

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**VİBRA-DRUM İLE ULTRA İNCE TALK ÖĞÜTME: PARAMETRELERİN
ETKİLERİ VE DÖNER BİLYALI DEĞİRMEN İLE KARŞILAŞTIRMA**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ogün BAŞARAN

Cevher Hazırlama Mühendisliği Anabilim Dalı

Cevher Hazırlama Mühendisliği Programı

TEMMUZ 2024

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**VİBRA-DRUM İLE ULTRA İNCE TALK ÖĞÜTME: PARAMETRELERİN
ETKİLERİ VE DÖNER BİLYALI DEĞİRMEN İLE KARŞILAŞTIRMA**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Ogün BAŞARAN
(505211108)**

Cevher Hazırlama Mühendisliği Anabilim Dalı

Cevher Hazırlama Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. A. Ekrem YÜCE

TEMMUZ 2024

ISTANBUL TECHNICAL UNIVERSITY ★ GRADUATE SCHOOL

**ULTRAFINE TALC GRINDING: EFFECTS OF PARAMETERS USING
VIBRA-DRUM AND COMPARISON WITH ROTARY BALL MILL**

M.Sc. THESIS

**Ogün BAŞARAN
(505211108)**

Department of Mineral Processing Engineering

Mineral Processing Engineering Programme

Thesis Advisor: Prof. Dr. A. Ekrem YÜCE

JULY 2024

İTÜ, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün 505211108 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Ogün BAŞARAN, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “VİBRA-DRUM İLE ULTRA İNCE TALK ÖĞÜTME: PARAMETRELERİN ETKİLERİ VE DÖNER BİLYALI DEĞİRMEN İLE KARŞILAŞTIRMA” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. A. Ekrem YÜCE**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Feridun BOYLU**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Kenan Çinku
İstanbul Üniversitesi

Teslim Tarihi : **14.06.2024**
Savunma Tarihi : **24.07.2024**





Eşime,



ÖNSÖZ

Tez Danışmanım Prof. Dr. A. Ekrem YÜCE'ye, yüksek lisans eğitimim süresince ve araştırmalarımın her aşamasında bana rehberlik eden ve destek veren, değerli bilgi ve deneyimlerini esirgemeyen, tez konumu seçmemde yardımcı olan, yardımları, sabrı ve desteği için teşekkür ederim. Araştırmalarım sırasında bana her anlamda destek olan ve değerli fikirleri ve görüşleriyle tezime önemli katkılarda bulunan Prof. Dr. Feridun BOYLU ve Araş. Gör. Yusuf Enes PURAL'a teşekkür ederim. Laboratuvar çalışmalarımda sabrı ve anlayışı ile katkılarından ve yardımlarından dolayı Araş. Gör. Tülay TÜRK'e teşekkür ederim.

Ayrıca İstanbul Teknik Üniversitesi Cevher Hazırlama Mühendisliği Bölüm Başkanı Prof. Dr. Olgaç KANGAL'a, yüksek lisans sürecimde gösterdiği sürekli destek için derin teşekkürlerimi sunarım.

Deneysel çalışmalarımı gerçekleştirmemde gerekli ekipmanı sağlayan Turbo Makina çalışanlarına, özellikle teknisyenlere ve yardımları ve destekleri için General Kinematics şirketinden Josep Lopez'e teşekkür ederim.

Eşim Şeyda DUBA BAŞARAN'a, annem Funda BAŞARAN'a ve babam Mehmet BAŞARAN'a sabırları, destekleri ve hoşgörülerini için teşekkür ederim. Ayrıca annem Ayla TURAN ÇAM'a ve babam Suat ÇAM'a destekleri için teşekkür ederim.

Son olarak, Adnan Menderes Üniversitesi'nden Doç. Dr. Taner Akbaş'a ve Araş. Gör. Erkan Güler'e enerji ölçüm cihazı bulmamda yardımlarından dolayı teşekkür ederim.

Mayıs, 2024

Ogün BAŞARAN
(Cevher Hazırlama Mühendisi)



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	ix
İÇİNDEKİLER	xi
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xiii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xv
ÖZET.....	xvii
SUMMARY	xix
1. GİRİŞ.....	1
1.1 Tezin Amacı	3
1.2 Literatür Araştırması	3
1.2.1 Öğütme yöntemi.....	3
1.2.2 Çift kütleli sistem.....	8
2. MATERİYAL VE METOT	13
2.1 Öğütme Deneyleri	13
2.2 Ölçüm Yöntemi	16
3. SONUÇ VE TARTIŞMA.....	19
3.1 Gürültü Değişimleri.....	19
3.2 Frekans ve Genlik.....	22
3.3 Nihai Ürünlerin Partikül Boyut Dağılımı.....	25
3.4 Enerji Tüketimi	27
4. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	31
4.1 Regresyon Analizi	31
4.2 Aktarmalı Bilyalı Değirmen ile Vibra-Drum Karşılaştırılması.....	34
KAYNAKLAR	37
ÖZGEÇMİŞ.....	39



ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 1.1 : VIBRA-DRUM ile öğütme uygulamaları.....	6
Çizelge 1.2 : Beslemenin partikül boyut dağılımı.	13
Çizelge 1.3 : Deney tasarımı.....	14
Çizelge 3.1 : Gürültü değişimleri.	19
Çizelge 3.2 : Frekans ve gürültü karşılaştırması.....	21
Çizelge 3.3 : Bilya boyutu ve gürültünün karşılaştırılması.	21
Çizelge 3.4 : 30 dakika sonrasındaki genlik değişiklik çizelgesi.	23
Çizelge 3.5 : Deneylerin D90 sonuçları.....	26
Çizelge 3.6 : Enerji tüketimleri.....	28
Çizelge 3.7 : Enerji regresyon analizi sonuçları.	29
Çizelge 4.1 : Özet deney sonuçları.	31
Çizelge 4.2 : Parametrelerin etki katsayıları.....	32



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : Talk minerali.	1
Şekil 1.2 : Endüstriyel ölçekli VIBRA-DRUM®	4
Şekil 1.3 : VIBRA-DRUM® iç dizaynı.	5
Şekil 1.4 : Bilya (sol) ve çubuk (sağ) öğütücü ortam tipleri.....	5
Şekil 1.5 : Aktarmalı bilyalı değirmendeki malzeme hareketlerini gösteren şema.	7
Şekil 1.6 : Brute Force ile çift kütleli sistemin karşılaştırılması.....	9
Şekil 1.7 : Çift kütleli elek.....	10
Şekil 1.8 : Laboratuvar ölçekli Vibra-Drum öğütücü (sol) endüstriyel ölçekli Vibra-Drum öğütücü (sağ).....	11
Şekil 1.9 : Laboratuvar ölçekli Vibra-Drum öğütücü titreşim motoru detayı.	11
Şekil 2.1 : Öğütme öncesi talk cevheri ve bilya besleme.	15
Şekil 2.2 : Laboratuvar ölçekli titreşimli değirmen çıkışı.	16
Şekil 2.3 : Frekans ve genlik ölçüm cihazı yazılımı.	16
Şekil 2.4 : Genlik ölçüm etiketi.	17
Şekil 2.5 : Enerji tüketim sayacı.	17
Şekil 3.1 : Her deney için gürültü değişikliği grafiği.	20
Şekil 3.2 : Bilya boyutu ve gürültü ilişkisi.	22
Şekil 3.3 : 30 dakika sonrasındaki genlik değişim grafiği.	24
Şekil 3.4 : Deney No.1 tane boyut dağılımı.	25
Şekil 3.5 : Deneylerin nihai ürünündeki incelik sıralaması.	27
Şekil 3.6 : D90 değerine göre spesifik enerji tüketimleri.	29
Şekil 4.1 : Bilya boyutu ve genliğe göre D90 değeri.....	33



VİBRA-DRUM İLE ULTRA İNCE TALK ÖĞÜTME: PARAMETRELERİN ETKİLERİ VE DÖNER BİLYALI DEĞİRMEN İLE KARŞILAŞTIRMA

ÖZET

Talk temel olarak $Mg_3(Si_2O_5)_2(OH)_2$ formülüne sahip hidratlı magnezyum silikattır. 31,7 MgO ve %63,50 SiO_2 içerir. Düşük elektrik iletkenliği ve termal dirence sahip hidrofobik bir malzemedir.

Talkın tarihi 1984 yılına kadar uzanmakta olup ilk olarak bebek pudrası olarak dünyaya tanıtılmıştır. Diğer kullanım alanları daha sonra şekillenmiştir. Günümüzde talkın en büyük tüketim alanı kağıt endüstrisidir. Kağıt endüstrisinde, kağıt üretmek için kağıt hamuru yapımında kullanılır. Talk, yumuşaklığı, beyazlığı ve inertliği nedeniyle özellikle kağıt ve seramik endüstrisinde kullanılır. Bu özellikleri onu endüstriyel uygulamalar için değerli kılmaktadır. Seramik endüstrisinde seramiğe şekil vermek ve sırlamak için kullanılır. Fayans, porselen ve yemek takımları gibi talktan yapılan çok sayıda endüstriyel ürün vardır. Kağıt ve seramik sanayinin yanı sıra kozmetik sanayinde, hayvan yemlerinde, ilaçlarda, böcek ilaçlarında, pestisitlerde ve kimyasallarda kullanılır. Talk sertliği, belirli sıvıları emiş özelliği ve stabiliteyi artırdığı için birçok endüstride kullanılabilir. Endüstride çok fazla kullanımı olduğu için özelliklerini anlamak önemlidir.

Seramik ve boya endüstrisinde 44 mikron partikül boyutuna sahip talka ihtiyaç duyulurken, kağıt endüstrisinde bu değerler 8-12 mikron ve kozmetikte ise 7 mikrondur.

Talkın yukarıda bahsedilen endüstrilerde kullanılabilmesi için toz halinde olması gerekmektedir. Bu nedenle öğütülmesi gerekmektedir. Ultra ince talk öğütme prosesi, çok ince partikül boyutlarındaki önemli elastik özellikleri nedeniyle ciddi zorluklara sahiptir. Bu çalışmada incelenen frekans, bilye boyutu ve besleme miktarı ayarlamaları gibi temel parametreler, talk öğütme için doğal frekanslı titreşimli bilyalı değirmenlerin optimizasyonu için gereklidir. Bu parametrelerin optimum kombinasyonunun belirlenmesi, verimli ve optimum talk öğütme için çok önemlidir. Bu çalışmada, doğal frekanslı titreşimli bilyalı değirmen kullanılarak, öğütme verimliliği üzerindeki etkilerini değerlendirmek için frekans, bilya boyutu ve besleme miktarı sistematik olarak değiştirilerek kapsamlı öğütme testleri gerçekleştirilmiştir.

Elde edilen partikül boyutu dağılımının, endüstride gerekli talk inceliği için yapılan öğütme işleminin etkinliğini değerlendirmek için kullanılan birincil bir ölçüm olsa da öğütme sırasında gürültüdeki değişiklikleri gözlemlemek de optimizasyon ya da kontrol için gereklidir. Bu çalışmada diğer ölçümler dışında desibel seviyeleri de ölçülmüş olup ve ürün partikül boyutu azaldıkça desibel seviyelerinin arttığı gözlemlenmiştir. Gürültüdeki bu artış, partikül boyutları küçüldükçe bilyalar arasındaki temas sıklığının artmasına bağlanmaktadır. Ayrıca daha iri öğütme ortamı kullanımı ve daha yüksek frekansın desibel seviyesini artırıcı bir parametre olduğu anlaşılmıştır.

Vibra-Drum'un benzersiz çift kütleli sistemi, diğer proseslerdeki gibi sabit genlik ve frekansın korunmasında çok önemli bir rol oynayarak tutarlı öğütme performansı göstermektedir. Çift kütleli sistemin diğer titreşimli ekipmanlara göre besleme miktarı gibi değişen koşullara karşı adapte olan bir sistem olduğunu ve bu sayede parametrelerini değiştirmedigini belirtmek önemlidir. Bu stabilite özellikle homojen tane boyutu dağılımlarının elde edilmesinde avantaj sağlamaktadır.

Çalışmanın sonucunda, yaklaşık 59,121 mikronluk en ince talk ürününün çalışma kapsamındaki en yüksek frekans, en küçük bilya boyutu ve en düşük besleme miktarı koşullarında üretildiğini göstermektedir. Bu durum, istenen ultra ince öğütme sonuçlarını elde etmek için bu parametrelerin optimize edilmesinin önemini vurgulamaktadır.

Ayrıca çalışmada enerji tüketimi ölçümleri de yapılmış olup öğütülmüş ürünün inceliği ile doğrudan ilişkili olmadığını saptanmıştır. Bunun yerine, enerji tüketimi operasyonel parametrelere değişmekte olup, genlik ve frekans en etkili parametrelerdir.

Ürünlerdeki d90 verilerinin regresyon analizi, frekans ve genliğin öğütme performansı üzerinde en önemli etkiye sahip olduğunu doğrulanmıştır. Regresyon analizinden elde edilen çoklu R-değeri 0,970620849 olarak hesaplanmıştır, bu da parametreler ile elde edilen ürün boyutu arasında güçlü bir korelasyon olduğunu göstermektedir.

