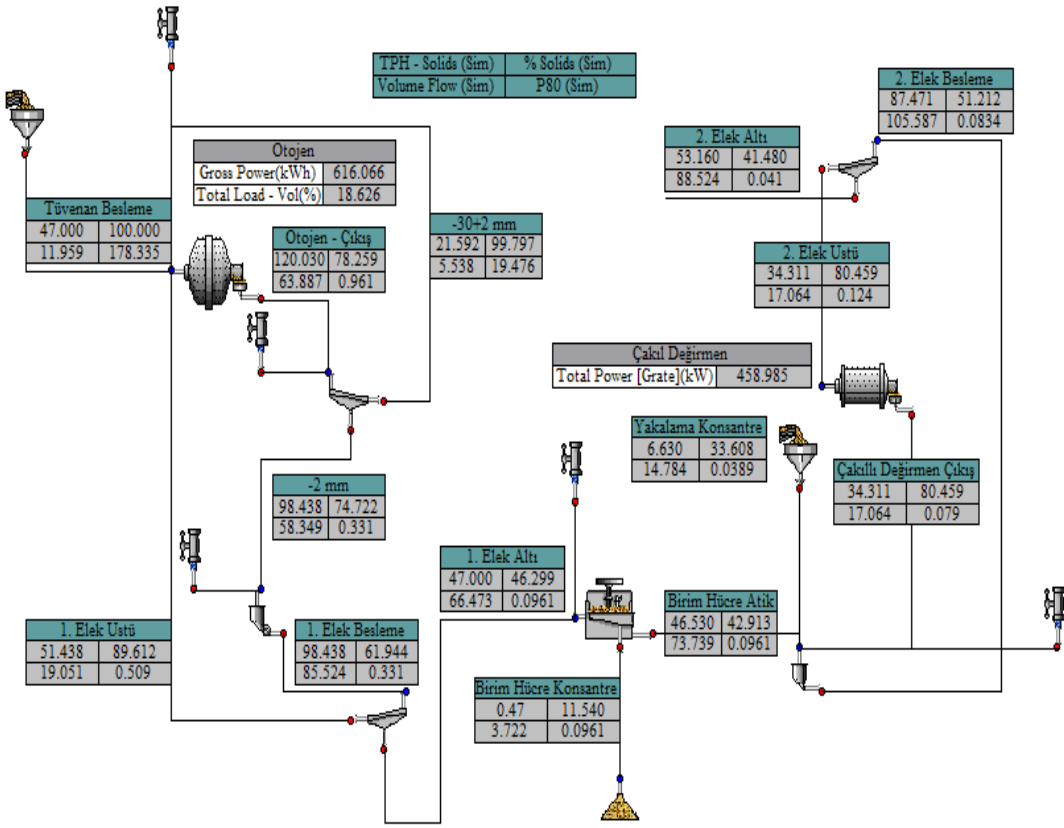
Şekil 7.18 Verimli siklonlar ile yapılan simülasyon çalışmasında elde edilen akış hızları, % katı ve P80 değerleri

Bu durum incelendiğinde baz simülasyon koşulunda 117.192 ton/saat olan çakıllı değirmen beslemesi verimli bir sınıflandırma işlemi sonucunda 79.263 ton/saat değerine düşmüştür. Su ile alt akıma yapılan kaçak (by-pass) oranı azaldığından çakıllı değirmen içerisindeki yük miktarında azalmaktadır.

Yatırım gerektiren ikinci alternatif ise devrede bulunan hidrosiklonların yüksek frekans değerlerinde yaş eleme yapabilen elekler ile değiştirilmesidir. Bu elekler sayesinde ince boydaki taneler yüksek performans ile elenebilmektedir. Ayrıca düşük kaçak oranlarına sahip olmalarından dolayı cevher hazırlama tesislerinde sıkça tercih edilmektedir. Yüksek frekanslı yaş elekler için kullanılan model parametreleri Çizelge 7.7’de verilmiştir. Bu eleklerin kullanıldığı durumda yapılan simülasyon çalışmasına ait akış hızları ve % 80’inden geçen tane boyu değerleri akım şeması üzerinde Şekil 7.19’da verilmiştir. Simülasyon çalışmasında öğütme devresi için önerilen tane boyu dağılımı kullanılmıştır. Simülasyon çalışmasında elde edilen tüm veriler EK – 32’de gösterilmektedir.

Çizelge 7.7 Yüksek frekanslı yaş elekler için kullanılan model parametreleri

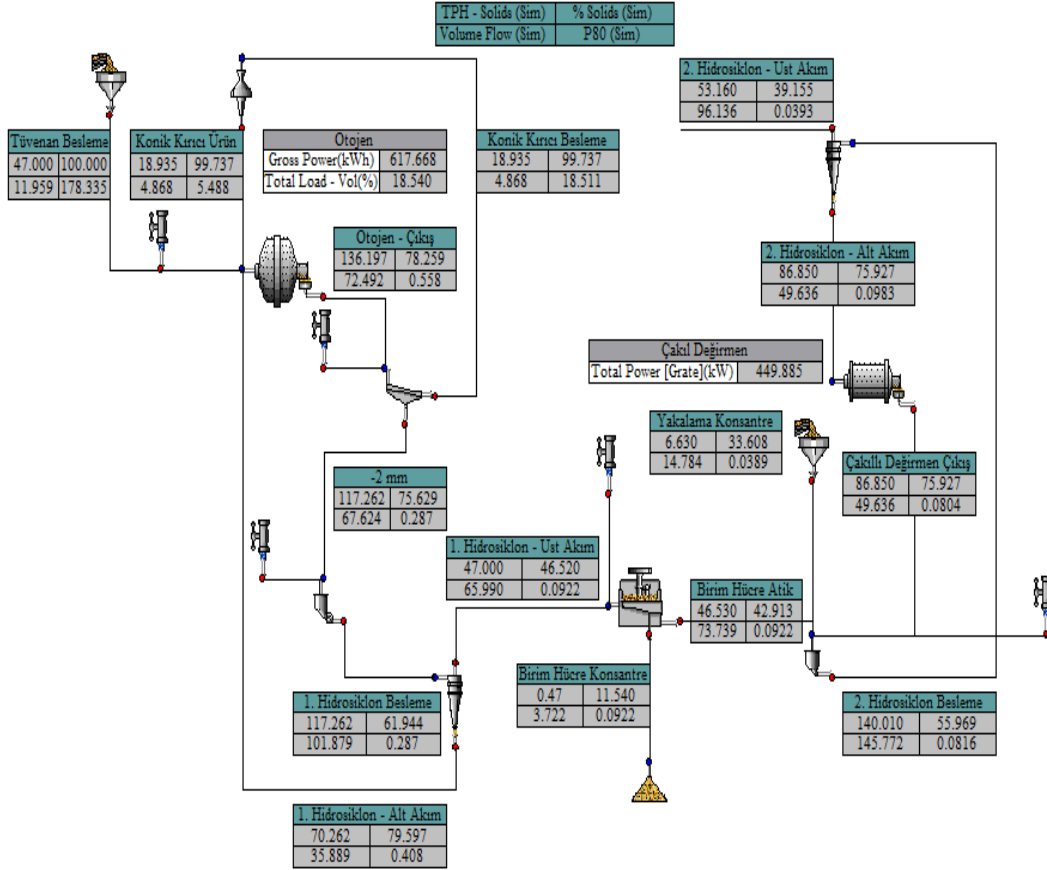
Model Parametreleri	1.Hidrosiklon Grubu Baz Koşul	1.Yüksek Frekanslı Elek	2.Hidrosiklon Grubu Baz Koşul	2.Yüksek Frekanslı Elek
Malzemeye Özgü Eğrinin Eğimini Tanımlayan Parametre (α)	1.958	6.580	3.491	6.580
İncelerin İrilerle Birlikte Gelmesiyle Olta Etkisini Tanımlayan Parametre (β)	0.000	0.000	0.000	0.000
Kaçak Miktarını Tanımlayan Parametre (%)	72.284	90.140	54.082	90.140
Düzeltilmiş Tane boyu d_{50c}	0.139	0.160	0.051	0.063
Düzenleme Parametresi (β')	1.000	1.000	1.000	1.000



Şekil 7.19 Yüksek frekansta yaş eleme yapabilen elekler ile yapılan simülasyon çalışması sonucunda elde edilen akış hızları, % katı ve P80 değerleri

Hidrosiklonların yerine yüksek frekansta yaş eleme yapabilen eleklerin tercih edilmesi sonucunda tüvenan besleme tonajı 47 ton/saat değerine ulaşmıştır. Ayrıca su ile alt akıma kaçak yapan malzeme miktarı azaldığından çakıllı değirmen beslemesi 34.31 ton/saat değerine düşmüştür.

