

**KURU BİLYALI DEĞİRMENLERDE DEĞİRMEN  
BOYUNCA MEYDANA GELEN BOYUT KÜÇÜLTMENİN  
FARKLI TEK PARAMETRELİ İNCELİK İNDEKSLERİ  
İLE İNCELENMESİ**

**INVESTIGATION OF SIZE REDUCTION THROUGH THE  
MILL WITH DIFFERENT ONE PARAMETER FINENESS  
INDICES IN DRY BALL MILLS**

**FETULLAH TORTUMLU**

**DOÇ. DR. NAMIK ATAKAN AYDOĞAN**

**Tez Danışmanı**

Hacettepe Üniversitesi  
Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin  
Maden Mühendisliği Anabilim Dalı için Öngördüğü  
YÜKSEK LİSANS TEZİ  
olarak hazırlanmıştır.

2023

## ÖZET

### **KURU BİLYALI DEĞİRMENLERDE DEĞİRMEN BOYUNCA MEYDANA GELEN BOYUT KÜÇÜLTMENİN FARKLI TEK PARAMETRELİ İNCELİK İNDEKSLERİ İLE İNCELENMESİ**

**Fetullah TORTUMLU**

**Yüksek Lisans, Maden Mühendisliği Bölümü**

**Tez Danışmanı: Doç. Dr. Namık Atakan AYDOĞAN**

**Ocak 2023, 77 sayfa**

Bu tez çalışması kapsamında; 4 ayrı çimento üretim tesisinde boyut küçültme amacıyla kullanılan kuru bilyalı değirmenlerin 2. kamaralarından belli aralıklarla alınan numuneler ile değirmen boyunca meydana gelen boyut küçültme işleminin farklı tek parametrelî incelik indeksleri kullanılarak endüstriyel ölçekte incelenmesi yapılmıştır.

Literatürde yapılan taramalarda öğütülmüş malzemenin inceliğinin tek parametrelî indeksler kullanılarak belirlendiği gözlemlenmiştir. Bu çalışma kapsamında belirlenen incelik indeksleri temel alınarak, tek parametrelî indekslerin yerine istatistiksel entropi değerleri ve birikimli elek altı eğrisi altında kalan alan değerlerinin kullanılabilirliği araştırılmıştır. Ayrıca elde edilen tek parametrelî incelik indeksleri ile Kick ve Bond yasalarına göre enerji ilişkileri ortaya konularak farklı indekslerde bu ilişkilerin durumları değerlendirilmiştir.

Bu çalışma sonunda birikimli elek altı eğrisi altında kalan toplam alan ile birikimli elek altı değerlerinin toplam entropi değerleri, incelik indeksi olarak kullanılabilirliği gösterilmiştir.

Boyut küçültme ile enerji ilişkilerinde sıklıkla kullanılan Kick ve Bond yasaları ile yapılan analizlerde Kick ve Bond değerlerinin tüm incelik indekslerinde doğrusal olduğu gözlenmiştir. Dolayısıyla enerji değerlerinin belirlenmesinde malzemenin %80'inin geçtiği  $d_{80}$  indeksinin kullanımının dışında diğer indekslerinde kullanılabileceği değerlendirilmektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Öğütme, kuru bilyalı değirmen, istatistiksel entropi, birikimli elek altı eğrisi, incelik indeksleri

## **ABSTRACT**

# **INVESTIGATION OF SIZE REDUCTION THROUGH THE MILL WITH DIFFERENT ONE PARAMETER FINENESS INDICES IN DRY BALL MILLS**

**Fetullah TORTUMLU**

**Master of Science, Department of Mining Engineering  
Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Namık Atakan AYDOĞAN**

**January 2023, 77 pages**

In this study; samples, collected at regular intervals from the second chamber of dry ball mills, were used to investigate the size reduction process occurring throughout the mill on an industrial scale by using different single parameter fineness indices within the four different cement production circuits.

In the literature review, it has been observed that the fineness of the grinded material is determined by using single parameter indices. Based on the fineness indices determined within the scope of this study, the utility of statistical entropy values and the total area under the cumulative sieve curve instead of single parameter indices was investigated. In addition, based on the determined single parameter fineness indices the energy relations with Kick and Bond laws were revealed and the usability states of these relations were evaluated in different indices.

At the end of this study, it has been shown that the total area under the cumulative sieve curve and the total entropy values can be used as fineness indices.

Analyses made with Kick and Bond laws, which are frequently used in energy relations on size reduction, it was observed that Kick and Bond values were linear in all fineness indices. Therefore, to determine the energy, it is considered that any of the indices may be used apart from  $d_{80}$  indice.

**Keywords:** Grinding, dry ball mill, statistical entropy, cumulative sieve curve, fineness indices

## TEŞEKKÜR

Bu çalışma esnasında bundan sonraki hayatımda birçok alanda kullanabileceğim analiz yöntemlerini sabırla bana öğreten değerli Danışman Hocam Doç. Dr. Namık Atakan AYDOĞAN 'a teşekkür ederim.

Yüksek lisans eğitimi süresi içinde her anlamda desteklerini esirgemeyen Hacettepe Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümü öğretim üyeleri ve çalışanlarına da ayrıca teşekkür ederim.

Gerek eğitim hayatım boyunca gerekse sonrasında bana her türlü desteği esirgemeyen annem, babam ve kardeşlerime de teşekkürü bir vazife bilirim.

Geç saatlere kadar sabırla uykusundan feragat ederek beni bekleyen kıymetli eşim Kübra TORTUMLU 'ya sabır ve anlayışı için çok teşekkür ediyorum.

Bu çalışma esnasında hem pozitif tutumlarımdan yararlandığım hem de ara ara fikirlerinden istifade ettiğim TPIC Genel Müdürlüğü bünyesinde Maden Sondaj Müdürlüğü çalışma arkadaşlarıma da teşekkür etmek istiyorum.