Doğal frekanslı titreşimli bilyalı değirmen, öğütme verimliliğini artıran veya sabit tutan bir titreşim sağlayarak ileriki talk öğütme proseslerine umut verici bir çözüm sunmaktadır. Bu çalışma aynı zamanda araştırmada kullanılan doğal frekanslı titreşimli bilyalı değirmenin benzersiz tasarım özelliklerini ve performansını vurgulamaktadır. Ayırt edici tasarım özellikleri, bilyalı değirmenler ile teorik olarak karşılaştırılıp endüstriyel ölçekte optimizasyon çalışmaları sayesinde daha ince ürün boyutlarına daha az operasyonel maliyet ve bakım masrafları gibi avantajlarla düşük kapasitelerde daha verimli tesisler tasarlanılacağı umudunu vermiştir.

ULTRAFINE TALC GRINDING: EFFECTS OF PARAMETERS USING VIBRA-DRUM AND COMPARISON WITH ROTARY BALL MILL

SUMMARY

Talc is basically hydrated magnesium silicate with the formula $\text{Mg}_3(\text{Si}_2\text{O}_5)_2(\text{OH})_2$. It contains 31.7% MgO and 63.50% SiO_2 . It is a hydrophobic material with low electrical conductivity and thermal resistance.

The history of talc can be traced back to 1984 and was first introduced to the world as baby powder. Other usage areas were developed later on. Today, the biggest consumption area of talc is the paper industry. In the paper industry, it is used in pulp making to produce paper. Talc is especially used in the paper and ceramic industry due to its softness and whiteness. These properties make it useful for industrial applications. It is used in the ceramic industry to shape and glaze ceramics. There are many industrial products made of talc such as tiles, porcelain and kitchenware. In addition to the paper and ceramic industry, it is used in the cosmetics industry, animal feed, pharmaceuticals, pesticides and chemicals. Talc can be used in many industries because of its hardness, ability to absorb certain liquids and increase stability. Because it has so many uses in industry, it is important to understand its properties.

Talc with a particle size of 44 microns is needed in the ceramic and paint industry, while in the paper industry these values are 8-12 microns and in cosmetics 7 microns.

Ultrafine talc grinding process has a significant challenge due to its significant elastic properties at very fine particle sizes. While conventional ball mills were used in the previous talc grinding processes, different grinding methods were used to avoid the difficulties caused by the properties of talc. Difficulties such as avoiding contamination due to the demand for white color in the industries and the difficulty of drying after wet grinding have a certain impact on the grinding design of talc. Apart from the vibrating mill, which is the subject of this study, other mills used are horizontal or vertical stirred mills, disk mills.

Key parameters which are examined in this study such as frequency, ball size, and feed amount adjustments are needed for the optimization of natural frequency vibrating ball mills for talc grinding. Determining the optimum combination of these parameters is crucial for feasible and optimum talc grinding. This study conducts comprehensive grinding tests using a natural frequency vibrating ball mill, systematically varying the frequency, ball size, media, and feed amount to evaluate their effects on grinding efficiency.

The Vibra-Drum's unique two-mass system, employed by General Kinematics in various equipment such as screens, vibratory conveyors, feeders, and dryers, distinguishes itself from conventional brute force vibratory equipment operate by directly mounting vibratory motors or drives to the primary mass which is main body.

In contrast, the two-mass system is characterized by two different vibrating masses connected with a spring system. One mass, known as the trough (main body), and the other as the exciter or drive mass, are engaged through a system of springs activated by vibratory motors. This configuration allows the two masses to produce a natural frequency vibration.

Thanks to sub-resonant frequency by the spring system between the two masses, much smaller energy is needed to achieve the desired amplitude compared to the brute force system. The benefits of this setup include preventing cracks and deformations on the equipment due to vibration, as the motors do not induce stress on the main body, eliminating imbalances in the steel connections, welds, or bolts. This results in lower maintenance and operating costs

Furthermore, laboratory-scale vibratory grinders allow for adjustments in frequency and amplitude by altering the position of eccentric counterweights on the drive mass. For instance, at a high frequency, a 10 mm amplitude can be modified to be shorter or longer by adjusting the counterweights, demonstrating the system's versatility in controlling vibrational parameters.

Although the resulting particle size distribution is a primary measurement used in industry to determine the effectiveness of the grinding process for the required talc fineness, it is also necessary to observe changes in noise during grinding for optimisation or control. In this study, decibel levels were measured in addition to other measurements and it was observed that decibel levels increased as the product particle size decreased. This increase in noise is explained by the increase in the frequency of contact between the balls as the particle size decreases. It was also found that the use of coarser grinding media and higher frequency is a parameter that increases the decibel level.

The Vibra-Drum's unique two-mass system plays a crucial role in maintaining stable stroke and frequency, contributing to consistent grinding performance. This stability is particularly advantageous in achieving uniform particle size distributions. The study's results indicate that the finest talc product, approximately 59.121 microns, was produced under conditions of the highest frequency, smallest ball size, and lowest feed amount. This highlights the importance of optimizing these parameters to achieve the desired ultrafine grinding results.

Vibra-Drum's unique two-mass system plays a crucial role in maintaining a constant genlike and frequency as in other processes like screening, providing consistent grinding performance. It is important to note that the two-mass system is more adaptable to changing conditions, such as feed rate, than other vibratory equipment

and therefore does not change its parameters. This stability is particularly advantageous in obtaining homogeneous product particle size distributions.

The results of the study show that the finest talc product of approximately 59.121 microns which D90 value is produced at the highest frequency, smallest ball media and lowest feed rate conditions. This highlights the importance of optimising these parameters to achieve the desired ultrafine grinding results.

Energy consumption measurements were also made in the study and it was found that it was not directly related to the fineness of the grinded product. Instead, energy consumption varies with operational parameters, with genlike and frequency being the most influential parameters.

Regression analysis of the D90 data on the products confirmed that frequency and genlike have the most significant effect on grinding performance. The multiple R-value obtained from the regression analysis was calculated as 0.970620849, indicating a strong correlation between the parameters and the obtained product size.

The natural frequency vibratory ball mill offers a promising solution for future talc grinding processes by providing a vibration that increases or maintains the grinding efficiency. This study also highlights the unique design features and performance of the natural frequency vibratory ball mill used in the research. The distinctive design features have been theoretically compared with ball mills and optimisation studies on an industrial scale have given hope that more efficient plants can be designed at low capacities with advantages such as finer product sizes, reduced operational costs and maintenance costs.





1. GİRİŞ

Talk, günümüzde birçok endüstride kullanılmakta olan bir hammadde olup, kimyasal ve fiziksel özellikleri sebebiyle kozmetik sektöründen plastik sektörüne kadar birçok sektörde yer almaktadır (Zazenski ve diğ, 1995). Talk, temel olarak $Mg_3(Si_2O_5)_2(OH)_2$ formülüne sahip hidratlı magnezyum silikattan oluşmaktadır. Düşük elektrik iletkenliğine, termal dirence sahip hidrofobik bir materyal olmasıyla birlikte %31,7 oranında MgO ve %63,50 oranında SiO_2 içeriğine sahip olması sebebiyle öne çıkmaktadır (Arsoy ve diğ, 2017). Şekil 1.1'den de görülebildiği üzere soluk yeşil renkte ve triklinik kristal bir yapıya sahiptir. Sertliğinin 1-1,5 mohs olduğu düşünüldüğünde oldukça yumuşak yapıda bir hammadde olduğunu söylemek mümkündür.



Şekil 1.1 : Talk minerali.

Talkın tarihi 1984 yılına uzanmaktadır. Dünyaya ilk olarak bebek pudrası olarak tanıtılan talkın diğer kullanım alanları yıllar içerisinde gelişmiş ve şekillenmiştir. Günümüzde, en fazla talk tüketiminin gerçekleştirildiği sektörün kağıt endüstrisi olduğu bilinmektedir. Kağıt endüstrisinde kağıt üretiminin temel bileşeni olan kağıt hamuru yapımında kullanılmaktadır. Talkın, kağıt ve seramik gibi endüstrilerde tercih edilmesinin temel sebepleri arasında beyaz olması, yumuşak olması ve inert olması gösterilebilir. Bahsedilen bu özellikleri sayesinde endüstriyel uygulamalarda tercih edilir hale gelmektedir. Kağıt endüstrisinden farklı olarak, seramik endüstrisinde

kullanıldığı durumlarda seramiğin şekillendirilmesine ve cilalanmasına olanak sağlamaktadır. Kağıt ve seramik endüstrisi haricinde ise porselenler, yemek takımları, kozmetik ürünleri, hayvan yemleri, ilaçlar, pestisitler ve kimyasallar gibi birçok endüstriyel ürünün içeriğinde yer almaktadır. Sertliğin artırılmasını sağlaması, absorpsiyon sağlaması ve stabiliteyi artırması sayesinde birçok endüstrinin hammaddesidir (Sinniah, 2011).

Seramik ve boya endüstrisinde tercih edilen talk boyutu 44 mikron iken, bu değerler kağıt endüstrisinde 8-12 mikron ve kozmetik endüstrisinde 7 mikron olarak çeşitlilik göstermektedir (Kim ve diğ., 2019). Bu sebeple, talkın yukarıda da bahsedilen endüstrilerde kullanılabilmesi için, öğütülerek pudra formuna getirilmesi gerekmektedir.

Arsoy ve diğ. (2017), titreşimli bilyalı değirmen kullanılarak kuru öğütme gerçekleştirilmesi durumunda, talkın pudra haline dönüştürülmesi için yaklaşık 30 dakikalık bir sürenin yeterli olacağını ortaya koymuştur. Yapılan çalışmaya göre, daha uzun sürelerde öğütme yapılması durumunda ise toplam yüzey alanı ve por hacmi bir miktar artmaktadır. İlaveten, çalışmada öğütmenin talkın rengine olan etkisi incelenmiş ve öğütme ile birlikte talkın beyazlığının arttığı gözlemlenmiştir.

Yukarıda bahsedilen hususlar göz önüne alındığında, günden güne kullanım alanlarının da artması sebebiyle talkın özelliklerini ve öğütülmesini anlayabilmek önemlidir. Literatür çalışmaları incelendiğinde talkın öğütülmesi için disk tipi değirmen (IsaMill) kullanılabildiğine dair çalışmalar görülmüştür (Ki ve diğ., 2019). Talk gibi kullanım alanlarında ultra ince boyutlarda istenilen minerallerin öğütülmesinde konvensiyonel aktarmalı değirmenler dışında ince öğütmenin gerekliliklerinden biri olan 1 mm'den daha küçük öğütücü ortam kullanan titreşimli değirmenler, karıştırıcı değirmenler yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır (Tanaka, 1995).

Endüstrilerde talep edilen boyutların sağlanabilmesi için kuru öğütme yapılması gerekmektedir. Öğütme sırasında öne çıkan en büyük problem ise, talkın ince boyutlarda gösterdiği elastik yapıdır. Bu özellik partikül boyutu azaldıkça daha kritik bir hale gelirken, talep edilen mikronize partikül boyutuna ulaşma konusunda zorluk yaratmaktadır (Kim ve diğ., 2019).

Konvansiyonel öğütme yöntemleri veya ekipmanları, istenen ultra ince boyuta verimli bir şekilde öğütmede sıklıkla limitlerle karşılaştığı için talkın elastik özelliği yenilikçi öğütme stratejilerinin geliştirilmesinde anahtar rol oynadığı anlaşılmış ve yeni yöntemlerin arayışına girilmiştir (Kano J, 2000). Titreşimli bilyalı değirmen gibi özelleştirilmiş öğütme ekipmanlarının kullanılmasına yönelik yaklaşımların, diğer öğütme yöntemleri gibi darbe ve aşınmayla değil, yalnızca aşınmayla öğütülmesi nedeniyle talkın elastik davranışıyla başa çıktığı düşünülmektedir. Dikey ve yatay olabilen karıştırılmalı değirmenler de titreşimli değirmenler gibi öğütme metodu, geleneksel bilyalı değirmenlerden farklı olup taneler ağırlıklı olarak aşınma kuvvetine maruz kalarak öğütme gerçekleşmektedir (Eswaraiah ve diğ, 2015).

Talk gibi sertliği 4 mohs değerinden düşük olan yarı sert minerallerin 50 mikrona kadar öğütülmesinde havalı separatörlerle kapalı devre olarak çalışan rotorlu darbeli öğütücüler de kullanılıp olup çarpma hızı ve açısı öğütme kinetiğini etkileyen önemli parametrelerdir (Drögemeier ve diğ, 1996).

1.1 Tezin Amacı

Bu tezin amacı ve kapsamı, titreşimli değirmen öğütme yönteminin parametrelerinin incelenmesini sağlamak ve bu parametreler ile elde edilen sonuçlar arasındaki karmaşık ilişkiyi modellemek ve anlamaktır. Frekans, genlik, bilya boyutu ve malzeme besleme miktarı gibi değişkenleri sistematik olarak analiz eden bu çalışma, bahse konu parametrelerin öğütme verimliliği ve ürün boyutu dağılımı üzerindeki etkisini aydınlatan öngörülü modelleri geliştirmeyi amaçlamaktadır. Nihai amaç, endüstriyel ölçekte optimizasyon çalışmalarına rehberlik edecek bu yöntemi kullanarak, çeşitli uygulamalardaki öğütme işlemlerinin verimliliğini ve etkinliğini artıracak kararların kısa sürede alınmasını sağlamaktır. Bu araştırma aracılığıyla tez, öğütme süreçlerini optimize etmek için bir çerçeve sağlamayı ve endüstride performansın ve maliyet etkinliğinin iyileştirilmesine katkıda bulunmayı amaçlamaktadır.