Yatırım gerektiren alternatiflerin değerlendirilmesindeki üçüncü seçenek mevcut durumdaki devreye önerilen tane boyu ile besleme yapıldığı ve siklonların daha verimli çalıştırıldığı durumda konik kırıcı eklenmesidir. Önerilen akım şemasında konik kırıcının otojen değirmen ile kapalı devre olarak çalıştırılması ve otojen değirmen çıkışındaki kritik boylu tanelerin kırılarak otojen değirmene geri beslenmesi durumu incelenmiştir. Böylece otojen değirmen yükünün azalması ile kapasite artışı sağlanmıştır. Kırıcı eklenmesi ile 44 ton/saat olan tüvenan besleme tonajı 47 ton/saat değerine çıkarılmıştır. Simülasyon çalışması sonucunda elde edilen akış hızları ve % 80'inden geçen tane boyu değerleri Şekil 7.20'da gösterilmektedir. Simülasyon sonucunda elde edilen tüm veriler EK – 33'te sunulmaktadır.



Şekil 7.20 Devreye konik kırıcı eklenmesi durumunda oluşacak akış hızları, % katı ve P80 değerleri

Yatırım gerektiren alternatiflerde dördüncü seçenek, hem yüksek frekansta performanslı bir şekilde yaş eleme yapabilen eleklerin kullanıldığı durum hem de konik kırıcı eklendiği durumun beraber olarak değerlendirilmesidir. Gerçekleştirilen simülasyon çalışması sonucunda tüvenan besleme tonajı 51 ton/saat değerine ulaşmıştır. En yüksek tüvenan besleme tonajına bu devre konfigürasyonu ile ulaşılmıştır. Elde edilen akış hızları ve tane boyu değerleri akım şeması üzerinde Şekil 7.21’de gösterilmiştir. Simülasyon sonucunda elde edilen tüm veriler EK – 34’te verilmiştir.

8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Madde denkliği çalışmaları sonucunda ölçülen ve hesaplanan verilerin birbirleriyle oldukça uyumlu olduğu belirlenmiştir. Elde edilen veri kalitesinin modelleme ve simülasyon çalışmaları için kullanılabilir nitelikte olduğu anlaşılmaktadır.

Performans değerlendirme çalışmaları kapsamında, birinci dönemde numune alınan koşula ait öğütme devresinin performansının mevcut ekipmanlar için oldukça iyi olduğu belirlenmiştir. Öğütme devresinde bulunan birinci ve ikinci hidrosiklon gruplarının su ile alt akıma yaptıkları kaçak oranının azaltılması için daha verimli çalışan hidrosiklonlar ile değiştirilmesi önerilmektedir.

İki modelin kırılma hızı fonksiyonları karşılaştırıldığında değişken hızlar modelinde 10 mm tane boyuna kadar olan tanelerin daha hızlı bir şekilde kırıldığı görülmektedir. Leung modelinde ise iri tane boylarında kırılmanın daha hızlı gerçekleştiği anlaşılmaktadır. Kırılma hızı fonksiyonlarındaki bu farklılık, malzemenin değerimenden çıkış hızını etkilemektedir.

Baz simülasyon koşulu ile akış kollarında elde edilen tonaj, % katı ve P80 değerleri, madde denkliği sonucunda elde edilmiş aynı değerler ile karşılaştırılmıştır. Değerler arasındaki uyumun oldukça iyi olduğuna karar verildikten sonra baz simülasyon koşulunun, öğütme devresinde kapasitenin arttırılması için gerçekleştirilecek tüm simülasyon çalışmalarının başlangıç noktası olabileceğine karar verilmiştir.

Yatırım gerektirmeyen alternatiflerin değerlendirilmesinde, farklı tüvenan tane boyu dağılımları kullanılarak tüvenan besleme tonajının 42 ton/saat değerine çıkarılabileceği gösterilmiştir.

Yatırım gerektiren alternatiflerin değerlendirilmesinde, hidrosiklonların daha düşük by pass değerine sahip yüksek frekans değerlerinde yaş eleme yapabilen elekler ile değiştirilmesi ve otojen değerimen çıkışındaki kritik boylu tanelerin konik kırıcıda kırılması sonucunda, tüvenan besleme tonajı 51 ton/saat değerine çıkarılmıştır. Tüm bu sonuçlar değerlendirildiğinde, öğütme devresi kapasitesinin % 90 emre amadelilikle 400000 ton/yıl değerine çıkarılabileceği belirlenmiştir.

KAYNAKLAR

- [1] İ. Ketin, "Yerbilimlerinin 50 Yıllık Cumhuriyet Dönemindeki Gelişmesi," **1973**.
- [2] T. Doğru and L. Ergün, "KBI Samsun Bakir İzabe Tesisleri Cüruf Öğütme Devresinin Modellemesi Ve Simülasyonu," *Madencilik*, vol. 43, no. 3, pp. 13–26, **2004**.
- [3] N. Yıldız, *Cevher Hazırlama ve Zenginleştirme*, 2.Baskı ed. Ankara: Ertem Basım Yayın Dağıtım Sanayi ve Ticaret LTD.ŞTİ., **2010**.
- [4] T. K. T.J. Napier Munn, S.Morrell, R.D. Morison, *Mineral Comminution Circuits Their Operation and Optimisation*, JKMRCC Mono. Queensland 4068: Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre, **2005**.
- [5] A. T. Cebeci, "Bilgisayar Destekli Otojen Öğütme Devresi Tasarımı ve Optimizasyonu," Hacettepe Üniversitesi, **2011**.
- [6] R. MacPherson, A., R. Turner, R., "No Title," in *Mineral Processing Plant Design*, B. Mular, Bhappu, R., Ed. New York: SME-AIME, **1980**, pp. 279–305.
- [7] B. Lewis, F.m., Coburn, J., L., Bhappu, R., "No Title," *Miner. Eng.*, vol. 28, p. 29, **1976**.
- [8] Yıldız, N., *Öğütme*. Ankara: Kozan Ofset Matbaacılık ve Ticaret Limited Şirketi, **1999**.
- [9] J. Starkey, "Accurate , Economical Grinding Circuit Design Using Spi and Bond," no. October, pp. 270–279, **2003**.
- [10] R. Berenbaum, "Analysis of the shatter breakage of coal using a matrix method," *J. Institute Fuel*, vol. 34, pp. 367–374, **1961**.
- [11] R. J. Norgate, T.E. Tomsitt D.F. Batterham, "Computer simulation of the degradation of lump ores during transportation and handling," in *Bulk Materials Handling Conference*, **1986**.
- [12] J. Gross, "Crushing and Grinding," *U.S. Bur. Mines Bull.*, vol. 402, pp. 1–148, **1938**.
- [13] E. L. Piret, "Fundamental Aspects of Grinding," *Chem. Eng. Prog.*, vol. 49, pp. 56–63, **1953**.
- [14] G. L. Fairs, "A method of predicting the performance of commercial mills in the fine grinding of brittle materials," *Trans Inst Min Met.*, vol. 63, pp. 211–240, **1954**.
- [15] K. Schönert, "Role of fracture physics in Schönert, K. (1972). Role of fracture physics in understanding comminution phenomena. *Trans SME/AIME*, 252, 21–26. understanding comminution phenomena," *Trans SME/AIME*, vol. 252, pp. 21–26, **1972**.
- [16] D. Brown, "Private communication, and JKMRCC internal reports," **1992**.
- [17] S. Morrell, "A method for predicting the specific energy requirement of comminution circuits and assessing their energy utilisation efficiency," *Miner. Eng.*, vol. 21, no. 3, pp. 224–233, **2008**.