Hem yüksek lisans başvurusu esnasında hem de bu süreçte zorlandığım zamanlarda sabır tavsiyelerini ısrarla tekrarlayan kıymetli arkadaşım Öğr. Gör. Mahmut SARI' ya da çok teşekkür ederim.

Ayrıca, hayatım boyunca bana yaşantısıyla örnek olmuş, ilim için ilim değil, fayda için ilim tavsiyesini benimsediğim Prof. Dr. Necmettin ERBAKAN 'ı rahmetle anıyorum.

# İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT .....	iii
TEŞEKKÜR .....	v
İÇİNDEKİLER.....	vi
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	ix
FOTOĞRAFLAR DİZİNİ.....	xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xiv
1. GİRİŞ .....	1
1.1 Tane Boyu Dağılımı .....	2
1.1.2 Örnek Alma .....	4
1.2. Tane Boyu Tespit Yöntemleri .....	4
1.3 Tane Boyu Verilerinin Değerlendirilmesi.....	6
2. ENERJİ VE BOYUT KÜÇÜLTME İLİŞKİLERİ.....	7
2.1 Rittinger Yasası .....	7
2.2 Kick Yasası.....	7
2.3 Bond Yasası.....	8
2.4 Charles Yasası .....	8
2.5 Boyut Küçültme ve İncelik Arasındaki İlişki.....	9
3. İSTATİSTİKSEL ENTROPİ VE BİRİKİMLİ ELEK ALTI EĞRİSİ ALTINDA KALAN ALAN.....	10
3.1 Termodinamikteki Entropi Kavramı .....	10
3.2 Bilgi Teorisi.....	11
3.3 İstatistikte Entropi .....	12
3.3.1 Boyut Küçültme ve Entropi İlişkisi .....	12
3.4 Birikimli Elek Altı Eğrisi ve Eğri Altında Kalan Alan Değerleri .....	14

4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	16
4.1 Tesis-1 Örnek Alma ve Deneysel Çalışmaları.....	17
4.2 Tesis-2 Örnek Alma ve Deneysel Çalışmaları.....	23
4.3 Tesis-3 (Değirmen-4) Örnek Alma ve Deneysel Çalışmaları.....	29
4.4 Tesis-4 (Değirmen-5) Örnek Alma ve Deneysel Çalışmaları.....	35
5. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME .....	42
5.1 Tesis-1 Sonuçları ve Değerlendirmesi .....	44
5.2 Tesis-2 Sonuçları ve Değerlendirmesi .....	52
5.3 Tesis-3 (Değirmen-4) Sonuçları ve Değerlendirmesi .....	59
5.4 Tesis-4 (Değirmen-5) Sonuçları ve Değerlendirmesi .....	67
5.5 Genel Değerlendirme .....	74
6. KAYNAKLAR.....	75
ÖZGEÇMİŞ.....	78



## ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 1. Çeşitli işlemlerde tane boyuna göre örnek alma ağırlığı (Aidan Giblett, 2015)	4
Çizelge 2. Tane boyu tespit yöntemleri (Bela Beke, 2012)	5
Çizelge 3. Bilyalı değirmen tasarım parametreleri (Tesis-1)	17
Çizelge 4. Değirmenin çalışma parametreleri (Tesis-1)	18
Çizelge 5. Birikimli elek altı yüzdeleri (Tesis-1)	22
Çizelge 6. Bilyalı değirmen tasarım parametreleri (Tesis-2)	24
Çizelge 7. Değirmenin çalışma parametreleri (Tesis-2)	24
Çizelge 8. Birikimli elek altı yüzdeleri (Tesis-2)	28
Çizelge 9. Bilyalı değirmen tasarım parametreleri (Tesis-3)	30
Çizelge 10. Değirmenin çalışma parametreleri (Tesis-3)	30
Çizelge 11. Birikimli elek altı yüzdeleri (Tesis-3)	34
Çizelge 12. Bilyalı değirmen tasarım parametreleri (Tesis-4)	36
Çizelge 13. Değirmenin çalışma parametreleri (Tesis-4)	36
Çizelge 14. Birikimli elek altı yüzdeleri (Tesis-4)	40

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. Farklı yoğunluktaki öğütülmüş malzemenin elek analizi (Lőrincz, Relationship Between Grading Entropy and Dry Bulk Density Of Granular Soils, 1990) .....	4
Şekil 2. Boyut küçültme ile incelikte meydana gelen değişim (Lőrincz, ve diğerleri, 2005) .....	9
Şekil 3. Kırma işlemlerine bağlı olarak toplam entropi değerlerindeki değişim (Lőrincz, ve diğerleri, 2005).....	13
Şekil 4. Birikimli elek altı değerleri ile incelik indeksi değerleri ve enerji tüketimleri (V. Zhukov, 1998) .....	14
Şekil 5. Farklı kalitelerdeki agregalarda birikimli tane boyu dağılımı (E. Ghiasvand, 2014).....	15
Şekil 6. Kapalı devre öğütme sistemi akış şeması (Tesis-1).....	19
Şekil 7. Değirmen birinci kamarası örnek alma noktaları (Tesis-1).....	19
Şekil 8. Değirmen ikinci kamara örnek alma noktaları (Tesis-1).....	20
Şekil 9. Devre etrafı birikimli tane boyu dağılımı (Tesis-1).....	20
Şekil 10. Değirmen içi ölçümleri (Tesis-1) .....	21
Şekil 11. Devre etrafı madde denklığı (Tesis-1).....	21
Şekil 12. 2. Kamara içi birikimli elek altı eğrisi (Tesis-1) .....	23
Şekil 13. Kapalı devre öğütme sistemi akış şeması (Tesis-2).....	25
Şekil 14. Değirmen birinci kamarası örnek alma noktaları (Tesis-2).....	25
Şekil 15. Değirmen İkinci kamarası örnek alma noktaları (Tesis-2).....	26
Şekil 16. Devre etrafı birikimli tane boyu dağılımı (Tesis-2).....	26
Şekil 17. Değirmen içi ölçümleri (Tesis-2).....	27
Şekil 18. Devre etrafı madde denklığı (Tesis-2).....	27
Şekil 19. 2. Kamara içi birikimli elek altı eğrisi (Tesis-2) .....	29
Şekil 20. Kapalı devre öğütme sistemi akış şeması (Tesis-3).....	31
Şekil 21. Değirmen birinci kamarası örnek alma noktaları (Tesis-3).....	31
Şekil 22. Değirmen ikinci kamarası örnek alma noktaları (Tesis-3) .....	32
Şekil 23. Devre etrafı birikimli tane boyu dağılımı (Tesis-3).....	32
Şekil 24. Değirmen içi ölçümleri (Tesis-3).....	33
Şekil 25. Devre etrafı madde denklığı (Tesis-3).....	33
Şekil 26. 2. Kamara içi birikimli elek altı eğrisi (Tesis-3) .....	35