1.2 Literatür Araştırması

1.2.1 Öğütme yöntemi

Talkın mikronize öğütülmesi için, bu tez kapsamında deneyler sırasında kullanılması planlanan değirmen Amerika Birleşik Devletleri menşeli General Kinematics

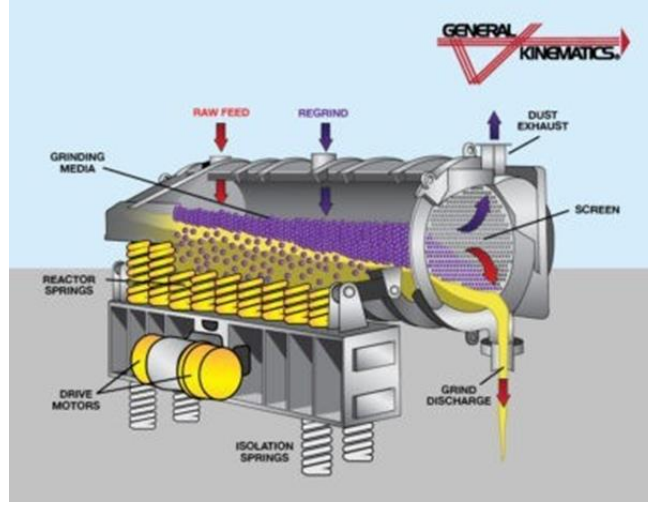
firmasına ait ticari adı VIBRA-DRUM® olan yatay doğal frekanslı titreşimli değirmendir. Doğal frekanslı denilmesinin sebebi aşağıda anlatılacak olan Çift Kütleli Sistem'e sahip olmasıdır.

Ultra ince öğütme için kullanılan Şekil 1.2'de endüstriyel ölçekli titreşimli değirmenler genellikle kauçuk veya çelik yaylar üzerine monte edilmekte olup, bilya şarjının değirmen haznesi hacminin %60-70 kadarı olması gerektiği ve öğütme ortamına uygulanan titreşim hareketi sayesinde bu değirmenlerin malzemeyi verimli bir şekilde küçük boyutlara getirebileceği bilinmektedir (Yıldız, 2022). Öğütme odasının olduğu gövdeye monte tek taraflı yaylar titreşim motorlarının titrettiği başka bir gövdeye bağlanarak malzemenin hareketini sağlayacak titreşimi sağlar.



Şekil 1.2 : Endüstriyel ölçekli VIBRA-DRUM®.

Vibra-Drum titreşimli öğütücünün dizaynı incelenecek olunursa Şekil 1.3'de detayları görüldüğü üzere öğütme odası, yay ve titreşim motorları olacak şekilde ana parçalara ayrılmıştır. Taze besleme öğütme işlemi sonrasında değirmen çıkışı malzemenin sistemin kuru ya da yaş olmasına bağlı olarak kullanılan havalı separatör, elek veya hidrosiklon gibi sınıflandırıcıya beslenmesi sonucu elde edilen devreden yük değirmenin ortasından beslenebilmektedir. Bu da değirmenin başlangıç kısmındaki gereksiz malzeme yükünü azaltarak öğütme verimini arttırmaktadır. Değirmen çıkışında bulunan elek sayesinde elek açıklığından büyük ve aşınmamış öğütücü ortamın değirmen içinde kalmasını sağlamaktadır.



Şekil 1.3 : VIBRA-DRUM® iç dizaynı.

Şekil 1.4’de incelendiği üzere Vibra-Drum değirmenlerde boyut küçültme oranı ve istenen tane boyut dağılımı gibi gereklilikleri ve malzeme karakteristiği göz önünde bulundurularak öğütücü ortam olarak bilya, çubuk veya silpeps kullanılabilir. Bu öğütücü ortamlar farklı içeriklerdeki çelik, zirkonyum ya da seramik olabilmektedir. Her malzeme çeşidinin kendine göre uygulama alanları ve avantajları mevcuttur. Örnek olarak seramik bilyalar çelik bilyalara göre kuru öğütmede daha fazla boyut küçültme oranına sahip olmakla birlikte cevherdeki kontaminasyonun da önüne geçmektedir. Ayrıca, Şekil 1.4’de de görülebileceği üzere, değirmenin iç yapısı konvansiyonel aktarmalı değirmene benzemekle birlikte, malzemenin ve öğütme ortamının hareketi nedeniyle lifter bar gibi özel ve yardımcı astarlara ihtiyaç yoktur.



Şekil 1.4 : Bilya (sol) ve çubuk (sağ) öğütücü ortam tipleri.

Endüstriyel hammadde üretimlerinde ya da çimento üretim tesislerinde kuru öğütme için kullanılan değirmenlerdeki kompartıman sistemi doğal frekanslı titreşimli değirmenlerde de geçerlidir. Öğütme veriminin artması için yapılan bu sistemde iri ve küçük bilyalar öğütme odasının ortasında yer alan elek yardımıyla birbirlerinden ayrı

tutulurlar. İri bilyalar aşınıp ikinci kompartımana uygun boyuta ulaştığında elekten geçerek orada öğütmeye yardımcı olmaya devam eder. Yukarıda belirtildiği gibi devreden yük de değirmenin ortasından beslendiğinden tek bir değirmende ön öğütme ve nihai öğütme işlemi gerçekleştirilmiş olur (General Kinematics, 2022).

Değirmenin ana çıkışı haricinde, kuru öğütme sistemi söz konusu olduğunda bir de toz çekme sistemi de bulunmaktadır (Şekil 1.3). Bilindiği üzere kuru kırma ve öğütme devrelerinde hem tesis çalışanları etkileyen hem de çevreyi etkileyen toz problemi tesislerin en büyük zorluklardan bir tanesidir. Vibra-Drum ile öğütmelerde öğütme yönteminden kaynaklı az toz oluşumu söz konusu olsa da değirmen çıkışının yakınına konumlandırılmış vakum ile tozu çeken bir sistem sayesinde toz probleminin önüne geçilebilmektedir (General Kinematics, 2022).

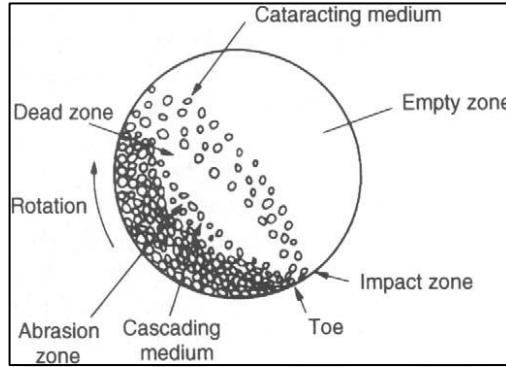
Vibra-Drum yani doğal frekanslı titreşimli öğütücüler Dünya genelinde birçok uygulamada kullanılmaktadır. Referans öğütme uygulamaları Çizelge 1.1'de gösterilmektedir. Bunlara ek olarak Maden sektörü dışında gıda sektöründe de kakao buğday gibi maddelerin öğütülmesinde de kullanılmaktadır.

Çizelge 1.1 : VIBRA-DRUM ile öğütme uygulamaları.

Öğütme Uygulamaları	
Alümina	Manyetit
Alüminyum oksit	Metalik Cüruf
Barit	Nikel/Ferrokrom Alaşımları
Baryum Ferrit	Krom Karbür
Kalsine Manyezit	Kok Kömürü
Seramik	Fosfat
Kil	Kuarsit
Ferro-Silikon	Silika Kumu
Ferroalaşımlar	Silisyum Karbür
Grafit ve Sentetikler	Titanyum
Demir oksitler	Tungsten karbür

Şekil 1.5.'te geleneksel aktarmalı değirmenlerde öğütücü ortamın hareketi gösterilmekte olup öğütme ortamının katarakt ve kaskat olmak üzere iki hareketi vardır (Danha, 2013). Katarakt, malzemeyi darbe yoluyla öğütürken, kaskat hareket ise malzemeyi aşındırma yoluyla öğütür. Geleneksel döner değirmenler her iki hareket için de enerji kullanırken VIBRA-DRUM'da öğütme ortamının hareketi sadece kaskat hareketi içerir. Bu nedenle, Şekil 1.5'te görülen ölü bölge doğal frekanslı titreşimli değirmenlerde yoktur ve ayrıca öğütücü ortamı yukarı kaldırmak için enerji tüketimi

de söz konusu değildir. Ayrıca bu farklılık sayesinde değirmen astarının ve öğütme ortamının aşınması daha az indirgenir. VIBRA-DRUM® Öğütme Değirmeninde öğütücü ortam ve cevherin astarlara temas bölgesi öğütme odası çevresinin yalnızca %60'ı olduğundan, yalnızca bu bölge değiştirilebilir astarlar gerektirir ve bu da ilk kurulumda ve değirmen duruş süresinde önemli ölçüde tasarruf sağlar (General Kinematics, 2022).



Şekil 1.5 : Aktarmalı bilyalı değirmendeki malzeme hareketlerini gösteren şema.

Öğütme prosesinde doğal frekanslı titreşim değirmenlerde sağladığı titreşim sayesinde öğütücü ortam büyük bir kütle olarak davranır. Bu da cevhere bir darbe etkisi sağladığı söylenebilir. Fakat bunun için bilyalı değirmenler gibi ekstra bir enerjiye ihtiyaç duymaz.

VIBRA-DRUM®, aşağıda açıklanan Çift Kütleli Sistem adı verilen bir titreşim sistemi ve geleneksel bilyalı veya aktarmalı değirmenlerinden daha verimli olan malzeme hareketi (kaskat hareketi) sayesinde önemli ölçüde enerji tasarrufu (%35-50) sağlamaktadır (General Kinematics, 2022). Titreşimli değirmenler dışında ultra ince öğütme yapan karıştırmalı değirmenlere örnek olarak 20 ton/saat kapasiteli ve -6 mikron ürün veren karıştırmalı değirmenin bilyalı değirmene göre %60 daha az enerji tükettiğini belirten Eswaraiha ve diğerlerinin yapmış olduğu çalışma verilebilir (2015). Doğal frekanslı titreşimli değirmen olan Vibra-Drum'ın diğer avantajlar aşağıda görülebilir;

- Kompakt tasarımı sayesinde tahrik devir redüktörleri, ek üniteler veya büyük rulman yatakları gerektirmez.
- Az sayıda hareketli parçaya sahip olması bakım maliyetlerini azaltır.

- Düşük dinamik yüklere sahip olduğundan geleneksel döner değirmen devrelerinin aksine büyük bir beton temel gerektirmez.
- Değirmen tasarımında bulunan yapısal çelik şasiler uygun bir taşıyıcı zemine kolaylıkla civatalanabilmektedir.

Doğal frekanslı titreşimli değirmenlerde diğer değirmenlere göre değiştirilmesi kolay parametreler mevcuttur. VIBRA-DRUM® parametreleri aşağıdaki gibidir;

- Frekans/Genlik
- Kalma Süresi
- Öğütücü Ortam Yüğü
- Öğütücü Ortam Boyutu
- Besleme Miktarı
- Nem İçeriğı
- Pülpte Katı Oranı (Yaş Öğütme ise)

Bernhardt ve diğ, karıştırmalı değirmenler gibi ultra ince öğütmede kullanılan öğütücülerde önemli bir parametre olan beslenen malzemenin ya da çamurun viskozitesinin tanecik şekline, boyutuna ve pülpte kat oranına bağılı olduğunu belirtmiştir (1999). Bu durum yaş öğütmelerde titreşimli değirmenlerde de geçerlidir. 2 mikrona kadar olan ultra ince yaş öğütmelerde pülpte katı oranı öğütme verimliliğine en fazla etki eden parametredir (Bernhardt ve diğ, 1999).

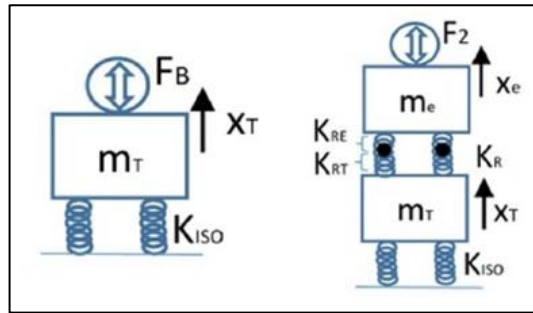
Titreşimli değirmenlerde en büyük etki yaratan frekans yerine karıştırmalı değirmenlerde karıştırıcı hızı öğütme verimliliğı için ön plana çıkmaktadır. Celep ve diğ yapmış olduğu çalışmada belirtmiş olduğu karıştırmalı değirmenlerde öğütücü ortamın hacimce %85 olması ve spesifik enerji tüketiminin aktarmalı bilyalı değirmenlere göre daha az olması özellikleri titreşimli değirmenlerde de geçerlidir

1.2.2 Çift kütleli sistem

Doğal frekanslı titreşimli değirmen olan Vibra-Drum'ın kullandığı özgün çift kütleli sistem (*Two Mass System*) General Kinematics firmasının elek, titreşimli konveyör, besleyiciler ve kurutucular gibi neredeyse tüm ekipmanlarında kullandığı bir sistemdir. Normalde madencilik sektöründe görülen ve kullanılan konvansiyonel

titreşimli ekipmanlar tek bir kütleyle (ana gövde) sahip olduğundan “*Brute Force*” denilen titreşim motorlarının ya da tahrikin direkt olarak ana gövdeye montesi ile tamamlanan bir sistem ile titreşimi sağlar. Bu “*brute force*” ünitesi, sırasıyla izole bir titreşim eylemine sahip olmak ve yüksek savrulma kuvvetleri oluşturmak için eksantrik dönen ağırlıklar ve tahrik gücü olarak büyük eksantrik ağırlıklar ile tasarlanmıştır (Frank ve diğ., 2022). Frank ve diğ., *Brute Force* ile çift kütleli sistem arasındaki farkın, çift kütleli sistemin, bir yay sistemi aracılığıyla birbirine bağlanan iki ayrı titreşimli kütle olarak tasarlanması olduğunu belirtmiştir. Bunlardan biri *trough* olarak adlandırılan ekipmanın ana gövdesi, diğeri ise exciter veya tahrik kütlesi olarak adlandırılır (Leonida ve diğ., 2021). Titreşimli motorlar sayesinde hareket eden tahrik kütlesi, aradaki yayların yardımıyla ana gövdeyi hareket ettirmeye başlar. Böylelikle 2 kütlede birbirine karşı bir kuvvet uyguladığından doğal frekanslı bir titreşim sağlanmış olur.