- [18] S. Morrell, "Predicting the specific energy of autogenous and semi-autogenous mills from small diameter drill core samples," *Miner. Eng.*, vol. 17, no. 3, pp. 447–451, **2004**.
- [19] S. Morrell, "Predicting the overall specific energy requirement of crushing, high pressure grinding roll and tumbling mill circuits," *Miner. Eng.*, vol. 22, no. 6, pp. 544–549, **2009**.
- [20] S. Morrell, "An alternative energy-size relationship to that proposed by Bond for the design and optimisation of grinding circuits," *Int. J. Miner. Process.*, vol. 74, no. 1–4, pp. 133–141, **2004**.
- [21] S. Morrell, "Rock Characterisation for High Pressure Grinding Rolls Circuit Design," *Proc Int. Autogenous Semi Autogenous Grind. Technol.*, no. April, p. vol IV, pp 267–278, **2006**.
- [22] J. C. A. Rowland, "Comparison of work indices calculated from operating data with those from laboratory test data," in *10 th International Mineral Processing Congress*, **1973**.
- [23] P. Wickham, "Comminution of pebbles and fine ore," University of Queensland Australia, **1972**.
- [24] Stanley, G., G., "Mechanisms in the autogenous mill and their mathematical representation," *J. S. Afr. I.M.M.*, no. November, pp. 77–98, **1974**.
- [25] Gault, G., A., "Modelling and Control of Autogenous Grinding Circuit," University of Queensland, Australia, **1975**.
- [26] M. Austin, L. G. Weymont, N.P. Prisbrey, K A., Hoover, "Preliminary Results on the Modeling of Autogenous Grinding," in *14th Appl. of Compute Methods in Min Inds.*, **1977**, pp. 207–226.
- [27] M. Digre, "Autogenous Grinding Testing and Scale Up," in *Proc Auto Grind Seminar*, **1979**, pp. 1–20.
- [28] A. J. Duckworth, C. A. Lynch, "The effect of some operating variables on autogenous grinding circuits and their implications for control," in *C.I.M. XIV International Mineral Processing Congress*, **1982**.
- [29] C. A. Barahona, "Modelling and simulation of semi-autogenous grinding systems," The Pennsylvania State University, **1984**.
- [30] K. Leung, "An Energy Based Ore Specific Model for Autogeneous and Semi Autogeneous Grinding," University of Queensland, **1987**.
- [31] S. Morrell, "A new autogenous and semi-autogenous mill model for scale-up, design and optimisation," *Miner. Eng.*, vol. 17, pp. 437–445, **2003**.
- [32] J. L. Ahlberg, J.H., Nilson, E.N., Walsh, *The theory of splines and their applications*, vol. 38. New York, London: Academic Press, **1967**.
- [33] W. J. Narayanan, S.S., Whiten, "Determination of comminution characteristics from single particle breakage tests and its application to ball mill scale-up," *Trans. Ins. Min. Met.*, vol. 97, pp. C115–C124, **1988**.
- [34] W. J. Whiten, "Ball mill simulation using small calculators," *Proc. AusIMM*, vol. 258, **1976**.

EKLER

EK – 1

Numune alma çalışması sırasında otojen değirmen tarafından çekilen zamana bağlı amper değerleri

Otojen Değirmen	
Saat	Amper (A)
16:30	65
16:40	69
16:50	72
17:00	70
17:10	70
17:20	69
17:30	70
17:40	70
17:50	70
18:00	70
18:10	70
18:20	70
18:30	70
18:40	71
18:50	71
19:00	70
19:10	68

EK – 2

Numune alma çalışması sırasında çakıllı değirmen tarafından çekilen zamana bağlı amper değerleri

Çakıllı Değirmen	
Saat	Amper (A)
16:30	44
16:40	45
16:50	47
17:00	47
17:10	46
17:20	45
17:30	45
17:40	44
17:50	44
18:00	44
18:10	44
18:20	44
18:30	43
18:40	42
18:50	43
19:00	42
19:10	41

EK - 3

Otojen öğütme devresinin madde denklığı çalışmalarında kullanılan ölçülen ve hesaplanan tane boyu dağılımları

Tane Boyu (mm)	Tüvenan Besleme		Otojen Değirmen Çıkışı		Elek Üstü		Elek Altı	
	Ölçülen	Hesaplanan	Ölçülen	Hesaplanan	Ölçülen	Hesaplanan	Ölçülen	Hesaplanan
200	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
150	90.73	90.73	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
100	68.09	68.09	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
70	56.75	56.75	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
55	49.41	49.41	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
38	41.86	41.86	97.13	97.17	85.56	86.35	100.00	100.00
25	34.75	34.75	94.64	94.69	73.03	74.43	100.00	100.00
19	30.32	30.32	92.77	92.81	63.62	65.39	100.00	100.00
13	24.94	24.94	90.47	90.52	52.04	54.34	100.00	100.00
9.50	20.98	20.98	89.40	89.43	46.65	49.09	100.00	100.00
4.75	13.40	13.40	85.37	85.53	26.37	30.30	100.00	100.00
3.35	11.27	11.27	83.86	84.00	18.77	22.95	100.00	100.00
2.36	8.63	8.63	82.28	82.41	10.82	15.28	100.00	100.00
1.70	6.78	6.78	80.13	80.21	0.00	4.99	99.92	99.92
1.18	5.39	5.39	78.03	78.45	0.00	0.69	98.83	98.83
0.85	4.40	4.40	75.59	76.47	0.00	0.00	96.52	96.51
0.60	3.75	3.75	72.99	73.82	0.00	0.00	93.17	93.17
0.425	3.23	3.23	69.64	70.19	0.00	0.00	88.58	88.58
0.300	2.68	2.68	64.24	65.25	0.00	0.00	82.34	82.34
0.212	2.32	2.32	56.28	57.36	0.00	0.00	72.42	72.40
0.150	1.81	1.81	46.48	46.63	0.00	0.00	58.82	58.85
0.106	1.51	1.51	36.10	35.15	0.00	0.00	44.33	44.36
0.075	1.25	1.25	27.74	26.61	0.00	0.00	33.55	33.58
0.053	1.04	1.04	21.40	20.57	0.00	0.00	25.97	25.97
0.038	0.86	0.86	16.97	16.38	0.00	0.00	20.88	20.68

EK – 4

Birinci hidrosiklon grubunun madde denklığı çalışmalarında kullanılan ölçülen ve hesaplanan tane boyu dağılımları

Tane Boyu (mm)	1. Hidrosiklon Besleme		1. Hidrosiklon Alt Akım		1. Hidrosiklon Üst Akım	
	Ölçülen	Hesaplanan	Ölçülen	Hesaplanan	Ölçülen	Hesaplanan
200	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
150	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
100	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
70	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
55	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
38	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
25	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
19	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
13	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
9.50	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
4.75	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
3.35	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
2.36	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
1.70	99.92	99.92	99.83	99.87	100.00	100.00
1.18	98.83	98.83	98.00	98.14	100.00	100.00
0.85	96.52	96.51	94.17	94.47	100.00	100.00
0.60	93.17	93.17	89.07	89.17	99.97	100.00
0.425	88.58	88.58	81.78	81.89	99.90	100.00
0.300	82.34	82.34	72.02	72.01	99.57	100.00
0.212	72.42	72.40	56.40	57.32	97.73	98.15
0.150	58.82	58.85	39.83	39.41	91.68	92.07
0.106	44.33	44.36	24.35	23.88	79.02	79.34
0.075	33.55	33.58	15.40	14.82	65.40	65.65
0.053	25.97	25.97	10.46	10.11	52.80	53.04
0.038	20.88	20.68	7.81	8.31	41.11	41.81

EK - 5

Yakalama konsantresinin ve birim hücre etrafındaki akışların madde denklığı çalışmalarında kullanılan ölçülen ve hesaplanan tane boyu dağılımları

Tane Boyu (mm)	1. Hidrosiklon Üst Akım		Birim Hücre Konsantre		Birim Hücre Atık		2. Yakalama Konsantre	
	Ölçülen	Hesaplanan	Ölçülen	Hesaplanan	Ölçülen	Hesaplanan	Ölçülen	Hesaplanan
200	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
150	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
100	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
70	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
55	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
38	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
25	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
19	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
13	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
9.50	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
4.75	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
3.35	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
2.36	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
1.70	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
1.18	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
0.85	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
0,60	99.97	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
0.425	99.90	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
0.300	99.57	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
0.212	97.73	98.15	99.89	99.89	98.07	98.13	99.96	99.96
0.150	91.68	92.07	97.70	97.70	91.75	92.01	99.73	99.73
0.106	79.02	79.34	95.30	95.30	79.09	79.18	98.89	98.89
0.075	65.40	65.65	93.89	93.89	63.66	65.36	96.38	96.38
0.053	52.80	53.04	92.02	92.02	51.14	52.65	90.47	90.46
0.038	41.11	41.81	88.92	88.92	43.71	41.33	78.97	78.97

EK - 6

İkinci hidrosiklon grubu etrafındaki akışlara ait madde denklığı çalışmalarında kullanılan ölçülen ve hesaplanan tane boyu dağılımları