Şekil 27. Kapalı devre öğütme sistemi akış şeması (Tesis-4) .....	37
Şekil 28. Değirmen birinci kamarası örnek alma noktaları (Tesis-4) .....	37
Şekil 29. Değirmen ikinci kamarası örnek alma noktaları (Tesis-4).....	38
Şekil 30. Devre etrafı birikimli tane boyu dağılımı (Tesis-4).....	38
Şekil 31. Değirmen içi ölçüleri (Tesis-4) .....	39
Şekil 32. Devre etrafı madde denkliği (Tesis-4) .....	39
Şekil 33.2. Kamara içi birikimli elek altı eğrisi (Tesis-4).....	41
Şekil 34. Eğri altında kana alan hesabı .....	42
Şekil 35. Entropi değeri hesabında izlenen yöntem .....	43
Şekil 36. Enerji hesaplamalarında izlenen yöntem .....	44
Şekil 37. Örnek mesafesi ve tespit edilen incelik indeksleri arasındaki ilişki (Tesis-1) .	45
Şekil 38. D <sub>50</sub> ile diğer tek parametrelili incelik indeksleri arasındaki ilişki (Tesis-1) .....	45
Şekil 39. 10, 30, 45, 50, 60, 80 ve 90 µm boyutunun altına geçen malzeme yüzdesi ile örnek mesafesi arasındaki ilişki (Tesis-1).....	46
Şekil 40. $\sum$ Alan-Örnek mesafesi (Tesis-1) .....	46
Şekil 41. $\sum$ Entropi-Örnek mesafesi (Tesis-1) .....	47
Şekil 42. $\sum$ Entropi ve $\sum$ Alan (Tesis-1) .....	47
Şekil 43. $\sum$ Alan $\sum$ Entropi ve d <sub>50</sub> arasındaki ilişki (Tesis-1).....	48
Şekil 44. Kick yasasına göre farklı incelik indeksleri kullanılarak hesaplanan öğütme enerjisinin 2. kamara boyunca değişimi (Tesis-1) .....	49
Şekil 45. Bond yasasına göre farklı incelik indeksleri kullanılarak hesaplanan öğütme enerjisinin 2. kamara boyunca değişimi (Tesis-1) .....	49
Şekil 46. Kick ve Bond enerji değerlerinin karşılaştırılması (Tesis-1) .....	50
Şekil 47. Kick-Bond ilişkisi (Devre etrafı akışlar dahil) (Tesis-1) .....	50
Şekil 48. Rittinger-Kick enerji değerlerinin karşılaştırılması (Tesis-1).....	51
Şekil 49. Örnek mesafesi ve tespit edilen incelik indeksleri arasındaki ilişki (Tesis-2) .	52
Şekil 50. D <sub>50</sub> ile diğer tek parametrelili incelik indeksleri arasındaki ilişki (Tesis-2) .....	53
Şekil 51. 10, 30, 45, 50, 60, 80 ve 90 µm boyutunun altına geçen malzeme yüzdesi ile örnek mesafesi arasındaki ilişki (Tesis-2).....	54
Şekil 52. $\sum$ Alan-Örnek mesafesi (Tesis-2) .....	54
Şekil 53. $\sum$ Entropi-Örnek mesafesi (Tesis-2) .....	55
Şekil 54. $\sum$ Entropi ve $\sum$ Alan (Tesis-2) .....	55
Şekil 55. $\sum$ Alan $\sum$ Entropi ve d <sub>50</sub> arasındaki ilişki (Tesis-2).....	56