Şekil 1.6.'te gösterildiği gibi, iki kütle arasındaki yay sistemi iki kütleli birbirini etkilediği sub-rezonant frekansı sağlar ve bu da istenen genlik için brute force sistemine kıyasla çok daha küçük bir kuvvete ihtiyaç duyulmasına neden olur (Frank ve diğ., 2022). Daha küçük bir kuvvetin kullanılması nedeniyle, aynı genlik veya frekans için tahrik kütlelerinin genliği ana gövdeye göre daha düşük olduğundan enerji tüketimi daha az olacaktır.



Şekil 1.6 : Brute Force ile çift kütleli sistemin karşılaştırılması.

Daha iyi anlamak için Şekil 1.7.'de gösterilen elek gövdesinin üstünde bir tahrik kütlesi bulunan çift kütleli bir elekte iki kütle çelik yaylar ile birbirlerine bağlanmıştır. Tahrik gövdesinin titreşim motorları ve elek gövdesi ile yaylı bağlantısının faydası, titreşim nedeniyle elekte çatlak ve deformasyon oluşmasını önlemektir. Motorlar ana gövdede bir gerilim yaratmadığından dolayı çelik bağlantı kısımlarında, kaynaklarda ya da cıvatalarda dengesiz bir kuvvet mevcut değildir. Bu da daha az bakım ve işletme maliyeti sağlar.

Çift kütleli sistemin bir diğer özelliği ise düşük dinamik yüklere sahip olmasıdır. Bu, ekipman çalışırken bağlı olduğu zemine ya da şasiye bir titreşim vermemesiyle o yapının daha uzun ömürlü olmasını sağladığı anlamına gelmektedir. Ayrıca yakındaki proseste beraber çalışan diğer ekipmanlara da vibrasyon sağlamayacağından tesis çevresinin daha iyi bir ortama dönüşmesi demektir.

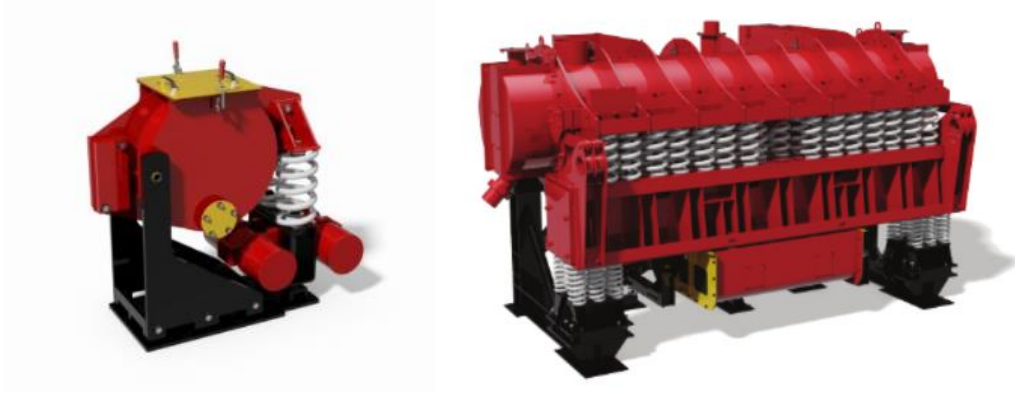


Şekil 1.7 : Çift kütleli elek.

Frank ve diğ. (2022) tarafından gerçekleştirilen çalışmaya göre, çift kütleli sistem teknolojisi birçok avantaja sahiptir;

- Daha az enerji tüketimi (%70 enerji tasarrufu)
- Aynı boyuttaki diğer ekipmanlara kıyasla daha fazla kapasite
- Daha yüksek verimlilik sağlayan daha uzun kalma (retention) süresi
- Daha yumuşak çalışma ve durma
- Daha düşük dinamik yük

Çift kütleli sistem kullanan STM eleklerin Frank ve diğerlerinin yapmış olduğu bir vaka çalışmasıyla daha yüksek bir verimle aynı ayak iziyle yani aynı boyutta kapasiteyi 1.800 mton/saat'ten 2.400 mton/saat'e çıkarmayı başardığı kanıtlanmıştır (2022). General Kinematics'in bu teknolojisi, şirketin üretim yelpazesindeki her ekipman parçasında kullanılmaktadır. Buna VIBRA-DRUM® da dahildir. Öğütme haznesine bağlı 2 titreşimli motora sahip tahrik kütleli Şekil 1.8'de görülebilir. Titreşim sayesinde malzeme ve öğütme ortamı hareket ettirilir. Çift kütleli sistem sayesinde diğer titreşimli değirmenlere göre daha az enerji sağladığı sonucu çıkartılabilir.



Şekil 1.8 : Laboratuvar ölçekli Vibra-Drum öğütücü (sol) endüstriyel ölçekli Vibra-Drum öğütücü (sağ).

Laboratuvar ölçekli titreşimli öğütücüye ait tahrik kütesine monte edilmiş titreşim motorları Şekil 1.9’da incelenebilir. Burada eksantrik karşı ağırlıkların pozisyonu değiştirilerek frekans ve genlik bağıntısı değiştirilebilmektedir. Örnek olarak yüksek frekansta 10 mm genlik ise ağırlıkların konumları değiştirilerek bu aynı frekansta 10 mm’den daha kısa ya da uzun yapılabilir.



Şekil 1.9 : Laboratuvar ölçekli Vibra-Drum öğütücü titreşim motoru detayı.



2. MATERYAL VE METOT

2.1 Öğütme Deneyleri

Öğütme deneyleri için Bilecik bölgesinden Talk cevheri tedarik edilmiştir. Öğütme deneyleri öncesinde, talk cevheri çok iri boyutlardan geldiğinden dolayı gerçekleştirilecek olan tüm deneylerde besleme tane boyutunun eşit olması amacıyla talk 2 mm boyutuna kadar elenmiştir. Eleme işlemi tamamlandıktan sonra numune ayırıcı ile her deney için kararlaştırılan miktara bölünmüştür. Besleme yapılacak malzemenin hazırlanmasının ardından, partikül boyut dağılımı gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen tane boyut dağılımına ait sonuçlar Çizelge 2.1’de yer almaktadır. Malzemenin %80’i 1,19 mm altındadır.

Çizelge 1.2 : Beslemenin partikül boyut dağılımı.

Elek Boyutu	Kümülatif Elek Altı
mm	%
2,00	100
1,19	80
0,59	64
0,297	43
0,149	23
0,074	7

Öğütme deneyleri gerçekleştirilirken frekans/genlik, besleme miktarı ve ortalama bilya boyutu olmak üzere öğütmeyi etkileyen üç temel parametre yakından incelenmiştir. Gerçekleştirilen çalışmada talk için talep edilen 7 mikron boyutuna ulaşmak değil, öğütmeyi etkileyen parametrelerin önceliklendirilmesi ve sıralanması amaçlanmıştır. Bunun sonucunda parametreler değiştirilerek istenilen boyuta ulaşmak için optimizasyon çalışması yapılabilir. Yapılan deneylerin sonuçları yorumlanırken bu sonuçların açık devre bir öğütme prosesine ait olduğu hatırlanmalıdır. İstenilen ultra ince tane boyutuna ulaşmak için havalı separatör ile kapalı devre çalıştırılması gerekmektedir.

Tüm deneyler gerçekleştirilirken, öğütme içerisinde malzemenin kalma süresi 1 saat olarak belirlenmiştir. Bunun sebebi sürenin aşağıda bahsedilecek olan değişimleri gözlemlemek için uzun olması gerektiğindendir. Beslenen malzemenin nem içeriği kuru öğütme prosesi için kritik olmayan bir değer olarak kabul edilen %3'te tutulmuştur. Öğütmeyi etkileyen üç temel parametre (frekans/genlik, besleme miktarı ve bilya boyutu) sistematik olarak deney planına göre değiştirilerek 16 farklı deney gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen deneylere ilişkin parametre değerleri Çizelge 2.2'de yer almaktadır.

Çizelge 1.3 : Deney tasarımı.

Deney No	Ortalama Bilya Boyutu mm	Besleme Miktarı kg	Frekans RPM	Genlik mm
1	13	30	1004	9
2	13	30	1066	12
3	13	30	1114	15
4	13	20	1006	9
5	13	20	1074	12
6	13	20	1113	15
7	25	30	1009	9
8	25	30	1073	12
9	25	30	1127	15
10	25	20	1010	9
11	25	20	1073	12
12	25	20	1120	15
13	19	30	1004	9
14	19	30	1115	15
15	19	20	1004	9
16	19	20	1111	15

Testlerde kullanılan ortalama bilya boyutları Çizelge 2.2'de ortalamalar olarak sunulmuştur. Ayrıntıya girmek gerekirse, 19 mm'lik ortalama bir bilya boyutu, ağırlıkça eşit miktarda 13 mm ve 25 mm'lik bilyalardan oluşan bir karışımı temsil etmektedir. Bununla birlikte, 13 mm veya 25 mm gibi belirli boyutlara atıfta bulunulduğunda, söz konusu testlerde yalnızca tek tip bir bilya boyutunun kullanıldığına dikkat edilmelidir. Her bir testte kullanılan toplam öğütücü bilya miktarı sürekli olarak 200 kg olmuştur.

Endüstriyel uygulamalarda, ideal olarak bilyaların seramik malzemeden yapılmış olması gerekmektedir. Seramik bilyalar, diğer bilyalar ile karşılaştırıldığında sertliği sebebiyle daha ince boyutta öğütme sağlanabilmesi için uygundur. Ek olarak, talk kullanımı olan endüstrilerin birçoğunda hammadde rengi ürün rengini de

etkileyebildiği için talkın renginin öğütme sırasında değişmemesi gerekmektedir. Bu nedenle demir bilya kaynaklı kirlenmeleri önlemek için seramik bilyalar tercih edilmektedir. Ayrıca, daha küçük boyutlarda bilyaların kullanılması temas ve etkileşim için yüzey alanını artırarak öğütmenin verimini arttırabilmektedir (Arsoy ve diğ, 2017).

Deneyler sırasında değiştirilen üçüncü parametre olan frekans/genlik için düşük, orta ve yüksek olmak üzere 3 farklı ayarda çalışılmıştır. Farklı frekans değerlerinde tutarlı bir genlik sağlamak için frekansın hassas bir şekilde ayarlanması gerekmektedir. Bu ayarlama hassas bir genlik değerinin korunmasıyla doğru matematiksel analiz için çok önemlidir. Bu yüzden matematiksel analizde frekans değil genlik kullanılmıştır. Genlik için düşük, orta ve yüksek ayarlar sırasıyla 9 mm, 12 mm ve 15 mm'ye karşılık gelmektedir.

Laboratuvar ölçekli titreşimli değirmen yığın prosesi (*Batch Process*) olarak tasarlandığından her deney için Şekil 2.1’de görüldüğü gibi belirlenen miktarda cevher ve bilya öğütücünün üstünde bulunan kapaktan beslendikten sonra tozuma olma ihtimaline karşı kapatılarak deneye hazırlanılmıştır.



Şekil 2.1 : Öğütme öncesi talk cevheri ve bilya besleme.

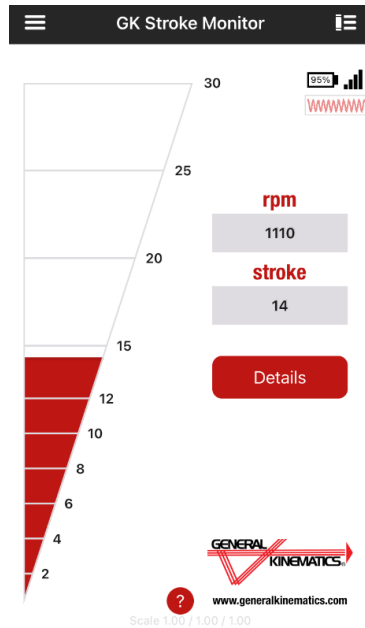
Her 1 saatlik öğütme sonrasında Şekil 2.2’de görülen ızgaralı değirmen çıkış flanşından değirmen en fazla 5 dakika çalıştırılarak sadece malzemenin akışı sağlanıp öğütülmüş ürünler alınmıştır.



Şekil 2.2 : Laboratuvar ölçekli titreşimli değirmen çıkışı.