Tane Boyu (mm)	2. Hidrosiklon Besleme		2. Hidrosiklon Alt Akım		2. Hidrosiklon Üst Akım	
	Ölçülen	Hesaplanan	Ölçülen	Hesaplanan	Ölçülen	Hesaplanan
200	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
150	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
100	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
70	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
55	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
38	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
25	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
19	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
13	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
9.50	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
4.75	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
3.35	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
2.36	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
1.70	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
1.18	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
0.85	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
0.60	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
0.425	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
0.300	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
0.212	99.34	99.38	98.99	99.16	99.97	99.97
0.150	96.49	96.52	94.66	95.29	99.84	99.84
0.106	88.49	88.17	80.79	84.00	99.48	99.48
0.075	73.25	71.88	58.06	62.70	96.72	96.75
0.053	56.26	53.83	36.89	41.45	87.16	87.38
0.038	40.96	38.70	23.50	26.89	70.52	70.70

EK - 7

Çakıllı değirmen etrafındaki akışların madde denklığı çalışmalarında kullanılan ölçülen ve hesaplanan tane boyu dağılımları

Tane Boyu (mm)	2. Hidrosiklon Alt Akım		Çakıllı Değirmen Çıkışı	
	Ölçülen	Hesaplanan	Ölçülen	Hesaplanan
200	100.00	100.00	100.00	100.00
150	100.00	100.00	100.00	100.00
100	100.00	100.00	100.00	100.00
70	100.00	100.00	100.00	100.00
55	100.00	100.00	100.00	100.00
38	100.00	100.00	100.00	100.00
25	100.00	100.00	100.00	100.00
19	100.00	100.00	100.00	100.00
13	100.00	100.00	100.00	100.00
9.50	100.00	100.00	100.00	100.00
4.75	100.00	100.00	100.00	100.00
3.35	100.00	100.00	100.00	100.00
2.36	100.00	100.00	100.00	100.00
1.70	100.00	100.00	100.00	100.00
1.18	100.00	100.00	100.00	100.00
0.85	100.00	100.00	100.00	100.00
0.600	100.00	100.00	100.00	100.00
0.425	100.00	100.00	100.00	100.00
0.300	100.00	100.00	100.00	100.00
0.212	98.99	99.16	99.79	99.75
0.150	94.66	95.29	98.17	97.83
0.106	80.79	84.00	92.63	90.59
0.075	58.06	62.70	78.15	72.86
0.053	36.89	41.45	59.88	52.53
0.038	23.50	26.89	41.12	36.00

EK - 8

Birinci dönem numune alma çalışması sonucunda elde edilen akış hızları, % katı ve P80 değerleri

Akış	Katı t/s	Su t/s	% Katı	Palp Yoğ, (t/m ³)	Hacimsel Akış (m ³ /h)	P ₈₀ (mm)
Tüvenan Besleme	38.86	-	100.00	3.93	9.89	120.87
Otojen Çıkış	132.82	36.90	78.26	2.40	70.70	1.63
Elek Üstü (-30+2 mm)	27.58	0.08	99.70	3.90	7.10	30.02
Elek Altı (-2 mm)	105.25	64.66	61.94	1.86	91.44	0.28
1. Siklon Alt Akım	66.39	21.59	75.46	2.29	38.48	0.40
1. Siklon Üst Akım	38.86	43.07	47.43	1.55	52.95	0.11
Birim Hücre Besleme	38.86	54.16	41.78	1.45	64.04	0.11
Birim Hücre Atık	38.47	51.20	42.90	1.47	60.98	0.11
Birim Hücre Konsantre	0.39	2.96	11.64	1.10	3.06	0.11
2. Siklon Besleme	162.98	115.69	58.49	1.77	157.16	0.09
2. Siklon Alt Akım	119.03	53.66	68.93	2.06	83.94	0.10
Çakıllı Değirmen Çıkışı	119.03	53.66	68.93	2.06	83.94	0.085
2. Siklon Üst Akım	43.96	62.03	41.47	1.45	73.22	0.50
2. Yakalama Konsantre	5.49	10.84	33.61	1.33	12.23	0.039

EK - 9

İkinci dönem numune alma çalışması sonrasında ikinci hidrosiklon grubu etrafındaki akış kollarından elde edilen numunelere ait ölçülen ve hesaplanan tane boyu dağılımları

Tane Boyu (mm)	2. Hidrosiklon Besleme		2. Hidrosiklon Alt Akım		2. Hidrosiklon Üst Akım	
	Ölçülen	Hesaplanan	Ölçülen	Hesaplanan	Ölçülen	Hesaplanan
0.420	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
0.300	99.96	99.91	99.69	99.90	99.93	99.93
0.212	99.84	99.74	99.32	99.64	99.90	99.90
0.150	98.99	98.85	97.70	98.27	99,87	99.87
0.122	89.70	88.42	85.26	82.25	99.29	99.29
0.102	83.40	81.50	76.24	71.98	98.27	98.27
0.086	76.38	73.78	65.94	60.97	96.36	96.35
0.072	68.55	65.32	54.64	49.63	92.98	92.96
0.06	60.60	56.97	44.01	39.46	87.86	87.81
0.05	53.26	49.57	35.37	31.50	81.48	81.40
0.042	47.03	43.57	29.13	25.90	74.81	74.69
0.036	42.20	39.07	24.99	22.22	68.88	68.74
0.030	37.24	34.54	21.27	18.95	62.15	62.00
0.025	32.97	30.68	18.38	16.40	55.99	55.83
0.021	29.44	27.47	16.13	14.41	50.63	50.47
0.018	26.69	24.93	14.44	12.89	46.30	46.14
0.015	23.82	22.25	12.71	11.35	41.61	41.46
0.012	20.73	19.35	10.93	9.75	36.41	36.26
0.010	18.49	17.24	9.68	8.63	32.56	32.42
0.0086	16.81	15.66	8.77	7.81	29,59	29.47
0.0074	15.25	14.19	7.95	7.09	26.80	26.69
0.0062	13.55	12.57	7.05	6.30	23.70	23.61
0.0052	11.98	11.07	6.24	5.58	20.81	20.74
0.0044	10.57	9.74	5.51	4.94	18.25	18.20
0.0036	8.99	8.25	4.70	4.23	15.37	15.33
0.003	7.66	7.00	4.01	3.61	12.99	12.97
0.0026	6.68	6.09	3.50	3.16	11.27	11.26
0.0022	5.62	5.11	2.94	2.66	9.42	9.42
0.0018	4.46	4.04	2.34	2.11	7.42	7.43

EK – 10

İkinci dönem numune alma çalışması sonrasında çakıllı değirmen etrafındaki akış kollarından elde edilen numunelere ait ölçülen ve hesaplanan tane boyu dağılımları

Tane Boyu (mm)	2. Hidrosiklon Alt Akım		Çakıllı Değirmen Çıkışı	
	Ölçülen	Hesaplanan	Ölçülen	Hesaplanan
0.420	100.00	100.00	100.00	100.00
0.300	99.69	99.90	99.82	99.91
0.212	99.32	99.64	99.72	99.80
0.150	97.70	98.27	99.25	99.32
0.122	85.26	82.25	91.07	93.29
0.102	76.24	71.98	83.75	87.30
0.086	65.94	60.97	74.81	79.64
0.072	54.64	49.63	64.61	70.38
0.060	44.01	39.46	54.54	60.71
0.050	35.37	31.50	45.93	51.96
0.042	29.13	25.90	39.38	44.97
0.036	24.99	22.22	34.79	39.91
0.030	21.27	18.95	30.44	35.03
0.025	18.38	16.40	26.89	31.00
0.021	16.13	14.41	24.00	27.71
0.018	14.44	12.89	21.74	25.15
0.015	11.71	11.35	19.37	22.46
0.012	10.93	9.75	16.83	19.58
0.010	9.68	8.63	15.01	17.49
0.0086	8.77	7.81	13.64	15.90
0.0074	7.95	7.09	12.38	14.43
0.0062	7.05	6.30	11.00	12.79
0.0052	6.24	5.58	9.71	11.26
0.0044	5.51	4.94	8.56	9.90
0.0036	4.70	4.23	7.27	8.37
0.003	4.01	3.61	6.18	7.09
0.0026	3.50	3.16	5.39	6.16
0.0022	2.94	2.66	4.53	5.16
0.0018	2.34	2.11	3.58	4.07

EK - 11

İkinci dönem numune alma çalışması sonrasında birim hücre atığı ve yakalama konsantresinin akış kollarından elde edilen numunelere ait ölçülen ve hesaplanan tane boyu dağılımları