Şekil 56. Kick yasasına göre farklı incelik indeksleri kullanılarak hesaplanan öğütme enerjisinin 2. kamara boyunca değişimi(Tesis-2).....	56
Şekil 57. Bond yasasına göre farklı incelik indeksleri kullanılarak hesaplanan öğütme enerjisinin 2. kamara boyunca değişimi (Tesis-2).....	57
Şekil 58. Kick ve Bond enerji değerlerinin karşılaştırılması (Tesis-2).....	57
Şekil 59. Kick-Bond ilişkisi (Devre etrafı akışlar dahil) (Tesis-2).....	58
Şekil 60. Kick ve Rittinger enerji değerlerinin karşılaştırılması (Tesis-2).....	58
Şekil 61. Örnek mesafesi ve tespit edilen incelik indeksleri arasındaki ilişki (Tesis-3)	60
Şekil 62. D50 ile diğer tek parametrelili incelik indeksleri arasındaki ilişki (Tesis-3) ....	60
Şekil 63. 10, 30, 45, 50, 60, 80 ve 90 µm boyutunun altına geçen malzeme yüzdesi ile örnek mesafesi arasındaki ilişki (Tesis-3) .....	61
Şekil 64. $\Sigma$ Alan- Örnek mesafesi (Tesis-3).....	61
Şekil 65. $\Sigma$ Entropi-Örnek mesafesi (Tesis-3).....	62
Şekil 66. $\Sigma$ Entropi ve $\Sigma$ Alan (Tesis-3).....	62
Şekil 67. $\Sigma$ Alan, $\Sigma$ Entropi ve d50 arasındaki ilişki (Tesis-3) .....	63
Şekil 68. Kick yasasına göre farklı incelik indeksleri kullanılarak hesaplanan öğütme enerjisinin 2. kamara boyunca değişimi (Tesis-3).....	63
Şekil 69. Bond yasasına göre farklı incelik indeksleri kullanılarak hesaplanan öğütme enerjisinin 2. kamara boyunca değişimi (Tesis-3).....	64
Şekil 70. Kick ve Bond enerji değerlerinin karşılaştırılması (Tesis-3).....	64
Şekil 71. Kick-Bond ilişkisi (Devre etrafı akışlar dahil) (Tesis-3).....	65
Şekil 72. Kick ve Rittinger enerji değerlerinin karşılaştırılması (Tesis-3).....	65
Şekil 73. Örnek mesafesi ve tespit edilen incelik indeksleri arasındaki ilişki (Tesis-4)	67
Şekil 74. D50 ile diğer tek parametrelili incelik indeksleri arasındaki ilişki (Tesis-4) ....	67
Şekil 75. 10, 30, 45, 50, 60, 80 ve 90 µm boyutunun altına geçen malzeme yüzdesi ile örnek mesafesi arasındaki ilişki (Tesis-4) .....	68
Şekil 76. $\Sigma$ Alan- Örnek mesafesi (Tesis-4).....	68
Şekil 77. $\Sigma$ Entropi-Örnek mesafesi (Tesis-4).....	69
Şekil 78. $\Sigma$ Entropi ve $\Sigma$ Alan (Tesis-4).....	69
Şekil 79. $\Sigma$ Alan $\Sigma$ Entropi ve d50 arasındaki ilişki (Tesis-4) .....	70
Şekil 80. Kick yasasına göre farklı incelik indeksleri kullanılarak hesaplanan öğütme enerjisinin 2. kamara boyunca değişimi (Tesis-4).....	70
Şekil 81. Bond yasasına göre farklı incelik indeksleri kullanılarak hesaplanan öğütme enerjisinin 2. kamara boyunca değişimi (Tesis-4).....	71

Şekil 82. Kick ve Bond enerji değerlerinin karşılaştırılması (Tesis-4) .....	71
Şekil 83. Kick Bond ilişkisi (Devre etrafı akışlar dahil) (Tesis-4).....	72
Şekil 84. Kick ve Rittinger enerji değerlerinin karşılaştırılması (Tesis-4) .....	72

## FOTOĞRAFLAR DİZİNİ

Fotoğraf 1. Değirmen yatay görünümü (Tesis-4) .....	16
Fotoğraf 2. Değirmen içi görünümü (Tesis-3).....	17

## SİMGELER VE KISALTMALAR

### Simgeler

$E$	Enerji girdisi (kWs/t)
$W_i$	İş İndeksi (kWs/t)
$K$	Katsayı
$x_2$	Ürün tane boyu ( $\mu\text{m}$ )
$x_1$	Besleme tane boyu ( $\mu\text{m}$ )
$W$	Mikroskopik durumların sayısı
$F$	Beslemenin %80'inin geçtiği elek açıklığı ( $\mu\text{m}$ )
$P$	Ürünün %80'inin geçtiği elek açıklığı ( $\mu\text{m}$ )
$x^1$	Boyut modülü
$S$	Entropi değeri
$n$	Schuhmann eğrisinin düz bölümünün eğimi
$A$	Malzemenin dayanımına bağlı bir faktör

### Kısaltmalar

KAM	Değirmen Kamarası
-----	-------------------

# 1. GİRİŞ

Beton üretiminde kullanılan çimentoların büyük kısmı üretimi esnasında yüksek boyutta enerji tüketimine ihtiyaç duyulan çimento klinkeridir. Yüksek enerji tüketimi ile bilinen çimento üretim süreci, ayrıca karbondioksit salınımına yol açması açısından çevreye zararlı bir işlem olarak bilinir.

Çimento üretim sürecinde hidratasyon hızını, su ihtiyacını, erken ve geç dayanımla birlikte priz süresini etkileyen en önemli parametre, tane boyu dağılımıdır. Yapılan çeşitli çalışmalarda en iyi sonuçların 3-30 µm tane boyu aralığındaki örneklerde alındığı, 60 µm üstündeki tanelerin çimento dayanımına katkı sağlamadığı bildirilmektedir. [1]

Yapılan kaynak taramalarında, Tsivilis ve ark. (1990) istenen ürün kalitesine ulaşabilmek için çimentonun dik tane boyu eğilimine sahip olması ve 3-32 µm arasındaki malzeme miktarının %65 ten fazla, 3 µm dan küçük tanelerin %10'dan az ve yüzey alanı değerini veren Blaine değerinin ise 2500-3000 cm<sup>2</sup>/g olması gerektiğini, bununla beraber, en etkili tane boyu aralığının ise 16-24 µm arasında olması gerektiğini iddia etmektedir. [2]