2.2 Ölçüm Yöntemi

Deneyler sırasında, ilk öğütme ile 30 dakika sonundaki öğütme arasındaki farkın net bir şekilde görülebilmesi için gürültü (dB) ve frekans/genlik değerleri gözlemlenmiş ve kaydedilmiştir. Öğütme işlemi ve gürültü arasındaki ilişkinin görülebilmesi için gürültü ölçümleri desibel metre ile gerçekleştirilmiştir. Frekans/genlik değerleri ise Şekil 2.3.’ten de görülebileceği gibi, General Kinematics firmasına ait manyetik titreşim ölçer ile mobil uygulama üzerinden çevrimiçi verileri alarak ölçülmüştür.



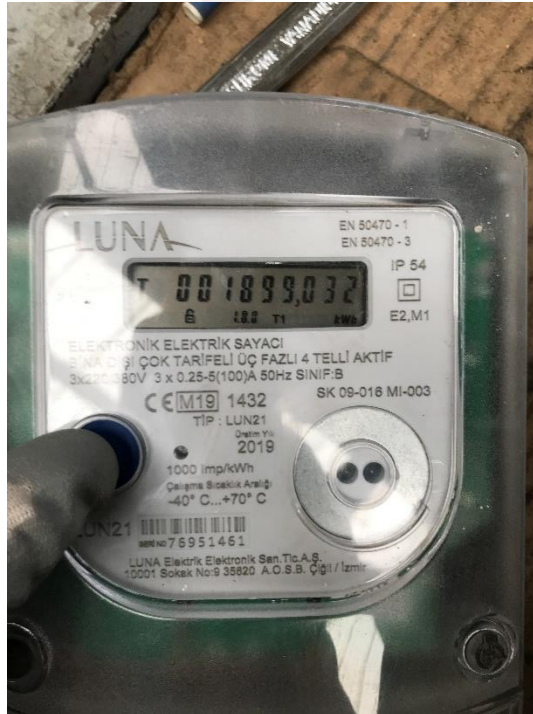
Şekil 2.3 : Frekans ve genlik ölçüm cihazı yazılımı.

Ayrıca yapılan online ölçümlerin sağlanması yapmak ve teyit etmek için öğütücün üzerinde bulunan ve Şekil 2.4'te görülen etiket yardımıyla da gözlem ile genlik ölçülmüştür. Titreşim ile birlikte üçgen şekilde 2 adet gözükmetedir ve 2 üçgenin kesişim noktası o titreşimin genliğini göstermektedir.



Şekil 2.4 : Genlik ölçüm etiketi.

Frekans/genlik ve gürültü ölçümlerine ilave olarak, enerji tüketimleri de gerçekleştirilen deneyler sırasında kayıt altına alınmıştır. Şekil 2.5'te yer alan enerji tüketim sayacı, öğütme sırasında kullanılan gücün kaydedilmesi için kullanılmıştır. Bu sayaç, enerji tüketim verilerinin gözlemlenebilmesini sağlayarak öğütme verimliliği ve güç ihtiyaçlarının analiz edilmesine olanak sağlamaktadır.



Şekil 2.5 : Enerji tüketim sayacı.

Yukarıda bahsedilen ölçümler ile tüm kritik parametrelerin doğru bir şekilde kaydedilmesi ve analiz edilmesi sağlanarak öğütme prosesi için kapsamlı bir değerlendirme sağlanabilmesi amaçlanmıştır.



3. SONUÇ VE TARTIŞMA

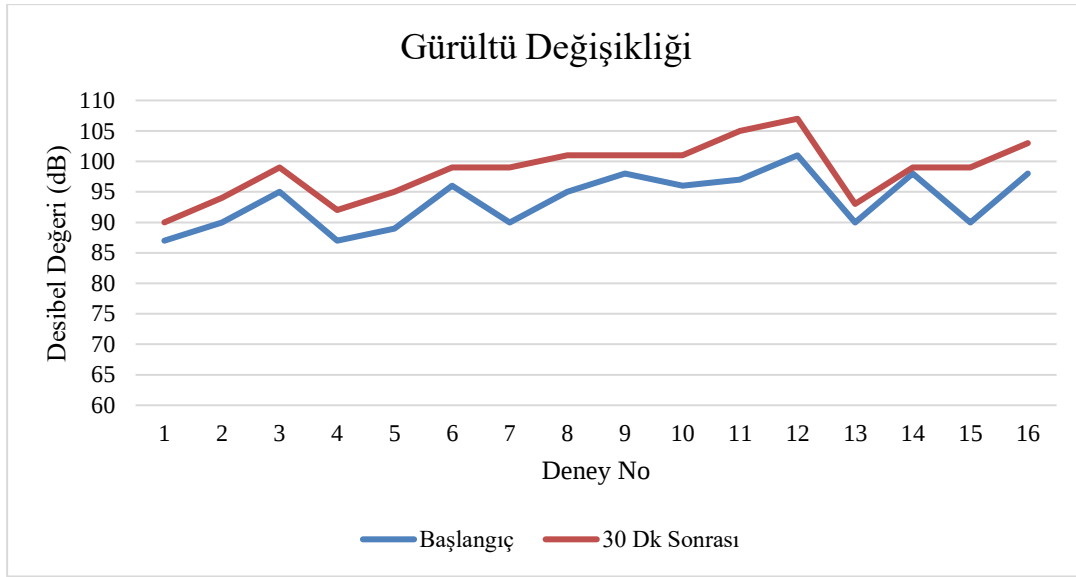
3.1 Gürültü Değişimleri

Deneyler gerçekleştirilirken, gürültü seviyelerinde meydana gelen değişimler gözlenmiş ve kaydedilmiştir. Çizelge 3.1’de ve Şekil 3.1’de de gözlenebildiği üzere 30 dakika üzerindeki öğütmelerde gürültü seviyeleri fark edilir derecede artmaktadır.

Çizelge 3.1 : Gürültü değişimleri.

Deney No	Genlik mm	Besleme Miktarı kg	Ort. Bilya Boyutu mm	Başlangıç dB	30 dk Sonrası dB
1	9	30	13	87	90
2	12	30	13	90	94
3	15	30	13	95	99
4	9	20	13	87	92
5	12	20	13	89	95
6	15	20	13	96	99
7	9	30	25	90	99
8	12	30	25	95	101
9	15	30	25	98	101
10	9	20	25	96	101
11	12	20	25	97	105
12	15	20	25	101	107
13	9	30	19	90	93
14	15	30	19	98	99
15	9	20	19	90	99
16	15	20	19	98	103

Gürültü seviyesindeki bu artışı, tane boyutunun giderek azalması sonucu öğütücü ortam ile cevherin arasındaki temas yoğunluğu ve sıklığının artmasıyla açıklamak mümkündür. Ayrıca iki bilya arasındaki tampon oluşturan malzeme katmanı da giderek malzeme boyutunun düşmesiyle birlikte incelmeye başladığından bilyaların çarpışma sesi daha fazla olduğu gözleminde bulunulabilir.



Şekil 3.1 : Her deney için gürültü değişikliği grafiği.

Deney sonucu gözlemlenen gürültü değişimleri, desibel seviyelerinin tesis içerisindeki öğütme prosesinin izlenmesi ve kontrol edilmesi için geçerli bir parametre olarak kullanılabileceğini göstermektedir. Gürültü verilerinin sürekli izlenmesi ve değerlendirilmesi ile öğütme dinamikleri hakkında yorum yapmak ve performansı optimize etmek için gerekli ayarlamaları yapmak mümkün olabilmektedir.

İlave olarak, deneyler sonucunda elde edilen veriler öğütme frekansı ile gürültü seviyeleri arasındaki ilişkiyi de vurgulamaktadır. Çizelge 3.2’de yer alan frekans ve gürültü seviyeleri değerlendirildiğinde, yüksek frekansa sahip öğütme prosesinin düşük frekanslı öğütme prosesine göre daha fazla gürültüye sebep olduğu sonucuna varılabilmektedir. Çizelge incelendiğinde diğer parametrelerin sabit kalıp frekansın değiştiği örnek olarak Deney No 1, 2, 3 karşılaştırıldığında sırasıyla gürültü değerleri 87, 90, 95 dB olarak ölçülmüş olup 1114 rpm frekanslı öğütmenin gürültü oranının daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Bu durum, öğütmenin yüksek frekanslarda yapılması durumunda bilyalar ile öğütülen malzeme arasında daha hızlı ve daha sert çarpışma olması sebebiyle daha yüksek gürültü seviyeleri oluşturmasıyla açıklanabilmektedir.

Çizelge 3.2 : Frekans ve gürültü karşılaştırması.

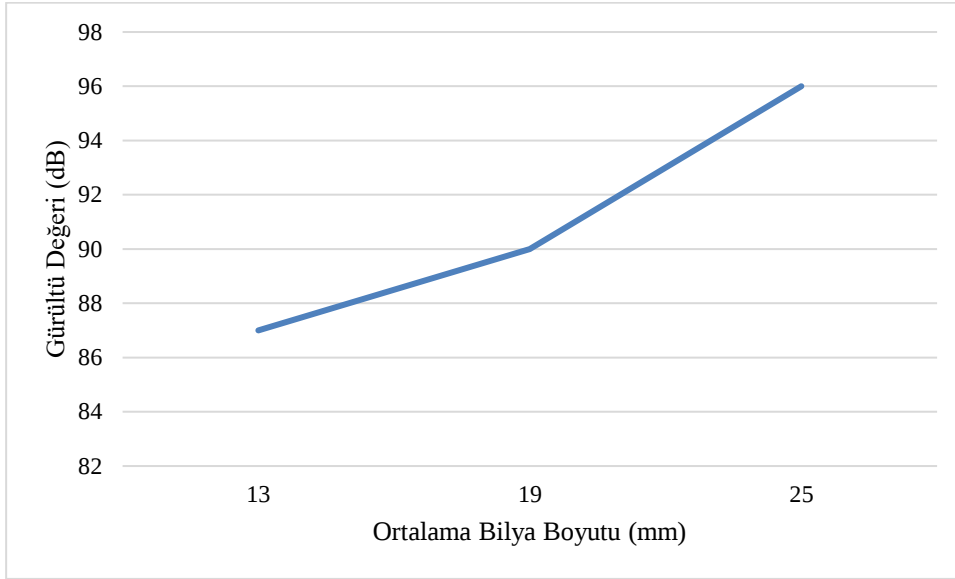
Deney No	Frekans RPM	Başlangıç Gürültü dB
1	1004	87
2	1066	90
3	1114	95
4	1006	87
5	1074	89
6	1113	96
7	1009	90
8	1073	95
9	1127	98
10	1010	96
11	1073	97
12	1120	101
13	1004	90
14	1115	98
15	1004	90
16	1111	98

Çizelge 3.3, bilya boyutu ve meydana gelen gürültü arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Elde edilen veriler incelendiğinde, bilya boyutu ve gürültü arasında doğru orantı olduğu değerlendirilmektedir. Bilya boyutu arttıkça malzeme ile daha kuvvetli bir çarpışma gerçekleştiği için daha yüksek gürültü seviyeleri gözlenmektedir.

Çizelge 3.3 : Bilya boyutu ve gürültünün karşılaştırılması.

Deney No	Ortalama Bilya Boyutu mm	Başlangıç Gürültü Seviyesi dB
1	13	87
2	13	90
3	13	95
4	13	87
5	13	89
6	13	96
7	25	90
8	25	95
9	25	98
10	25	96
11	25	97
12	25	101
13	19	90
14	19	98
15	19	90
16	19	98

Bilya boyutunun etkilerinin daha net bir şekilde anlaşılabilmesi için bilya boyutları dışında diğer tüm parametrelerin aynı olduğu 4 no.lu, 10 no.lu ve 15 no.lu deneylere ait sonuçlar Şekil 3.2’de gibi bilya boyutunun artması ile gürültünün arttığı görülmektedir. Bilya boyutunun meydana gelen gürültü üzerindeki etkisini anlamak, verimlilik ve gürültü yönetimi arasında bir denge sağladığı için öğütme proseslerini optimize etmek açısından çok önemlidir. Desibel değerine bağlı olarak, diğer ölçümler de eklenerek taze bilya beslenmesine karar verilebilir.



Şekil 3.2 : Bilya boyutu ve gürültü ilişkisi.

Gürültünün bir kontrol parametresi olarak ölçülmesi ile daha tutarlı ve verimli öğütme işlemleri gerçekleştirilebilmektedir. Bu yaklaşım, istenen partikül boyutu dağılımının korunmasını sağlamaya yardımcı olmasının yanı sıra, endüstriyel ortamlarda iş sağlığı ve güvenliği açısından da büyük bir sorun olabilecek aşırı gürültüyü azaltarak çalışma ortamının doğru bir şekilde yönetilmesine yardımcı olmaktadır. Diğer parametrelerin yanı sıra desibel seviyelerinin izlenmesi, öğütme sürecinin eksiksiz bir görünümünü sağlayarak daha iyi karar verme ve iyileştirilmiş sonuçlar elde edilmesine olanak tanır.