Tane Boyu (mm)	Birim Hücre Atık		2. Yakalama Konsantre	
	Ölçülen	Hesaplanan	Ölçülen	Hesaplanan
0.420	100.00	10000	100.00	100.00
0.300	99.93	99.94	99.77	99.78
0.212	99.65	99.65	99.36	99.37
0.150	98.04	97.91	99.20	99.21
0.122	74.07	77.90	99.20	99.21
0.102	64.43	68.54	98.63	98.64
0.086	56.05	60.06	97.53	97.54
0.072	48.75	52.49	95.52	95.54
0.06	42.77	46.23	91.90	91.96
0.050	38.02	41.24	86.39	86.52
0.042	34.22	37.22	79.58	79.80
0.036	31.21	34.02	72.94	73.22
0.030	27.94	30.49	65.11	65.45
0.025	24.98	27.28	58.05	58.41
0.021	22.42	24.49	52.13	52.49
0.018	20.33	22.22	47.48	47.83
0.015	18.09	19.79	42.49	42.83
0.012	15.63	17.10	37.02	37.35
0.010	13.85	15.16	33.05	33.35
0.0086	12.52	13.71	30.08	30.35
0.0074	11.31	12.38	27.35	27.58
0.0062	10.01	10.94	24.37	24.56
0.0052	8.82	9.64	21.61	21.77
0.0044	7.76	8.47	19.14	19.26
0.0036	6.60	7.20	16.34	16.42
0.003	5.61	6.12	13.96	14.01
0.0026	4.89	5.34	12.20	12.22
0.0022	4.11	4.49	10.28	10.27
0.0018	3.26	3.57	8.14	8.11

EK - 12

İkinci dönem numune alma çalışması sonucunda elde edilen akış hızları, % katı ve P80 değerleri

	Katı t/s	Su t/s	% Katı	Palp Yoğ, [t/m ³]	Hacimsel Akış [m ³ /h]	P ₈₀ (mm)
Birim Hücre Atık	30.36	43.71	40.99	1.44	51.43	0.124
2. Hidrosiklon Besleme	92.22	71.77	56.24	1.72	95.24	0.098
2. Hidrosiklon Alt Akım	58.83	23.12	71.72	2.15	38.17	0.117
2. Hidrosiklon Üst Akım	33.40	48.57	40.74	1.44	57.07	0.048
Çakıllı Değirmen Çıkışı	58.83	23.12	71.72	2.15	38.17	0.087
2. Yakalama Konsantre	3.04	4.87	38.43	1.40	5.64	0.042

EK - 13

Birinci siklon grubunun gerçek ve düzeltilmiş performans eğrilerine ait veriler

Ortalama Tane Boyu (mm)	Gerçek Performans Eğrisi Verileri	Düzeltilmiş Performans Eğrisi Verileri
	100.00	100.00
2.00	100.00	100.00
1.42	100.00	100.00
1.00	99.65	99.54
0.71	99.41	99.24
0.50	97.95	97.36
0.36	93.02	91.00
0.25	81.77	76.50
0.18	65.96	56.12
0.13	51.03	36.86
0.09	38.55	20.78
0.06	27.83	6.95
0.04	24.72	2.94
0.03	22.44	0.00

EK - 14

İkinci hidrosiklon grubunun birinci dönem numune alma çalışması sonucunda elde edilmiş gerçek ve düzeltilmiş performans eğrilerine ait veriler

Ortalama Tane Boyu (mm)	Gerçek Performans Eğrisi Verileri	Düzeltilmiş Performans Eğrisi Verileri
	100.00	100.00
0.25	99.99	99.99
0.18	99.73	99.50
0.13	96.70	93.88
0.09	84.45	71.15
0.06	67.72	40.09
0.04	55.19	16.82
0.03	48.84	5.05
0.01	47.04	1.70
0.01	46.12	0.00

EK - 15

İkinci hidrosiklon grubunun ikinci dönem numune alma çalışması sonucunda elde edilmiş gerçek ve düzeltilmiş performans eğrilerine ait veriler

Ortalama Tane Boyu (mm)	Gerçek Performans Eğrisi Verileri	Düzeltilmiş Performans Eğrisi Verileri
0.357	100.00	100.00
0.252	100.00	100.00
0.178	98.78	98.24
0.135	97.98	97.10
0.112	94.65	92.31
0.094	91.02	87.07
0.079	85.49	79.12
0.066	77.67	67.88
0.055	68.61	54.83
0.046	59.55	41.81
0.039	52.12	31.12
0.033	46.07	22.41
0.027	42.11	16.71
0.023	39.57	13.06
0.019	38.16	11.03
0.016	36.80	9.07
0.013	35.17	6.73
0.011	33.93	4.94
0.009	32.63	3.07
0.008	31.61	1.60
0.007	31.05	0.80
0.006	30.49	0.00
0.005	30.88	0.55
0.004	30.51	0.02
0.003	31,41	1.32
0.003	31.88	2.00
0.002	32.36	2.69

EK - 16

E_{cs} değerlerine karşılık hesaplanan incelik indeksi (t_{10}) değerleri

Özgöl Ufalanma Enerjisi Değerleri (E_{cs})	Hesaplanan t_{10} değerleri
0.05	3.74
0.08	5.87
0.10	7.25
0.10	7.25
0.25	16.47
0.40	24.02
0.25	16.47
1.00	42.87
1.30	47.95
0.25	16.47
1.00	42.87
2.50	56.25
0.25	16.47
1.00	42.87
2.50	56.25

EK - 17

Aşınma testi sonucunda elde edilen tane boyu dağılımı

Tane Boyu (mm)	Ağırlık (gr)	Ağırlık (%)	Birikimli Elek Altı (%)
55	2585.5	85.53	100.00
38	88.14	2.92	14.47
25	88.79	2.94	11.56
19	104.2	3.45	8.62
13.20	23.06	0.76	5.17
9.50	16.2	0.54	4.41
6.30	4.93	0.16	3.87
4.75	3.97	0.13	3.71
3.35	108.24	3.58	3.58
	3023.03	100.00	

EK - 18

Otojen değirmen için madde denkliği çalışması ve Leung modeli kullanılarak yapılan matematiksel modelleme sonucunda elde edilmiş tane boyu dağılımları

Tane Boyu (mm)	Otojen Değirmen Besleme		Otojen Değirmen Çıkış	
	Madde Denkliği	Modelleme Çalışmaları	Madde Denkliği	Modelleme Çalışmaları
282	100.00	100.00	100.00	100.00
200	99.70	99.70	100.00	100.00
150	97.25	97.25	100.00	100.00
100	90.54	90.57	100.00	100.00
70	87.18	87.22	100.00	100.00
55	85.04	85.13	100.00	100.00
38	82.53	82.56	99.74	99.75
25	77.53	77.42	96.50	96.70
19	73.63	73.37	93.58	93.93
13	68.82	68.34	90.01	90.53
9.50	65.36	64.67	87.45	88.02
4.75	59.14	58.05	82.98	83.63
3.35	56.92	55.65	81.23	81.90
2.36	54.62	53.22	79.49	80.20
1.70	52.57	51.03	77.88	78.62
1.18	50.37	48.79	75.95	76.73
0.85	47.96	46.41	73.85	74.68
0.60	44.85	43.35	70.92	71.78
0.425	40.40	38.92	66.63	67.52
0.300	33.78	32.37	60.03	60.94
0.212	25.46	24.70	51.16	52.51
0.150	17.60	18.31	41.76	44.23
0.106	11.95	13.91	33.70	37.13
0.075	8.24	10.81	27.18	30.99
0.053	5.76	8.44	21.77	25.48
0.038	4.14	6.64	17.42	20.77

EK-19

Leung modeli ve değişken hızlar modeline göre otojen değirmen çıkışı tane boyu dağılımı verileri

Tane Boyu (mm)	Otojen Değirmen Çıkışı	
	Leung Modeli	Değişken Hızlar Modeli
282	100.00	100.00
200	100.00	100.00
150	100.00	100.00
100	100.00	100.00
70	100.00	99.99
55	100.00	99.94
38	99.75	99.90
25	96.70	96.81
19	93.93	92.27
13	90.53	86.79
9.50	88.02	83.11
4.75	83.63	78.54
3.35	81.90	77.28
2.36	80.20	76.19
1.70	78.62	75.18
1.18	76.73	73.92
0.85	74.68	72.37
0.6	71.78	69.83
0.425	67.52	65.54
0.300	60.94	57.76
0.212	52.51	47.22
0.150	44.23	38.80
0.106	37.13	32.69
0.075	30.99	27.46
0.053	25.48	22.65
0.038	20.77	18.45

EK - 20

Otojen değirmenin Leung ve değışken hızlar modellerine göre kırılma hızı ve boşaltma hızı fonksiyonlarına ait veriler