Bir çimento üretim devresi içinde meydana gelen boyut küçültme işlemleri sonrasında ortaya çıkan ince tanelerin tane boyutlarının tespiti basit bir işlem değildir. Parçacıklı malzemelerdeki boyut dağılımı, sistem davranışını belirlemede büyük önem taşır ve çoğu sistemi tanımlamada ilk parametredir. Boyut analizi için çeşitli yöntemler mevcut olup, bu analizler için farklı araçlar kullanılabilir. Belirli bir tane boyu analizi için uygun analiz yönteminin seçimine analiz sebebi ve malzeme yapısına bakılarak karar verilir. [3]

İncelik ise çimentonun su ile etkileşimine etki eden en önemli faktörlerden biridir. Çimento inceliği ve yüzey alanı arttıkça su ile gerçekleşecek tepkimelerin hızı artar ve tepkimelerde daha hızlı dayanım gerçekleşir. İncelik, ayrıca yüzey alanı ve tane boyu dağılımı ifadeleriyle de belirtilebilmektedir. İncelik değerlerinin artmasıyla çimentoda 2. ve 7. günlerde meydana gelen dayanım artmaktadır. [4]



## 1.1 Tane Boyu Dağılımı

Günlük hayatımızda kullanılan malzemelerin birçoğu (beton, seramik, çimento, çeşitli inşaat malzemeleri vs.) küçük tanelerin bir araya getirilmesi sonucunda elde edilir. Bu malzemelerde istenilen fiziksel ve kimyasal özellikler malzemenin tane boyuna bağlıdır.

İncelik belirlenmesinde en yaygın kullanılan yöntemlerden biri karakteristik uzunluk (Örneğin medyan boyu, malzemenin %50 sinin geçtiği boy,  $d_{50}$  veya malzemenin %80 sinin geçtiği boy,  $d_{80}$ ) diğeri ise malzeme miktarıdır (Örneğin  $38\mu\text{m}$  daha ince malzeme yüzdesi  $y_{38}$ ). İnceliğin ifadesinde genellikle elek bakiyesi ya da tane boyu dağılımı kullanılır. Elek bakiyesinin belirlenmesinde çeşitli elek boyları kullanıldığı gibi, endüstride ve literatürde genel olarak  $45\mu\text{m}$  açıklığındaki eleklerin kullanıldığı gözlemlenmiştir. Tane boyu dağılımını Coulter Counter, sedimentasyon gibi yöntemler ile belirleniyor olsa da tane boyu dağılımını belirlemede elek analizi, ince boyutlar için ise lazer kırınımı yöntemi sıklıkla tercih edilmektedir. [5]

Bu çalışma kapsamında hazırlanan veriler eleme ve lazer kırınımı yöntemi kullanılarak oluşturulan elek analizleri ile elde edilmiştir.

Carlos García-Gutiérrez ve ark. tarafından 70 farklı toprak numunesi üzerinde yapılan çalışmalar göstermektedir ki, tane boyu dağılımı ile malzemenin karakteristiği arasında ciddi bir ilişki vardır. Çalışma sonunda her bir toprak örnekleme için alınan üçlü numuneler tüm tane boyu dağılımını göstermeye yeterli olduğu görülmüştür. [6]

Çimentonun tane boyu dağılımı genelde Rosin-Rammler (RR) ve Gates-Gaudin-Schuhmann (GSS) eşitlikleri kullanılarak ifade edilmektedir. İncelikle birlikte öğütülmüş malzemedeki artış gösteren yüzey alanı ise Blaine yöntemi ile belirlenmektedir.

Rosin-Rammler eşitliği;

$$F(\varphi) = 1 - \exp - \varphi l^m \quad (1.1.1)$$

$F(\varphi)$ ; dağılım oranı,

$\varphi$ ; tane boyu (mm),

$l$ ; ortalama tane boyu (mm),

$m$ ; tane boylarının yayılım ölçüsü.

Gates-Gaudin-Schuhmann (GGS) eşitliği ise;

$$F(\varphi) = \varphi \varphi_{max}^m \quad (1.1.2)$$

$F(\varphi)$ ;  $\varphi$  tane boyundan küçük olan malzemenin dağılım oranı,

$\varphi$ ; tane boyu (mm),

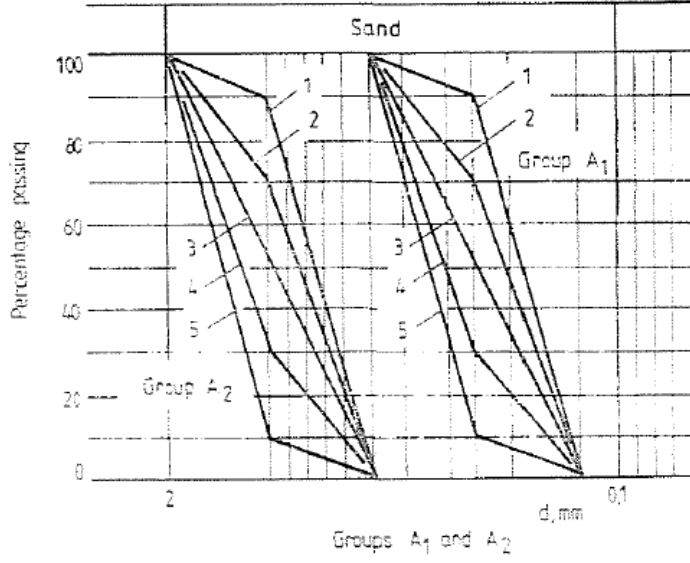
$\varphi_{max}$ ; dağılımdaki maksimum tane boyu,

$m$ ; tane boylarının yayılım ölçüsü.

Tane boyu dağılımlarında çeşitli karakterlerde özellik gösteren grafikler görmek mümkündür. Bu dağılımlarda en yaygın görünen dağılımlar mod ve medyan değerleridir.