3.2 Frekans ve Genlik

Çift kütleli sistemin proses süresince stabil genlik frekans özelliğini net bir şekilde gösterecek olan ölçüm de genlik frekans değişim ölçümüdür. Bu parametre sistemin değişen koşullar altında ne kadar tutarlı çalıştığını göstermektedir. Öğütme işlemi devam ettikçe ve hacimsel olarak partikül boyutu küçüldükçe, öğütme bilyalarının etki

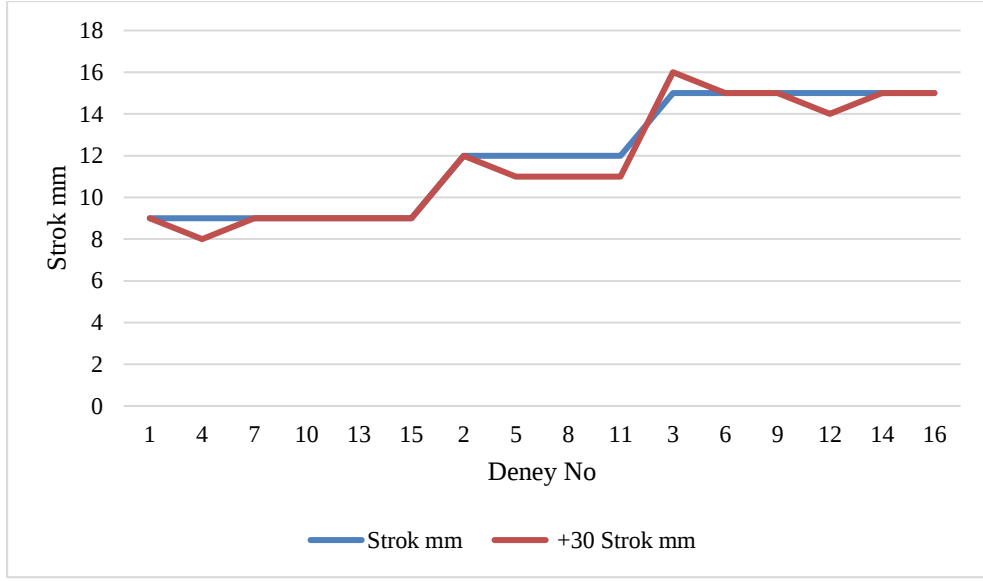
ve etkileşimlerinin yoğunluğunun artması beklenmektedir. Bu artan aktivite ise potansiyel olarak zaman içinde genlikte ve frekansta bir değişikliğe yol açmalıdır.

Yukarıdaki koşullara rağmen, Çizelge 3.4.'te sunulan ve Şekil 3.3.'de gösterilen veriler, öğütme işlemi boyunca genliğin makul ölçüde sabit kaldığını göstermektedir. Çizelgedeki +30 ifadeleri başlangıçtan 30 dakika sonrasında ölçülen değerler olduğunu belirtmektedir.

Çizelge 3.4 : 30 dakika sonrasındaki genlik değişiklik çizelgesi.

Deney No	Başlangıç Frekans rpm	Başlangıç Genlik mm	+30 Frekans rpm	+30 Genlik mm
1	1004	9	1006	9
2	1066	12	1073	12
3	1114	15	1120	16
4	1006	9	1006	8
5	1074	12	1074	11
6	1113	15	1115	15
7	1009	9	1006	9
8	1073	12	1070	11
9	1127	15	1122	15
10	1010	9	1007	9
11	1073	12	1067	11
12	1120	15	1112	14
13	1004	9	1005	9
14	1115	15	1123	15
15	1004	9	998	9
16	1111	15	1115	15

Çift Kütleli Sistem, tutarlı çalışma parametrelerini korumak için doğal frekanslı bir şekilde tasarlanmıştır ve malzeme özellikleri ve besleme hızı değişse bile sabit bir genliği koruma becerisi göstermektedir. Bu istikrar, öğütme işlemini verimli ve öngörülebilir kılar ve nihai ürün kalitesini etkileyebilecek dalgalanmaları en aza indirmektedir.



Şekil 3.3 : 30 dakika sonrasındaki genlik değişim grafiği.

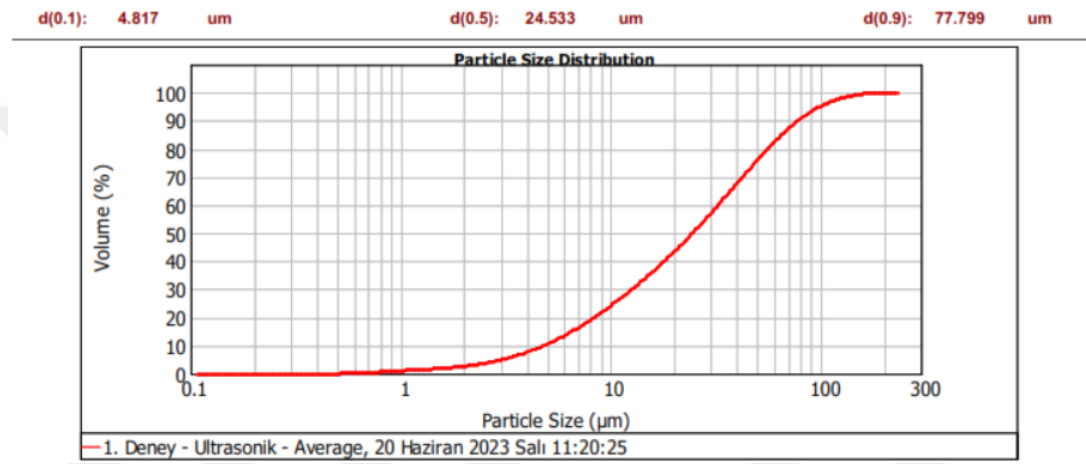
Çift kütleli sistemin mühendisliği, öğütme işleminin değişen dinamikleri nedeniyle genlikte beklenen değişiklikleri etkili bir şekilde ortadan kaldırır. Tane boyutu küçüldükçe, sistemin tasarımı bu değişikliklere uyum sağlar ve artan darbe sıklığı genellikle daha düzensiz bir genliğe neden olsa da tutarlı ve kontrollü bir öğütme işlemi sağlar. Bu tutarlılık yalnızca öğütme işleminin verimliliğini artırmakla kalmaz, aynı zamanda bileşenler üzerindeki stresi ve aşınmayı azaltarak ekipmanın çalışma ömrünü de en üst düzeye çıkarır.

Bazı öğütme testlerinde manyetik titreşim ölçer, öğütme haznesi ile uyarıcı arasındaki genlik farklarını belirlemek için kullanılmıştır. Öğütme haznesinin genliği 9 mm olarak ölçülürken, tahrik kütlesi genliği 4 mm olarak ölçülmüştür. Tahrik kütlesinin 4 mm genlikte titreşmesi, ana gövdenin 9 mm genlikte titreşmesine neden olmaktadır. Bu da çift kütleli sistemi daha iyi anlayacak ve kanıtlayacak bir veri olarak kabul edilebilir. Bu veri 9 mm genlikte titreşim için harcanan enerji yerine 4 mm titreşim sağlayacak enerji ile aynı genliği gerçekleştirebileceğini göstermektedir. Bu da Vibra-Drum'un enerji tüketiminin diğer vibrasyonlu değirmenlere göre daha az olduğunu göstermektedir.

Veriler, artan darbe kuvvetlerine ve malzeme değişikliklerine rağmen sistemin genliğinin neredeyse sabit kaldığını açıkça göstermekte ve Çift Kütleli Sistemin endüstriyel öğütme uygulamalarındaki etkinliğini vurgulamaktadır.

3.3 Nihai Ürünlerin Partikül Boyut Dağılımı

Yapılan diğer ve belki de en kritik ölçüm ise Malvern Mastersizer kullanılarak ürün partikül boyutu dağılımının analiz edilmesidir. Bu cihaz özellikle D90 değerine odaklanarak öğütülmüş talkın tane boyutu dağılımı hakkında ayrıntılı bilgi sağlar. Şekil 3.4'te Deney No 1'e ait Malvern Mastersizer ölçümleri sonucu tane boyut dağılım grafiği incelenebilir. Talkın bentonit gibi suda topaklaşma özelliği olmamasına rağmen daha gerçek tane boyut dağılımı çıkması için ultrasonik dağıtma da ölçüm öncesinde kullanılmıştır.



Şekil 3.4 : Deney No.1 tane boyut dağılımı.

Çizelge 3.5.'te detaylandırıldığı üzere, ürünlerin D90 değerleri ölçülmüş ve analiz edilmiştir. Bu çalışmada elde edilen tane boyutlarının, talkın belirli endüstriyel uygulamaları için gerekli olan istenen ultra ince boyutlara kıyasla nispeten kaba olduğunu ve birincil amacın talkı istenen nihai boyuta indirgemek değil, belirli çalışma koşulları altında öğütme sürecini değerlendirmek olduğunu belirtmek önemlidir.

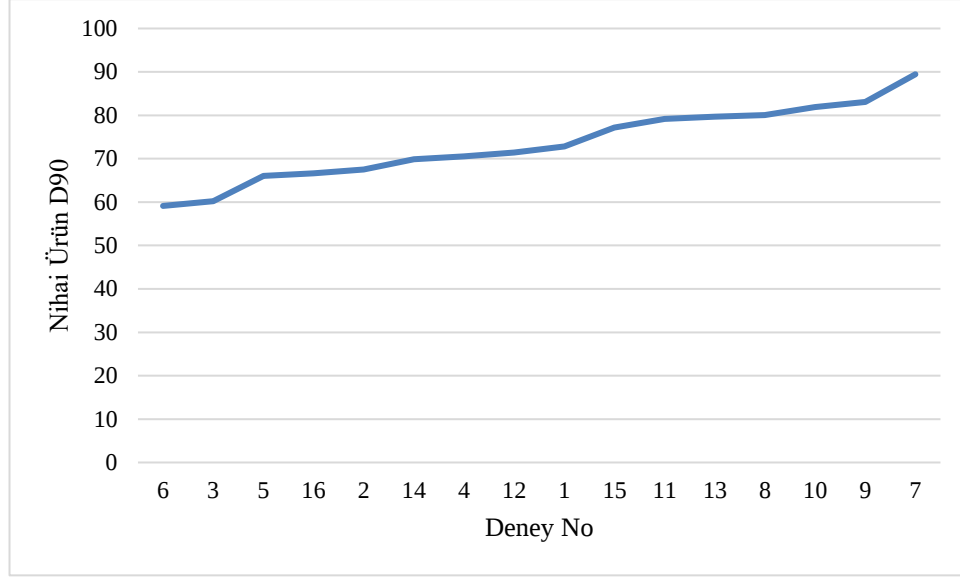
Çizelge 3.5 : Deneylerin D90 sonuçları.

Deney No	Genlik mm	Besleme Miktarı kg	Ort. Bilya Boyutu mm	D90 mikron
1	9	30	13	77,799
2	12	30	13	67,5
3	15	30	13	60,221
4	9	20	13	82,53
5	12	20	13	68,059
6	15	20	13	66,569
7	9	30	25	89,444
8	12	30	25	82,024
9	15	30	25	83,039
10	9	20	25	81,897
11	12	20	25	79,135
12	15	20	25	71,427
13	9	30	19	79,658
14	15	30	19	79,881
15	9	20	19	72,174
16	15	20	19	66,652

Nihai ürünün iri taneli yapısına rağmen, bu ölçümden elde edilen veriler öngörüşel modelleme için çok değerlidir. D90 değerlerini analiz ederek, daha ince tane boyutları elde etmek için öğütme parametrelerinde gerekli ayarlamaları simüle eden bir ön model geliştirmek mümkündür. Bu kaba modelleme, gelecekteki optimizasyon çalışmaları için bir kılavuz sağlar. Model, boyut küçültme verimliliğini artırmak için bilya boyutu, besleme miktarı ve frekansı gibi operasyonel parametrelerde belirli değişiklikler önerebilmektedir.

Ayrıca, D90 değerlerine dayalı tahmin modellemesi, öğütme parametreleri ile tane boyutu dağılımı arasındaki ilişkinin anlaşılmasına yardımcı olur. Modeli geliştirerek ve daha fazla deney yaparak, istenen ultra ince boyutta talkı tutarlı bir şekilde üretmek için gereken kesin ayarlamaları belirlemek mümkündür.

Şekil 3.5.'te görülebileceği gibi, 6 numaralı deney 59,121 mikron D90 değeri ile en iyi ürünü elde etmiştir. Bu deney, en küçük bilya boyutu ve en düşük besleme miktarı ile en yüksek genlik ayarı kullanılarak koşullandırılmıştır.



Şekil 3.5 : Deneylerin nihai üründeki incelik sıralaması.

Deney No. 6'dan elde edilen sonuç, öğütme dinamikleri ve parametre optimizasyonu hakkında değerli bilgiler sağlamaktadır. Daha küçük bilya ortamının kullanılması temas yüzey alanını ve bilyalar ile malzeme arasındaki darbe frekansını artırırken bilyalar arasındaki boşluk boyutunu da azaltmış olur. Bu etkileşimler, partiküllerin daha verimli bir şekilde öğütülmesini sağlayarak daha ince bir ürün elde edilmesini sağlamaktadır. Buna ek olarak, daha düşük besleme miktarı, öğütme işlemi sırasında her bir taneciğin daha fazla temas görmesini sağlayarak daha büyük partiküllerin öğütülmeden kalma olasılığını azaltır.

Ayrıca, Deney No. 6'daki daha yüksek genlik, bilyalar ve malzeme arasındaki darbelerin enerjisini ve yoğunluğunu artırarak daha etkili parçacık öğütme ile sonuçlanmıştır. Bu üç parametrenin (küçük bilya boyutu, düşük besleme miktarı ve yüksek genlik) kombinasyonunun ultra ince partikül boyutları elde etmek için optimum bir öğütme ortamı yarattığı gözlemlenmiştir.