Tane Boyu (mm)	Leung Modeli		Değışken Hızlar Modeli	
	Kırılma Hızı Fonksiyonu	Izgara Çıkış Hızı Fonksiyonu	Kırılma Hızı Fonksiyonu	Izgara Çıkış Hızı Fonksiyonu
200.00	11.82	0.00	3.29	0.00
141.42	10.16	0.00	3.30	0.00
100.00	8.74	0.00	3.30	0.00
70.71	7.59	0.00	3.33	0.002
50.00	6.87	0.00	3.46	0.01
35.36	6.70	0.16	3.80	0.02
25.00	7.19	1.54	4.50	1.30
17.68	8.40	2.93	5.93	4.02
12.50	10.51	4.31	8.91	6.74
8.84	1378	5.69	15.12	9.46
6.25	18.23	7.07	26.80	12.18
4.42	23.38	8.45	45.23	14.90
3.13	27.94	9.83	66.46	17.62
2.21	30.31	11.21	80.34	20.34
1.56	29.97	12.59	81.24	23.06
1.11	27.21	13.97	70.55	25.78
0.78	22.86	15.35	54.02	28.50
0.55	17.90	16.74	37.45	31.22
0.39	13.17	18.12	24.12	33.93
0.28	9.17	19.50	14.82	36.65
0.20	6.09	20.88	8.92	39.37
0.14	3.89	22.26	5.36	42.09
0.10	2.41	23.64	3.22	44.81
0.07	1.45	25.02	1.93	47.53
0.05	0.86	26.40	1.16	50.25
0.04	0.51	27.69	0.70	52.28
0.02	0.30	27.69	0.42	52.28
0.02	0.17	27.69	0.25	52.28
0.01	0.10	27.69	0.15	52.28
0.01	0.06	27.69	0.09	52.28
0.01	0.04	27.69	0.06	52.28
0.00	0.02	27.69	0.03	52.28

EK – 21

Çakıllı değirmen için madde denkliği çalışması ve matematiksel modelleme sonucunda belirlenen tane boyu dağılımları

Tane Boyu (mm)	2. Hidrosiklon Altı		Çakıllı Değirmen Çıkışı	
	Madde Denkliği	Modelleme Çalışmaları	Madde Denkliği	Modelleme Çalışmaları
282	100.00	100.00	100.00	100.00
200	100.00	100.00	100.00	100.00
150	100.00	100.00	100.00	100.00
100	100.00	100.00	100.00	100.00
70	100.00	100.00	100.00	100.00
55	100.00	100.00	100.00	100.00
38	100.00	100.00	100.00	100.00
25	100.00	100.00	100.00	100.00
19	100.00	100.00	100.00	100.00
13	100.00	100.00	100.00	100.00
9.50	100.00	100.00	100.00	100.00
4.75	100.00	100.00	100.00	100.00
3.35	100.00	100.00	100.00	100.00
2.36	100.00	100.00	100.00	100.00
1.70	100.00	100.00	100.00	100.00
1.18	100.00	100.00	100.00	100.00
0.85	100.00	100.00	100.00	100.00
0.60	100.00	100.00	100.00	100.00
0.43	99.96	99.97	99.98	99.99
0.30	99.66	99.66	99.88	99.86
0.21	98.28	98.05	99.40	99.23
0.15	94.24	93.52	97.59	96.98
0.11	84.58	82.91	91.17	89.43
0.08	62.53	59.11	72.36	68.50
0.05	41.88	38.57	51.99	47.94
0.04	30.72	28.10	39.75	36.36

EK – 22

Çakıllı değirmenin mükemmel karışım modeline ait tane boyu değerlerine karşılık kırılma hızı/taşınma hızı değerleri

Tane Boyu (mm)	R/D*
150.00	0.024
106.07	0.034
75.00	0.048
53.03	0.067
37.50	0.093
26.52	0.131
18.75	0.183
13.26	0.257
9.38	0.360
6.63	0.504
4.69	0.707
3.32	0.99
2.34	1.388
1.66	1.944
1.17	2.724
0.83	3.818
0.59	5.349
0.41	7.495
0.29	10.046
0.20	10.53
0.14	6.933
0.10	3.044
0.073	1.197
0.052	0.563
0.037	0.332
0.026	0.211
0.018	0.135
0.013	0.086
0.009	0.055
0.006	0.035
0.005	0.023
0.003	0.014
0.002	0.009
0.002	0.006
0.001	0.004
0.001	0.002
0.001	0.002

EK – 23

Elek için madde denkliği çalışması ve matematiksel modelleme sonucunda elde edilen tane boyu dağılımları

Tane Boyu (mm)	Otojen ıkış		Elek Üstü		Elek Altı	
	Madde Denkliği	Modelleme alışmaları	Madde Denkliği	Modelleme alışmaları	Madde Denkliği	Modelleme alışmaları
282	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
200	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
150	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
100	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
70	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
55	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
38	99.74	99.75	98.98	98.99	100.00	100.00
25	96.50	96.70	85.03	85.41	100.00	100.00
19	93.58	93.93	72.62	73.27	100.00	100.00
13	90.01	90.53	57.21	58.04	100.00	100.00
9.50	87.45	88.02	46.28	46.99	100.00	100.00
4.75	82.98	83.63	27.13	27.53	100.00	100.00
3.35	81.23	81.90	19.60	19.84	100.00	100.00
2.36	79.49	80.20	12.29	12.44	100.00	100.00
1.70	77.88	78.62	5.51	5.58	99.88	99.88
1.18	75.95	76.73	1.87	1.91	98.55	98.60
0.85	73.85	74.68	1.04	1.06	96.01	96.14
0.60	70.92	71.78	0.75	0.77	92.31	92.52
0.425	66.63	67.52	0.60	0.61	86.74	87.03
0.300	60.03	60.94	0.47	0.48	78.18	78.59
0.212	51.16	52.51	0.36	0.38	66.64	67.72
0.150	41.76	44.23	0.28	0.30	54.40	57.05
0.106	33.70	37.13	0.21	0.24	43.90	47.89
0.075	27.18	30.99	0.17	0.19	35.41	39.97
0.053	21.77	25.48	0.13	0.16	28.36	32.87
0.038	17.42	20.77	0.10	0.13	22.70	26.80

EK – 24

Birinci hidrosiklon grubu için madde denklığı çalışması ve matematiksel modelleme sonucunda elde edilen tane boyu dağılımları

Tane Boyu (mm)	1. Hidrosiklon Besleme		1. Hidrosiklon Alt Akım		1. Hidrosiklon Üst Akım	
	Madde Denklığı	Modelleme Çalışmaları	Madde Denklığı	Modelleme Çalışmaları	Madde Denklığı	Modelleme Çalışmaları
282	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
200	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
150	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
100	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
70	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
55	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
38	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
25	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
19	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
13	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
9.50	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
4.75	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
3.35	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
2.36	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
1.70	99.88	99.88	99.81	99.81	100.00	100.00
1.18	98.55	98.60	97.75	97.74	100.00	100.00
0.85	96.01	96.14	93.81	93.76	100.00	100.00
0.60	92.31	92.52	88.04	87.89	100.00	100.00
0.425	86.74	87.03	79.44	79.06	99.94	99.95
0.30	78.18	78.59	66.43	65.75	99.39	99.38
0.212	66.64	67.72	49.91	50.02	96.83	96.39
0.150	54.40	57.05	34.34	37.00	90.58	89.52
0.106	43.90	47.89	23.15	28.03	81.35	80.06
0.075	35.41	39.97	15.82	21.72	70.74	69.53
0.053	28.36	32.87	10.96	16.93	59.75	58.68
0.038	22.70	26.80	7.80	13.29	49.59	48.67

EK – 25

İkinci hidrosiklon grubu için madde denklığı çalışması ve matematiksel modelleme sonucunda belirlenen tane boyu dağılımları

Tane Boyu (mm)	2. Hidrosiklon Besleme		2. Hidrosiklon Alt Akım		2. Hidrosiklon Üst Akım	
	Madde Denklığı	Modelleme Çalışmaları	Madde Denklığı	Modelleme Çalışmaları	Madde Denklığı	Modelleme Çalışmaları
282	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
200	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
150	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
100	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
70	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
55	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
38	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
25	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
19	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
13	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
9.50	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
4.75	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
3.35	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
2.36	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
1.70	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
1.18	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
0.85	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
0.60	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
0.425	99.97	99.98	99.96	99.97	100.00	100.00
0.300	99.76	99.75	99.66	99.66	100.00	100.00
0.212	98.77	98.58	98.28	98.05	100.00	100.00
0.150	95.90	95.29	94.24	93.52	100.00	100.00
0.106	88.98	87.52	84.58	82.91	99.93	99.92
0.075	72.80	69.69	62.53	59.11	98.06	97.74
0.053	55.33	51.95	41.88	38.57	88.70	87.72
0.038	43.63	40.75	30.72	28.10	75.55	74.42