Tane boyu dağılımında meydana gelen değişimlerin merkezsel değerini belirleyen 2 büyüklük “mod” ve “medyan” olarak tanımlanır. Mod, bir rastgele değişkenin en muhtemel yani olasılığı veya olasılık değeri en fazla olan değeridir. Medyan ise bir rastgele değişkende üstündeki ve altındaki değerlerin birbirine eşit olduğu değerdir.

J. Lorincz tarafından 1990 yılında yapılan çalışmada farklı yoğunlukta olan öğütülmüş malzemenin farklı tane boyu dağılımları gösterdiği belirtilmiştir. İlgili çalışmada, farklı yoğunlukta öğütülmüş hammaddelerin farklı entropi değişimleri gösterdiğine değinilmiştir. Dolayısıyla tane boyu dağılımı ile entropi değerlerindeki değişim arasında bir ilişkinin olduğu anlaşılmaktadır.



Şekil 1. Farklı yoğunluktaki öğütülmüş malzemenin elek analizi [7]

### 1.1.2 Örnek Alma

Numune alma tane boyu dağılımlarının belirlenmesinde kritik bir adımdır. Yeterince büyük miktarda örnek alınarak istatistiksel hatalar en aza indirilebilir. 1938 yılında Hogg R. tarafından yapılan çalışmada istatistik değerler dikkate alınarak alınacak örneğin boyutu matematiksel olarak formüle edilmiştir. [8] Numune alma esnasında çeşitli formüller kullanılabileceği gibi Avustralya Mineral Enstitüsünün desteği ile yayımlanan enerji verimini belirlemek için öğütme devrelerinde örnek alma metodu üzerine yapılan çalışmada aşağıdaki çizelgedeki örnek alma standartları belirtilmiştir.

Çizelge 1. Çeşitli işlemlerde tane boyuna göre örnek alma ağırlığı [9]

Akış türü	Tane Boyu (mm)	Örnek Ağırlığı (kg)
Birincil Kırıcı	<250	500-1.500
İkincil Kırıcı	<50	100-500
Değirmen Besleme	<12	20-30
Siklon Üstü	<1.5	0.5-1.0

### 1.2. Tane Boyu Tespit Yöntemleri

Literatürde yapılan taramalarda birden çok kaynaktan çeşitli tane boyu tespit yöntemine rastlanmıştır. Genel olarak tane boyu; eleme, elütrasyon, sedimentasyon, elektriksel

direnç, mikroskop, mikroelek, lazer ışını saçınımı yöntemleri ile tespit edildiği ifade edilebilir.

Çizelge 2. Tane boyu tespit yöntemleri [10]

Yöntem	Tanecik Boyutu ( $\mu\text{m}$ )
Eleme (Kuru ve Yaş)	100000-10 $\mu\text{m}$
Elütrasyon	5 $\mu\text{m}$ 'e kadar
Sedimentasyon	300-0,01 $\mu\text{m}$
Elektriksel Direnç	800-30 $\mu\text{m}$
Mikroskop	0,001 $\mu\text{m}$ 'e kadar
Mikroelek	10 $\mu\text{m}$ 'e kadar
Lazer Işını Saçınımı	-0,02 $\mu\text{m}$ 'e kadar

1966 yılında Essick tarafından belirtilen yöntemler ise aşağıda sınıflandırılmıştır. [11]

1. Mikroskobik
2. Sıvı sedimentasyon
3. Hava sedimentasyon
4. Turbidimetrik (Farklı bir çeşit sıvı sedimentasyon)
5. Elektrik direnci
6. Hava sınıflandırıcısı.

R. Hogg tarafından 2008 yılında yapılan bir çalışmada ise, tane boyu tespiti 3 ana başlıkta incelenmiştir.

**a. Bağımsız bireysel parçacıklar analizi yöntemi**

Taneler tek tek incelenir ve boyutları mikroskobik görüntü analizinde belirlenir. Taneler tek tek sayılarak miktar belirleme yapılır ve bu şekilde boyut dağılımı gerçekleştirilir.

**b. Boyuta göre sınıflandırılmış tanelerin sınıflandırılması yöntemi**

Eleme, çökeltme ve kademeli çarpma tertibatlarını içerir. Bir açıklıktan geçme kabiliyetine, bir akışkandaki diferansiyel çökelmeye veya bir akış akımındaki parçacık ataletine dayalı boyut sınıflandırmasını kapsar.

**c. Tüm boyutların aynı anda analizi yöntemi**

Işık ve ses radyasyon yayılımına dayalı yöntemler 3.sınıfa girer.

**1.3 Tane Boyu Verilerinin Değerlendirilmesi**

Tane boyu verilerinin değerlendirilmesinde 3 yaygın yöntem vardır; aritmetik normal, log-normal ve Rosin-Rammler ilişkisi. Öğütmede incelenen tane boyu dağılımı, veri kaynaklarında verilerin logaritmik olarak normal dağıldığını göstermektedir. [11]

Bu çalışma kapsamında yapılan çalışmalarda tane boyu verilerinin dağılımları analiz edilecektir. Oluşturulacak tane boyu dağılımı ile boyut artışlarındaki parçacıkların miktarını gösteren bir frekans grafiği olarak ifade edilecektir. Böylelikle elek altı eğrisi analizleri yapılacak ve birikimli elek altı eğrisi ortaya çıkarılacaktır. Birikimli tane boyu dağılımı grafiğinde farklı boyuttaki incelik indekslerini tespit etmek yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Genellikle %10, %50 ve %90 birikimli yüzdeye karşılık gelen boyutlar olup,  $d_{10}$ ,  $d_{50}$ ,  $d_{90}$  indeksleri olarak ifade edilirler.

Birikimli ve frekans eğrileri doğrusal olabildiği gibi doğrusal olmanın dışında çok farklı şekillerde de oluşabilir.