3.4 Enerji Tüketimi

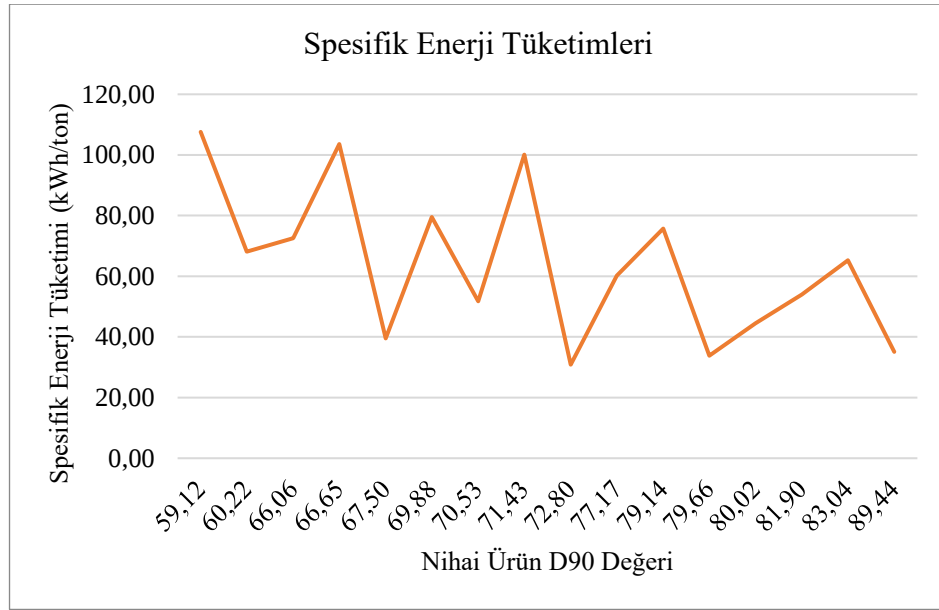
Öğütme deneyleri sırasında yapılan ölçümlerden sonuncusu ise enerji tüketimidir. Enerji tüketimi enerji sayacıyla ölçülmüştür. Deney öncesi sayaçtaki değer okunduktan sonra 1 saatlik öğütme sonrasındaki değer okunduktan sonra 2 değer arasındaki fark ise enerji tüketimi olarak kaydedildi. Çizelge 3.6.'da görülen başlangıç enerji değeri ve +60 enerji değeri (60 dakika sonrasında okunan enerji değeri) yukarıda bahsedilen değerler olup farkları enerji tüketimi olarak yazılmıştır. Ayrıca ton başına

saatte harcanan enerjiyi veren spesifik enerji tüketimini de her deneyin besleme miktarını 1000 kg olacak şekilde düzenleyerek bulunmuştur.

Çizelge 3.6 : Enerji tüketimleri.

Deney No	Besleme Miktarı	Başlangıç Enerji Değeri	+60 Enerji Değeri	Enerji Tüketimi	D90	Spesifik Enerji tüketimi
	kg	kW	kW	kW	mikron	kWh/ton
6	20,00	1912,68	1914,83	2,15	59,12	107,60
3	30,00	1907,33	1909,37	2,04	60,22	68,07
5	20,00	1911,03	1912,48	1,45	66,06	72,50
16	20,00	1930,42	1932,49	2,07	66,65	103,60
2	30,00	1905,87	1907,05	1,18	67,50	39,47
14	30,00	1926,43	1928,81	2,38	69,88	79,47
4	20,00	1909,67	1910,70	1,04	70,53	51,75
12	20,00	1923,03	1925,03	2,00	71,43	100,05
1	30,00	1904,74	1905,67	0,93	72,80	30,87
15	20,00	1929,01	1930,21	1,20	77,17	60,20
11	20,00	1921,40	1922,91	1,52	79,14	75,75
13	30,00	1925,21	1926,22	1,01	79,66	33,77
8	30,00	1916,34	1917,68	1,33	80,02	44,47
10	20,00	1920,07	1921,15	1,08	81,90	54,00
9	30,00	1917,91	1919,86	1,96	83,04	65,27
7	30,00	1915,11	1916,16	1,05	89,44	35,10

Şekil 3.6.'da gösterildiği gibi, inceliğe göre eğrinin doğrusal olması beklenirken dalgalanmalar olduğu gözlenmiştir. Enerji tüketiminin ürün inceliği ile doğru orantılı olmadığı gözlemlenmiş ancak genlik/frekans, bilye boyutu ve ilerleme hızı gibi belirli işlem parametrelerinden etkilendiği yorumu yapılmıştır.



Şekil 3.6 : D90 değerine göre spesifik enerji tüketimleri.

Bu yorum doğrultusunda parametreler ve enerji tüketimi için Minitab yardımıyla bir regresyon analizi yapıldıktan sonra çıkan Çizelge 3.7’de görüldüğü üzere R Kare değerinin %94.8 olarak hesaplanması parametrelerle enerji tüketimi arasında etkili bir bağ olduğu gözlemlenmiştir. Bu parametreler arasında, genlik/frekansın enerji tüketimi üzerinde en etkili etkiye sahip olduğu gözlemlenmiştir.

Çizelge 3.7 : Enerji regresyon analizi sonuçları.

	<i>Katsayılar</i>
Kesişim	48.15
Bilya Boyutu	0.0609
Besleme Miktarı	-2.8623
Genlik	7.1769
<i>Regresyon İstatistikleri</i>	
R Kare	%94,8
Ayarlı R Kare	%93.4
Gözlem	16

İlk olarak, genlik/frekans parametresinin öğütme işleminin enerji tüketimini etkilemede çok önemli bir rol oynadığı görülmektedir. Daha yüksek genlik veya frekans değerleri, bilya ortamının değirmende daha hızlı hareket etmesini sağlayarak bilya ortamı ile malzeme arasında daha fazla sayıda darbeye neden olur ve bu da gerekli enerji girdisini artırır. Daha yüksek frekans ayarları enerji tüketimini artırır. Ancak enerji tüketimindeki bu artışın her zaman daha ince bir ürünle ilişkili olmadığı gözlemlenmiş ve yüksek enerji tüketiminin her zaman optimum öğütme performansı ile sonuçlanmadığı yorumu yapılmıştır.

Bilya boyutu değişimlerinin çok düşük bir etkisi olsa da daha küçük bilyalar, değirmen içinde daha ince tane boyutları elde etmek için daha fazla etkileşime ve daha fazla enerji tüketimine neden olur. Malzeme daha verimli bir şekilde öğütülmesine rağmen, bu işlem daha fazla enerji gerektirir. Bunun aksine, daha büyük bilyalar daha az temas noktası ve daha düşük enerji tüketimi ile sonuçlanır.

Besleme miktarı ile spesifik enerji tüketimi arasında ters bir ilişki olduğu ve genlik parametresi kadar yüksek etkiye sahip olmadığı anlaşılmaktadır. Düşük besleme oranları daha verimli öğütme ve daha yüksek enerji tüketimi ile sonuçlanır. Öte yandan, daha yüksek besleme oranları birim malzeme başına enerji tüketimini azaltabilir, ancak öğütme verimliliğini azaltabilir ve istenen ürün inceliğine ulaşmayı zorlaştırabilir.

4. SONUÇ VE ÖNERİLER

4.1 Regresyon Analizi

Çizelge 4.1'de özetlenen verilere dayanarak kapsamlı bir regresyon analizi yapılmıştır. Bu Çizelge, temel parametrelerin ve bunlara karşılık gelen test sonuçlarının genel bir görünümünü göstermektedir. Regresyon analizi yapıldıktan sonra, çoklu R-değeri %96,71 olarak hesaplanmıştır. 1'e çok yakın olan bu R-değeri, gözlemlenen veriler ile modelin tahminleri arasında yüksek düzeyde bir korelasyon olduğunu göstermektedir. R-değerinin 1'e yakın olması, test sonuçlarının parametrelere göre makul olduğunu gösterir. Başka bir deyişle, regresyon modeli operasyonel parametreler ile sonuçlar arasındaki ilişkiyi doğru bir şekilde yakalamaktadır.

Çizelge 4.1 : Özet deney sonuçları.

Deney No	Değişkenler			
	Ort. Bilya Boyutu, mm	Besleme Miktarı, kg	Genlik, mm	D90, mikron
6	13	20	15	59.121
3	13	30	15	60.221
5	13	20	12	66.059
16	19	20	15	66.652
2	13	30	12	67.500
14	19	30	15	69.881
4	13	20	9	70.530
12	25	20	15	71.427
1	13	30	9	72.799
15	19	20	9	77.174
11	25	20	12	79.135
13	19	30	9	79.658
8	25	30	12	80.024
10	25	20	9	81.897
9	25	30	15	83.039
7	25	30	9	89.444

Regresyon analizi, Çizelge 4.2'de gösterildiği gibi faktör değerlerini hesaplayarak tüm değişkenlerin, yani parametrelerin etkileri hakkında bir sonuç sağlamaktadır. Bu analiz Minitab yardımıyla yapılmıştır. Çizelge 4.1 Minitab'a girildikten sonra DOE

metodunda “*Response Surface*” yöntemi ile oluşturulmuştur. Spesifik enerji tüketiminde yapılan analizin aksine burada parametrelerin birbiri ile çarpımı da formüle eklenmiştir. Bu Çizelge, her bir değişkenin sonuç üzerindeki göreceli etkisinin anlaşılmasına yardımcı olmaktadır. Özellikle, denklemdaki en büyük katsayıya sahip değişken 3, yani frekans/genlik, ürün boyutunu değiştirmede en önemli etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Bu sonuç, öğütme sürecini etkilemede ve istenen tane boyutlarına ulaşmada genlik/frekansın kritik rolünü vurgulamaktadır. Bu, genlik parametrelerinin optimize edilmesinin öğütme verimliliği ve ürün kalitesinde önemli gelişmeler sağlayabileceği anlamına gelmektedir.

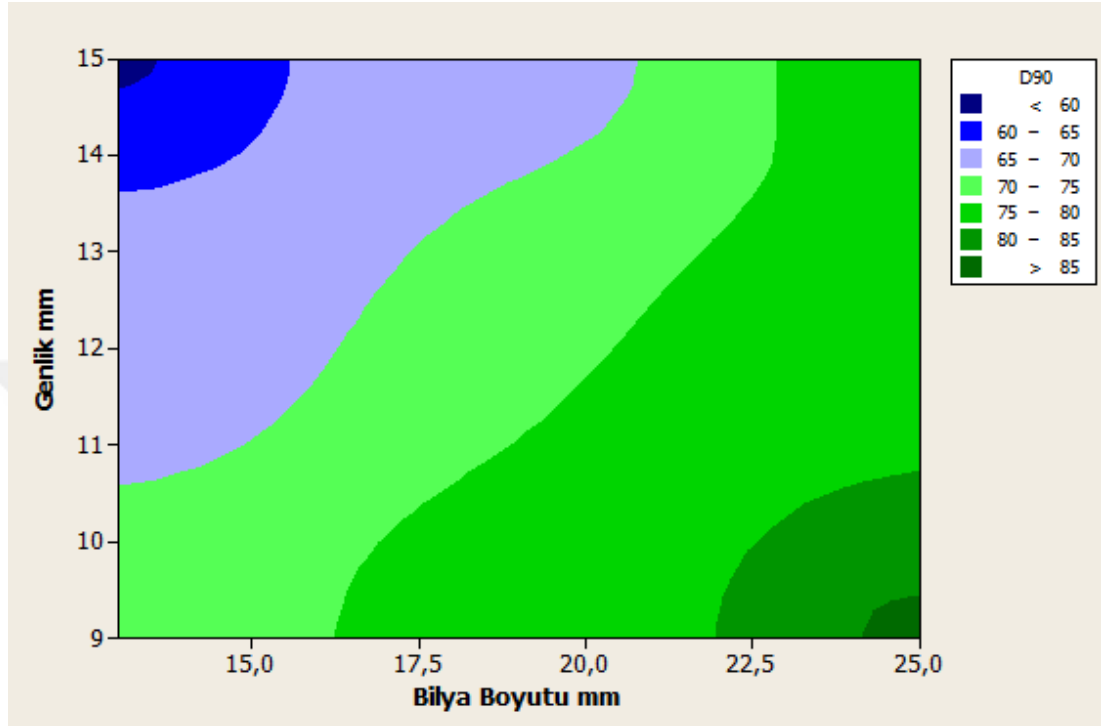
Çizelge 4.2 : Parametrelerin etki katsayıları.

	Sembol	Katsayılar
Kesişim		72,9610
Bilya Boyutu	X_1	7,3947
Besleme Miktarı	X_2	1,9107
Genlik	X_3	-5,0968
Bilya Boyutu*Bilya Boyutu		0,2185
Genlik*Genlik		0,3803
Bilya Boyutu*Besleme Miktarı		1,2698
Bilya Boyutu*Genlik		0,8890
Besleme Miktarı*Genlik		0,3034

Ortalama bilya boyutu öğütme sonrası oluşan malzemenin d90 değerini en fazla etkileyen parametre olarak görülmüştür. Bilya boyutunda sonra, etki sırası sırasıyla genlik ve besleme miktarı ile devam etmektedir. Bu parametreler, bilya boyutu kadar baskın olmasa da öğütme prosesi ve ürün boyutu sonuçları üzerinde kayda değer etkiler göstermektedir. Negatif bir katsayının, sonuçların ters orantılı olarak değiştiğini gösterdiğine dikkat etmek önemlidir. Başka bir deyişle, negatif katsayılı bir değişkendeki artış, gözlemlenen sonuçta azalma anlamına gelir. Negatif etkiye sahip olan genlik parametresi ele alındığında daha düşük genlikteki titreşimle sağlanan öğütme işlemi sonucunda daha kaba bir ürün elde edilmektedir.