Baz simülasyon koşulunda elde edilen akış hızları, % katı ve P80 değerleri

	Katı t/s	Su t/s	% Katı	Palp Yoğ, (t/m ³)	Hacimsel Akış (m ³ /h)	P ₈₀ (mm)
Tüvenan Besleme	38.86	0.00	100.00	3.93	9.89	120.90
Otojen Değirmen Çıkışı	131.49	36.53	78.26	2.40	69.99	2.26
Elek Üstü	29.70	0.05	99.84	3.91	7.61	21.95
Elek Altı	101.79	36.48	73.62	2.22	62.38	0.32
1. Hidrosiklon Alt Akım	62.93	17.33	78.40	2.41	33.34	0.44
1. Hidrosiklon Üst Akım	38.86	45.20	46.23	1.53	55.09	0.11
Birim Hücre Konsantre	0.9	2.98	11.54	1.09	3.08	0.11
Birim Hücre Atık	38.47	51.18	42.91	1.47	60.97	0.11
2. Hidrosiklon Besleme	161.15	126.77	55.97	1.72	167.78	0.09
2. Hidrosiklon Alt Akım	117.19	58.21	66.81	1.99	88.03	0.10
2. Hidrosiklon Üst Akım	43.95	68.56	39.07	1.41	79.75	0.04
Çakıllı Değirmen Çıkışı	117.19	58.21	66.81	1.99	88.03	0.09
2. Yakalama Konsantre	5.49	10.84	33.61	1.33	12.23	0.04

EK – 27

Simülasyon çalışmalarında kullanılan farklı tüvenan besleme tane boyu dağılımları

Tane Boyu (mm)	1. Tane Boyu Dağılımı	2. Tane Boyu Dağılımı	3. Tane Boyu Dağılımı	% 65 iri + % 35 ince
282	100.00	100.00	100.00	100.00
200	100.00	84.22	79.40	66.60
150	90.73	72.93	69.62	50.16
100	68.09	59.55	53.80	32.09
70	56.75	49.82	43.20	25.33
55	49.41	44.16	35.97	21.00
38	41.86	36.71	25.45	14.94
25	34.75	29.77	18.01	10.52
19	30.32	25.96	13.53	7.97
13	24.94	21.64	9.84	5.73
9.50	20.98	18.35	7.10	4.17
4.75	13.40	12.98	3.19	2.34
3.35	11.27	10.90	2.48	1.86
2.36	8.63	9.15	2.00	1.45
1.70	6.78	7.76	1.64	1.17
1.18	5.39	6.47	1.38	0.96
0.85	4.40	5.49	1.19	0.81
0.60	3.75	4.61	0.99	0.69
0.425	3.23	3.88	0.82	0.58
0.300	2.68	3.26	0.67	0.48
0.212	2.32	2.74	0.56	0.39
0.150	1.81	2.31	0.46	0.33
0.106	1.51	1.94	0.38	0.27
0.075	1.25	1.63	0.30	0.22
0.053	1.04	1.37	0.25	0.18
0.038	0.86	1.16	0.21	0.15

EK – 28

İkinci tane boyu dağılımı kullanılarak yapılan simülasyon çalışması sonucunda elde edilen akış hızları, % katı ve P80 değerleri

	Katı t/s	Su t/s	% Katı	Palp Yoğ, (t/m ³)	Hacimsel Akış (m ³ /h)	P ₈₀ (mm)
Tüvenan Besleme	42.00	0.00	100.00	3.93	10.69	178.33
Otojen Çıkış	120.40	33.45	78.26	2.40	64.09	0.63
Elek Üstü	18.31	0.04	99.76	3.90	4.70	19.49
Elek Altı	102.09	33.41	75.35	2.28	59.38	0.28
1. Hidrosiklon Alt Akım	60.09	17.38	77.56	2.37	32.67	0.41
1. Hidrosiklon Üst Akım	42.00	45.34	48.09	1.56	56.02	0.10
Birim Hücre Konsantre	0.42	3.22	11.54	1.09	3.33	0.10
Birim Hücre Atık	41.58	55.31	42.91	1.47	65.89	0.10
2. Hidrosiklon Besleme	165.27	130.02	55.97	1.72	172.07	0.09
2. Hidrosiklon Alt Akım	117.76	59.70	66.36	1.98	89.67	0.10
2. Hidrosiklon Üst Akım	47.51	70.32	40.32	1.43	82.41	0.04
Çakıllı Değirmen Çıkışı	117.76	59.70	66.36	1.98	89.67	0.09
2. Yakalama Konsantre	5.93	11.71	33.61	1.33	13.22	0.04

EK – 29

Üçüncü tane boyu dağılımı kullanılarak yapılan simülasyon sonucunda elde edilen akış hızları, % katı ve P80 değerleri

	Katı t/s	Su t/s	% Katı	Palp Yoğ, (t/m ³)	Hacimsel Akış (m ³ /h)	P ₈₀ (mm)
Tüvenan Besleme	42.00	0.00	100.00	3.93	10.69	200.65
Otojen Çıkış	124.50	34.59	78.26	2.40	66.27	0.74
Elek Üstü	20.37	0.05	99.78	3.90	5.23	19.97
Elek Altı	104.14	34.54	75.09	2.27	61.04	0.29
1. Hidrosiklon Alt Akım	62.14	17.73	77.80	2.38	33.54	0.42
1. Hidrosiklon Üst Akım	42.00	46.25	47.59	1.55	56.93	0.10
Birim Hücre Konsantre	0.42	3.22	11.54	1.09	3.33	0.10
Birim Hücre Atık	41.58	55.31	42.91	1.47	65.89	0.10
2. Hidrosiklon Besleme	166.39	130.90	55.97	1.72	173.23	0.09
2. Hidrosiklon Alt Akım	119.02	60.11	66.44	1.98	90.39	0.10
2. Hidrosiklon Üst Akım	47.37	70.79	40.09	1.43	82.84	0.04
Çakıllı Degirmen Çıkışı	119.02	60.11	66.44	1.98	90.39	0.09
2. Yakalama Konsantre	5.93	11.71	33.61	1.33	13.22	0.04

EK - 30

Dördüncü tane boyu dağılımı kullanılarak yapılan simülasyon çalışmasında elde edilen akış hızları, % katı ve P80 değerleri

	Katı t/s	Su t/s	% Katı	Palp Yoğ, (t/m ³)	Hacimsel Akış (m ³ /h)	P ₈₀ (mm)
Tüvenan Besleme	42.00	0.00	100.00	3.93	10.69	211.63
Otojen Çıkış	121.49	33.75	78.26	2.40	64.66	0.65
Elek Üstü	18.61	0.04	99.76	3.90	4.78	19.77
Elek Altı	102.87	33.71	75.32	2.28	59.88	0.29
1. Hidrosiklon Alt Akım	60.87	17.52	77.65	2.37	33.01	0.41
1. Hidrosiklon Üst Akım	42.00	45.68	47.90	1.56	56.37	0.10
Birim Hücre Konsantre	0.42	3.22	11.54	1.09	3.33	0.10
Birim Hücre Atık	41.58	55.31	42.91	1.47	65.89	0.10
2. Hidrosiklon Besleme	165.93	130.54	55.97	1.72	172.76	0.09
2. Hidrosiklon Alt Akım	118.42	59.94	66.39	1.98	90.07	0.10
2. Hidrosiklon Üst Akım	47.51	70.60	40.23	1.43	82.69	0.04
Çakıllı Değirmen Çıkışı	118.42	59.94	66.39	1.98	90.07	0.09
2. Yakalama Konsantre	5.93	11.71	33.61	1.33	13.22	0.04

EK – 31

Verimli siklonlar ile yapılan simülasyon çalışmasında elde edilen akış hızları, % katı ve P80 değerleri

	Katı t/s	Su t/s	% Katı	Palp Yoğ, (t/m ³)	Hacimsel Akış (m ³ /h)	P ₈₀ (mm)
Tüvenan Besleme	44,00	0.00	100.00	3.93	11.20	178.33
Otojen Çıkış	131.08	36.42	78.26	2.40	69.77	0.67
Elek Üstü	20.46	0.05	99.77	3.90	5.25	19.50
Elek Altı	110.62	36.37	75.26	2.28	64.51	0.29
1. Hidrosiklon Alt Akım	66.62	16.99	79.68	2.46	33.94	0.41
1. Hidrosiklon Üst Akım	44.00	50.97	46.33	1.53	62.17	0.09
Birim Hücre Konsantre	0.44	3.37	11.54	1.09	3.48	0.09
Birim Hücre Atık	43.56	57.95	42.91	1.47	69.03	0.09
2. Hidrosiklon Besleme	129.03	101.51	55.97	1.72	134.34	0.08
2. Hidrosiklon Alt Akım	79.26	25.38	75.75	2.30	45.55	0.10
2. Hidrosiklon Üst Akım	49.77	76.13	39.53	1.42	88.80	0.04
Çakıllı Degirmen Çıkışı	79.26	25.38	75.75	2.30	45.55	0.08
2. Yakalama Konsantre	6.21	12.27	33.61	1.33	13.85	0.04