## 2. ENERJİ VE BOYUT KÜÇÜLTME İLİŞKİLERİ

Boyut küçültmeye bağlı temel enerji yasaları aşağıda başlıklar halinde verilmiştir.

### 2.1 Rittinger Yasası

1857 yılında Rittinger tarafından ortaya konulan yasa ile boyut küçültme amacıyla kullanılan enerjinin malzemenin taze yüzey alan oluşturmak için kullanıldığını iddia etmiştir. Rittinger 'a göre bu tür enerji etkileşimi durumunda ortaya çıkan taze yüzeyler malzemenin karakteristiğini gösterir. Yapılan çalışmalar göstermektedir ki yasanın savunduğu, tüketilen enerjinin sadece devre içinde kaldığı teorisi ise doğru değildir. [12]

Rittinger enerji yasası aşağıdaki formülle ifade edilir. (Rittinger, 1857)

$$E = K \left[ \frac{1}{x_2} - \frac{1}{x_1} \right] \quad (2.1.1)$$

$E$ =Birim hücredeki kırılma için gerekli enerji (kWs/t)

$K$ = Rittenger katsayısı

$x_2$ =Ürün tane boyu ( $\mu\text{m}$ )

$x_1$ =Besleme tane boyu ( $\mu\text{m}$ )

### 2.2 Kick Yasası

1883 Yılında Kick tarafından ortaya konulan yasada, geometrik olarak benzer boyut küçültmede birim hücre başına enerji miktarı sabittir. Dolayısıyla Kick enerji formülünü tane boyunu ( $\mu\text{m}$ ) temel alarak hesaplamıştır. [12]

Kick enerji yasası aşağıdaki formülle ifade edilir. [13]

$$E = K \log \left( \frac{x_2}{x_1} \right) \quad (2.2.1)$$

$E$ =Birim hücredeki kırılma için gerekli enerji (kWs/t)

$K$ = Kick katsayısı

$x_2$ =Ürün tane boyu ( $\mu\text{m}$ )

$x_1$ =Besleme tane boyu ( $\mu\text{m}$ )

Kaynak taramalarında bilgi teorisi temel alınarak yapılan enerji-boyut küçültme ilişkisinde Kick ve Rittinger arasındaki karşılaştırmalarda Kick Yasasının sadece boyut küçültmenin derecesini ifade ettiğini, bununla beraber öğütmede Rittinger yasasının, kırmada ise Kick yasasının daha iyi korelasyon verdiği belirtilmiştir. [14]

### 2.3 Bond Yasası

1952 yılında ise Bond tarafından tane boylarının karekökleri temel alınarak bir enerji-boyut küçültme formülü üretilmiştir. Oluşturduğu formülde malzemenin %80' inin geçtiği  $d_{80}$  değerlerini temel alarak enerji değerlerini belirlemiştir. [15]

$$E = 10W_i \left( \frac{1}{\sqrt{P}} - \frac{1}{\sqrt{F}} \right) \quad (2.3.1)$$

$E$ =Birim hücredeki kırılma için gerekli enerji (kWs/t)

$W_i$ = İş indeksi (kWh/t)

$F$ = Beslemenin %80'inin geçtiği elek açıklığı ( $\mu\text{m}$ )

$P$ = Ürünün %80'inin geçtiği elek açıklığı ( $\mu\text{m}$ )

### 2.4 Charles Yasası

1957 Yılında enerji ile boyut küçültme arasındaki ilişkiyi inceleyen R.J. Charles, boyut küçültmede gereken enerjiyi aşağıdaki şekilde ifade etmiştir [16];

$$E = A(X^I) - n \quad (2.4.1)$$

$E$  = Boyut küçültme için gerekli enerji (kWh/t)

$n$  = Schuhmann eğrisinin düz bölümünün eğimi

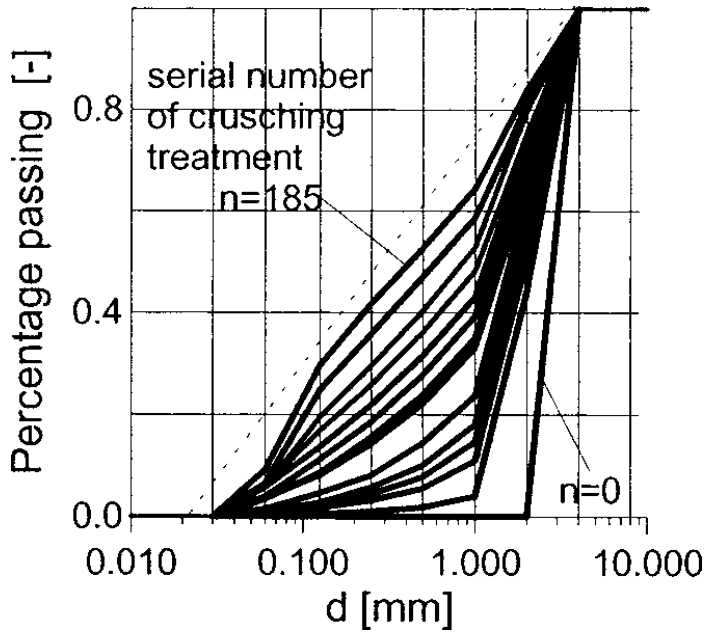
$A$  = Malzemenin dayanımına bağlı bir faktör

$X^1$  = Boyut modülü

## 2.5 Boyut Küçültme ve İncelik Arasındaki İlişki

Boyut küçültme ile incelik arasındaki ilişkiyi göstermek için yapılan çalışmalarda boyut küçültme ile incelik arasında doğru orantının olduğu gözlemlenmiştir.