Genel olarak regresyon analizi, çeşitli parametrelerin öğütme prosesi üzerindeki etkilerini değerlendirmek için sistematik bir yaklaşım sunar. Frekans/genlik gibi tesis üzerinde en önemli etkiye sahip faktörleri belirleyerek ve bunların diğer parametrelerle etkileşimini anlayarak, öğütme verimliliğini optimize etmek ve istenen ürün özelliklerini elde etmek için kararlar alınabilir ve eylemler gerçekleştirilebilir.

Analiz yapıldıktan sonra en fazla etki eden bilya boyutu ve genlik parametrelerini içeren d90 grafiği oluşturuldu. Şekil 4.1’de görüleceği gibi bilya boyutu ve genlik kesişimlerine göre mikron olarak d90 değeri hesaplanabilir. Buna göre öğütme parametreleri değiştirilip optimizasyon yapılabilir.



Şekil 4.1 : Bilya boyutu ve genliğe göre D90 değeri

Sonuç olarak, istenen ürün boyutunu temsil eden denklem, parametrelere karşılık gelen faktörler kullanılarak kabaca formüle edilebilmektedir. Bu denklemdeki $X_{1,2,3}$ sembolleri sırasıyla Bilya boyutu, besleme miktarı ve genliktir. Bu denklemin yalnızca talkın belirli koşullar altında öğütülmesine dayalı olarak türetildiği unutulmamalıdır. Bu hatırlatma, tüm öğütme prosesleri veya malzemeleri için evrensel olarak geçerli olmayabileceğini vurgulamaktadır.

Bununla birlikte, böyle bir denklemin formülasyonu, proses parametreleri ve ürün özellikleri arasındaki ilişki hakkında değerli bilgiler sağlar. Tesislerdeki öğütme süreçlerinin optimizasyonu için bir kılavuz görevi görür ve bunun gibi denklemlerin formülasyonu, endüstriyel tesislerin optimizasyonuna yönelik yapılandırılmış bir tasarımın oluşturulmasında önemli bir rol oynar.

$$D90 = 72,96 + (7,39 * X_1) + (1,91 * X_2) - (5,10 * X_3) + (0,22 * X_1^2) + (0,38 * X_3^2) + (1,27 * X_1 * X_2) + (0,89 * X_1 * X_3) + (0,30 * X_2 * X_3) \quad (4.1)$$

4.2 Aktarmalı Bilyalı Değirmen ile Vibra-Drum Karşılaştırılması

Bu tür bir mineralin ya da cevherin öğütme işlemi, genel olarak otojen ya da öğütücü ortam kullanan konvensiyonel diyebileceğimiz aktarmalı değirmenlerde, tamburun dönüşü ile kaldırılan öğütme ortamlarının düşmesi ve kayması sonucunda, cevherleri çeşitli darbe, ezme ve aşındırma kombinasyonları ile öğüterek belirtilen ürünü elde edilir (Yekeler, 2023).

Titreşimli değirmenler ve bilyalı değirmenler, malzemelerin ufalanması için kullanılan iki farklı öğütme cihazıdır. Her yöntemin kendine özgü avantajları ve dezavantajları vardır, bu da onları belirli kullanım senaryolarına göre tercih edilir hale getirir.

Talk öğütme işlemlerinde, tüm öğütme yöntemlerinin kuru bir işlem olarak tasarlanması gerekir. Bu nedenle, bir aktarmalı kuru bilyalı değirmen, geleneksel bir ıslak döner bilyalı değirmene kıyasla yaklaşık 1,3 kat daha fazla kurulu güç gerektirir (Yıldız, 2022). Titreşimli değirmenler malzemenin ufalanması için titreşimden yararlanırken, döner bilyalı değirmenler silindirik bir tambur içinde dönen bilyaların sürtünme ve çarpma etkileriyle öğütme işlemini gerçekleştirir. Bu ayrımın bir sonucu olarak, titreşimli değirmenler daha düşük enerji tüketimi avantajı sunmaktadır. Frank G ve diğerlerine (2022) göre, General Kinematics'in doğal frekanslı titreşimli değirmenleri, çift kütleli sistemleri sayesinde geleneksel titreşimli değirmenlere kıyasla daha az enerji tüketmektedir.

Titreşimli değirmenlere ek olarak tekrar öğütme (Regrinding) adımı için aktarmalı değirmenlerin yerine geçen değirmenlerden karıştırmalı değirmen için Swart ve diğerlerinin yapmış olduğu çalışmada saatte 100 ton kapasiteye sahip 4.8 m çapta 9.75 m uzunluğunda bilyalı değirmen 3,700 kW kurulu güce sahipken aynı kapasite ve ürün inceliğine sahip dikey karıştırmalı değirmenin 1,800 kW enerjiye ihtiyaç duyduğu gösterilmiş olup ultra ince öğütme adımı için aktarmalı değirmenler yerine kullanılması gerektiği vurgulanmıştır (2022).

Gerçekleştirilen ıslak veya kuru çeşitli öğütme testlerinde, Vibra-Drum'un öğütmeyi yalnızca aşındırma yoluyla gerçekleştirdiğini ve nispeten iri parçacıklara sahip ince öğütülmüş malzemeler elde edildiği görülmüştür. Bu öğütme kinetiği, üründe belirli bir boyut aralığının olmamasını sağlamaktadır. Bunun sayesinde havalı separatörlerle tasarlanan kapalı devrelerde daha kolay ayırmayı kolaylaştırabilir.

Öğütülebilirlik, sertlik, yoğunluk ve kırılınım gibi malzeme özelliklerinin ve kullanılan öğütme yöntemlerinin tane şeklinde ve inceliğinde farklılıklar yarattığı bilinmektedir (Yekeler, 2003). Çalışma kapsamında karşılaştırılması yapılan değirmen tiplerinde öğütme metodundaki farklılıklardan dolayı incelik ve tane şeklinde farklılıklar gözlemlenmektedir. Sadece aşınma metodunu kullanan Vibra-Drum ile öğütülen talk mineralinin inceliği daha fazla ve tane şekli de bilyalı döner değirmenlere göre yuvarlaklığı daha fazladır. Bunun incelik anlamında farklı sektörlerde ürün üretebilme gibi avantajı olsa da öğütme sonrasında tane şeklinin önemini vurgulamak amacıyla Yekeler ve diğerlerinin yapmış olduğu çalışma çubuklu, bilyalı ve otojen değirmende denemeler yaparak bilyalı değirmen çıkışı ürünün diğer metotlara göre daha yuvarlak olduğu ve yuvarlaklık artışının ıslanabilirlik özelliğini de arttırdığını gözlemlemiştir (2003). Talk gibi endüstriyel minerallerde kullanılan blaine değeri konusunda bilyalı değirmenden çıkan ürün daha kullanılabilir olduğu söylenebilir. Blaine değeri, malzemenin gram başına cm^2 olarak yüzey alanına verilen isimdir. Bilyalı değirmen ürünü darbe efekti ile birlikte biraz daha şekilsiz olacağından yüzey alanı daha yuvarlak olan Vibra-Drum ürününe göre spesifik sektörlerde daha avantajlıdır.

Titreşimli değirmenlerin diğer avantajları arasında düşük işletme maliyetleri ve daha az aşınma yer alır. Özellikle, öğütme haznesinin astarı ve öğütücü medya, yalnızca kaskat hareketine dayalı öğütme yöntemi nedeniyle daha az aşınmaya maruz kalır. Bunun aksine, döner bilyalı değirmenler, aşındırma ve çarpma yoluyla öğütme nedeniyle daha sık astar ve öğütme malzemesi değişimi gerektirir. Diğer bir husus ise Vibra-Drum'un öğütme işleminin bilyaları deforme etmeden yalnızca aşındırmasına neden olması ve sürekli olarak geometrik şekli bozuk olmayan tek tip bir öğütme ortamı sağlamasıdır.

Bakım maliyetleri açısından, döner bilyalı değirmenler yağ sistemi, dişliler ve rulmanlar gibi yedek parçaların stoklanmasını gerektirirken, Vibra-Drum'un daha az mekanik bileşeni hem stok maliyetlerini hem de üretim kayıplarını en aza indirir.

Ayrıca, titreşimli değirmenler ince tozların üretilmesini gerektiren uygulamalar için uygundur ve Vibra-Drum'da bir toz toplama sistemi ile entegre edilerek hem işyeri sağlığı hem de malzeme kaybı avantajları sağlar. Bununla birlikte, titreşimli değirmenler genellikle daha düşük kapasiteye sahiptir, tipik olarak 15 ton/saat'e kadar

ulaşırken, aktarmalı bilyalı değirmenler avantajları arasında yüksek kapasite önem kazanır. Yüksek kapasiteler için döner bilyalı değirmenler daha uygundur.



KAYNAKLAR

- Arsoy, Z., Ersoy, B., Evcin, A., & Icduygu, M. G.** (2017). Influence of dry grinding on physicochemical and surface properties of talc. *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, 53(1), 288-306.
- Bernhardt, C., Reinsch, E., & Husemann, K.** (1999). The influence of suspension properties on ultra-fine grinding in stirred ball mills. *Powder Technology*, 105(1-3), 357-361.
- Celep, O., Aslan, N., Alp, İ., & Taşdemir, G.** (2011). Optimization of some parameters of stirred mill for ultra-fine grinding of refractory Au/Ag ores. *Powder Technology*, 208(1), 121-127.
- Danha, G.** (2013). *Identifying opportunities for increasing the milling efficiency of a Bushveld Igneous complex (BIC) upper Group (UG) 2 ore* (Doctoral dissertation) University of the Witwatersrand, Faculty of Engineering and the Built Environment, p 20.
- Drögemeier, R., & Leschonski, K.** (1996). Ultra fine grinding in a two stage rotor impact mill. *International Journal of Mineral Processing*, 44, 485-495.
- Eswaraiah, C., Venkat, N., Mishra, B. K., & Holmes, R.** (2015). A comparative study on a vertical stirred mill agitator design for fine grinding. *Separation Science and Technology*, 50(17), 2639-2648.
- Frank G., Massman S., Kerker D., Fernandez A., Wubben M.** (2022). Two-Mass vs Brute Force Technology in The Mining Industry, 17th International Mineral Processing Symposium, Pp 1-6
- General Kinematics, Vibra-Drum® Grinding Mill & Solutions Brochure** (2022), pp 1-2
- Kano, J., Miyazaki, M., Saito, F.** (2000). Ball mill simulation and powder characteristics of ground talc in various types of mill, *Advanced Powder Technology*, 11(3), pp 333-342.
- Kim, H. N., Kim, J. W., Kim, M. S., Lee, B. H., & Kim, J. C.** (2019). Effects of ball size on the grinding behavior of talc using a high-energy ball mill. *Minerals*, 9(11), 668. p. 14
- Leonida, C.** (2021) Screens offer new era in Process Efficiency, *Engineering and Mining Journal*, 222(5), pp 32-37.
- Sinniah, D.** (2011). Industry and cosmetic uses of talc with their implication on health. *IeJSME*, 5(1), 10-16.
- Swart, C., Gaylard, J. M., & Bwalya, M. M.** (2022). A technical and economic comparison of ball mill limestone comminution with a vertical roller mill. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 43(3), 275-282.
- Tanaka, T.** (1995). Optimum design for fine and ultrafine grinding mechanisms using grinding media. *Kona Powder and Particle Journal*, 13, 19-29.

- Yekeler, M., Ulusoy, U. & Hiçyılmaz, C.** (2004). Effect of particle shape and roughness of talc mineral ground by different mills on the wettability and floatability. *Powder Technology*, 140(1-2), 68-78.
- Yıldız, N.** (2022). Cevher hazırlama ve zenginleştirme. *ERTEM Basım Yayın Dağıtım Sanayi ve Ticaret Limited Şti.*
- Zazenski, R., Ashton, W. H., Briggs, D., Chudkowski, M., Kelse, J. W., MacEachern, L., Gettings, S. D.** (1995) Talc: occurrence, characterization, and consumer applications, *Regulatory Toxicology and Pharmacology*, 21(2), p 218.



ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Ogün BAŞARAN

Öğrenim Durumu :

- **Lisans** : 2021, İstanbul Teknik Üniversitesi, Maden Fakültesi, Cevher Hazırlama Mühendisliği Bölümü

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- 2022-2024 Turbo Makine Ltd. Şti.'de Satış ve Proses Mühendisi olarak çalıştı.

TEZDEN TÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- **Başaran O.**, 2023. Effects and Sequencing of Grinding Parameters for Ultrafine Talc Grinding in a Vibrating Ball Mill: A Tests-Based Approach. *9th Congress of Mining Machinery and Technology*, September 13-15, 2023 İzmir, Turkey.
- **Başaran O.**, 2023. Effects of Parameters on Screening Aggregate Material by High-Frequency Screen for Sand Washing: A Case Study and Comparison with Sand Washing Equipment. *9th Congress of Mining Machinery and Technology*, September 13-15, 2023 İzmir, Turkey.