EK – 32

Yüksek frekansta yaş eleme yapabilen elekler ile yapılan simülasyon çalışması sonucunda elde edilen akış hızları, % katı ve P80 değerleri

	Katı t/s	Su t/s	% Katı	Palp Yoğ, (t/m ³)	Hacimsel Akış (m ³ /h)	P ₈₀ (mm)
Tüvenan Besleme	47.00	0.00	100.00	3.93	11.96	178.33
Otojen Çıkış	120.03	33.35	78.26	2.40	63.89	0.96
Elek Üstü	21.59	0.04	99.80	3.91	5.54	19.48
Elek Altı	98.44	33.30	74.72	2.26	58.35	0.33
1. YF Elek Üstü	51.44	5.96	89.61	3.01	19.05	0.51
1. YF Elek Altı	47.00	54.51	46.30	1.53	66.47	0.10
Birim Hücre Konsantre	0.47	3.60	11.54	1.09	3.72	0.10
Birim Hücre Atık	46.53	61.90	42.91	1.47	73.74	0.10
2. YF Elek Besleme	87.47	83.33	51.21	1.62	105.59	0.08
2. YF Elek Üstü	34.31	8.33	80.46	2.50	17.06	0.12
2. YF Elek Altı	53.16	75.00	41.48	1.45	88.52	0.04
Çakıllı Degirmen Çıkışı	34.31	8.83	80.46	2.50	17.06	0.08
2. Yakalama Konsantre	6.63	13.10	33.61	1.33	14.78	0.04

EK – 33

Verimli siklonlar ile yapılan simülasyon çalışmasında ve devreye konik kırıcı eklendiği durumda elde edilen akış hızları, % katı ve P80 değerleri

	Katı t/s	Su t/s	% Katı	Palp Yoğ, (t/m ³)	Hacimsel Akış (m ³ /h)	P ₈₀ (mm)
Tüvenan Besleme	47.00	0.00	100.00	3.93	11.96	178.33
Otojen Çıkış	13.,20	37.84	78.26	2.40	72.49	0.56
Konik Kırıcı Besleme	18.93	0.05	99.74	3.90	4.87	18.51
Konik Kırıcı Ürün	18.93	0.05	99.74	3.90	4.87	5.49
Elek Altı	117.26	37.79	75.63	2.29	67.62	0.29
1. Hidrosiklon Alt Akım	70.26	18.01	79.60	2.46	35.89	0.41
1. Hidrosiklon Üst Akım	47.00	54.03	46.52	1.53	65.99	0.09
Birim Hücre Konsantre	0.47	3.60	11.54	1.09	3.72	0.09
Birim Hücre Atık	46.53	61.90	42.91	1.47	73.74	0.09
2. Hidrosiklon Besleme	140.01	110.15	55.97	1.72	145.77	0.08
2. Hidrosiklon Alt Akım	86.85	27.54	75.93	2.30	49.64	0.10
2. Hidrosiklon Üst Akım	53.16	82.61	39.15	1.41	96.14	0.04
Çakıllı Değirmen Çıkışı	86.85	27.54	75.93	2.30	49.64	0.08
Yakalama Konsantre	6.63	13.10	33,61	1.33	14.78	0.04

EK – 34

Yüksek frekansta yaş eleme yapabilen elekler ile konik kırıcı eklendiği durumda devrede oluşacak akış hızları, % katı ve P80 değerleri

	Katı t/s	Su t/s	% Katı	Palp Yoğ, (t/m ³)	Hacimsel Akış (m ³ /h)	P ₈₀ (mm)
Tüvenan Besleme	51.00	0.00	100.00	3.93	12.98	178.33
Otojen Değirmen Çıkışı	126.55	35.16	78.26	2.40	67.36	0.76
Konik Kırıcı Besleme	20.47	0.05	99.77	3.90	5.26	18.49
Konik Kırıcı Ürün	20.47	0.05	99.77	3.90	5.26	5.49
1. YF Elek Besleme	106.08	35.11	75.13	2.27	62.10	0.33
1. YF Elek Üstü	55.08	6.43	89.55	3.01	20.44	0.50
1. YF Elek Altı	51.00	58.74	46.47	1.53	71.72	0.10
Birim Hücre Konsantre	0.51	3.91	11.54	1.09	4.04	0.10
Birim Hücre Atık	50.49	67.17	42.91	1.47	80.01	0.10
2. YF Elek Besleme	95.87	90.43	51.46	1.62	114.83	0.08
2. YF Elek Üstü	38.18	9.04	80.85	2.52	18.76	0.12
2. YF Elek Altı	57.69	81.39	41.48	1.45	96.07	0.04
Çakıllı Değirmen Çıkışı	38.18	9.04	80.85	2.52	18.76	0.08
Yakalama Konsantre	7.20	14.22	33.61	1.33	16.06	0.04

ÖZGEÇMİŞ

Kimlik Bilgileri

Adı Soyadı: Orberk Mert Mercan

Doğum Yeri: Lüleburgaz

Medeni Hali: Bekar

E-Posta: orberkmercan@gmail.com

Adres: Yaşamkent Mah. 3253, Sok. Desu Plaza Dış Kapı 8/C İç Kapı 35
Çankaya/Ankara

Eğitim

Lisans: Hacettepe Üniversitesi Maden Mühendisliği (2009-2014)

Yabancı Dil ve Düzeyi

İngilizce: Okuma: İyi Yazma: İyi Konuşma: İyi

İş Deneyimi

Hacettepe Mineral Teknolojileri LTD. ŞTİ Proje Mühendisi (08.2014 - ...)

Deneyim Alanları

Cevher Karakterizasyonu ve Proses Mineralojisi, Cevher Hazırlama Tesislerinin Performans Ölçümü ve Optimizasyonu, Cevher Hazırlama Tesisleri için Akım Şeması Geliştirme, Matematiksel Modelleme ve Simülasyon

Tezden Üretilmiş Projeler ve Bütçesi

-

Tezden Üretilmiş Yayınlar

-

Tezden Üretilmiş Tebliğ ve/veya Poster Sunumuna Katıldığı Toplantılar

-



HACETTEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
YÜKSEK LİSANS/DOKTORA TEZ ÇALIŞMASI ORJİNALLİK RAPORU

HACETTEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLER ENSTİTÜSÜ
MADEN MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI BAŞKANLIĞI'NA

Tarih:29/05/2017

Tez Başlığı : Bakır Cürufu Öğütme Devresinin Bilgisayar Destekli Performans Değerlendirmesi ve Optimizasyonu

Yukarıda başlığı gösterilen tez çalışmamın a) Kapak sayfası, b) Giriş, c) Ana bölümler d) Sonuç kısımlarından oluşan toplam 150 sayfalık kısmına ilişkin, 29/05/2017 tarihinde tez danışmanım tarafından Turnitin adlı intihal tespit programından aşağıda belirtilen filtrelemeler uygulanarak alınmış olan orijinallik raporuna göre, tezimin benzerlik oranı % 2 'dir.

Uygulanan filtrelemeler:

- 1- Kaynakça hariç
- 2- Alıntılar hariç
- 3- 5 kelimedenden daha az örtüşme içeren metin kısımları hariç

Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Çalışması Orijinallik Raporu Alınması ve Kullanılması Uygulama Esasları'nı inceledim ve bu Uygulama Esasları'nda belirtilen azami benzerlik oranlarına göre tez çalışmamın herhangi bir intihal içermediğini; aksinin tespit edileceği muhtemel durumda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve yukarıda vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Gereğini saygılarımla arz ederim.

Tarih ve İmza

29/5/2017

Adı Soyadı: Orberk Mert Mercan

Öğrenci No: N14129037

Anabilim Dalı: Maden Mühendisliği

Programı:

Statüsü: Y.Lisans Doktora Bütünleşik Dr.

DANIŞMAN ONAYI

UYGUNDUR.

Yrd. Doç. Dr. N. Metin CAN

(Unvan, Ad Soyad, İmza)