İncelik için ne kadar çok boyut küçültme işlemi yapılırsa, malzemenin sahip olduğu incelik o kadar artacaktır. Bu konuda J. Lórinéz ve ark. boyut küçültmenin incelik üzerine olan etkisini aşağıdaki grafikte göstermişlerdir.



Şekil 2. Boyut küçültme ile incelikte meydana gelen değişim [17]



### 3. İSTATİSTİKSEL ENTROPİ VE BİRİKİMLİ ELEK ALTI EĞRİSİ ALTINDA KALAN ALAN

Entropi, termodinamikte ısı kaynağından yayılan ısı ile meydana gelen ısı alışverişi demek olsa da bilgi kuramında entropi, belirli bir veri kümesi içinde bulunan verilerin düzensizliğini ve dağınıklığını ölçen bir ölçüm yöntemidir. Entropi, veri kümesindeki rastgele bir değişkenin değerini tahmin ederken, belirsizliği sayısallaştırarak ortaya koyar. Veri kümesi içindeki bilinmeyen arttıkça sistemdeki düzensizliğin arttığını sayısal olarak ifade eder. Eğer veri kümesi içindeki dağılım düzenli ise entropi değeri sıfır olabilir [18].

Entropi kavramı fizikte birçok alanda bulunduğu gibi, mantık, istatistik, biyoloji ve ekonomiye kadar farklı disiplinlerde çok önemli rol oynar. Yakından incelendiğinde entropi kavramı her bir disiplinde farklı şekilde tanımlanır. Aynı disiplin içinde bile farklı şekilde uygulamaları mümkündür [19].

Entropi aynı zamanda olasılıkta ihtimallerin değerlendirilmesinde kullanılır. Bu kısımda entropi çeşitleri ve istatistiksel entropi kavramı tanımlanacaktır.

#### 3.1 Termodinamikteki Entropi Kavramı

Entropi kavramı tarihte ilk kez Clausius tarafından termodinamiğin ikinci kanununda belirtilmiştir. Boltzmann ise 1964 yılında moleküler düzensizliği entropi ile formüle ederek bilime kazandırmıştır.

Termodinamik iki cisim arasındaki ısı transferini, boş bir kap içinde sıkışmış bir gazın yayılımını basınç ve hacim değerleri ile tanımlar. Bir sistemin termodinamik durumu termodinamik değişkenlerinin değerleri ile tanımlanır. Örneğin kap içindeki gazın termodinamik değerleri hacmi, sıcaklığı ve basıncı gibi değerleri sabit ise istikrarlıdır. [19]

Bu çalışmada kullanılan istatistiksel entropi tanımı, termodinamikteki entropi kavramından bağımsız olup bu tanımın termodinamikle de direk ilişkisi bulunmamaktadır. Fakat davranışsal olarak termodinamikteki entropi ile istatistiksel entropi aynı şekilde davranır. Örneğin, düzensiz moleküllerin olduğu bir sistem içindeki sıcaklık arttıkça o sistemin sahip olduğu entropi değeri de artar.

### 3.2 Bilgi Teorisi

Shannon tarafından 1948 yılında ortaya konulan bilgi teorisine göre, bilgi ve belirsizlik madalyonun 2 ayrı yüzü gibidir. Ne kadar belirsizlik varsa, belirsizliğin ortadan kaldırılması ile o kadar bilgi ortaya çıkar. Shannon yaptığı çalışmada temel olarak bir mesajın alınmasından elde edilen bilgi miktarını mesajların ne kadar birbirleriyle ilgili olduğuna bağlı olarak nitelemektir. [20]

$$S_{S,d}(P) = - \sum_{i=1}^n p_i \log[p_i] \quad (3.2.1)$$

Claude E. Shannon tarafından belirtilen yukarıdaki formülde  $P_i$  veri kümesindeki  $i$ . verilerinin tüm değerler sınıfları içerisindeki bulunma olasılığını ifade etmektedir.

Shannon entropisi, örneğin  $\{1,2,3,4,5\}$  kümesi içinde bir sayının gelme ihtimali ( $P_i = \frac{1}{5}$ ) ile entropi değeri hesabı aşağıdaki şekilde yapılmaktadır.

$$E = - \sum_{i=1}^5 \frac{1}{5} \log_2 \frac{1}{5} \quad (3.2.2)$$

Burada; entropi değeri  $E = 2.323$  olarak hesaplanır.

Shannon entropi formülünün karmaşık bir yapı içinde bulunan tanelerin tane dağılımlarını belirlemek için yığın yoğunluğu olarak kullandığı gözlenmiştir. Yapılan çalışmalarda yığın yoğunluğu ile entropi arasında doğrusal bir ilişkinin varlığı ortaya

konulmuştur. Böylelikle yığın yoğunluğu yerine entropi değerinin kullanılabilirliği ispat edilmiştir. [21]

Ancak yapılan çalışmalarda bilim camiasında, Shannon entropisinin, istatistiksel belirsizliğin ve bilginin ölçümünün yararlı bir yolu olup olmadığı hep açıkta kalmaktadır. [22]

### 3.3 İstatistikte Entropi

İstatistiksel mekaniğin temel amaçlarından biri termodinamiğin 2. kanunu kapsamında iri ölçekli (makroskobik) sistemlerin davranışını ince ölçekli (mikroskobik) bileşenlerinin davranışları ile açıklayabilmektir.

İstatistiksel mekanik çok sayıda mikroskobik bileşenlerden oluşan sistemler ile ilgilenir. Bu sistemlere en güzel örnek gaz taneleri ile verilebilir. Düzensizliği Boltzmann 1964 yılında aşağıdaki formül ile ifade etmiştir. [23]

$$S = k \log W \quad (3.3.1)$$

Formülde entropi değeri S, bir sistemin girebileceği mikroskobik durumların sayısı W ve Boltzmann sabiti k olarak ifade edilmektedir.

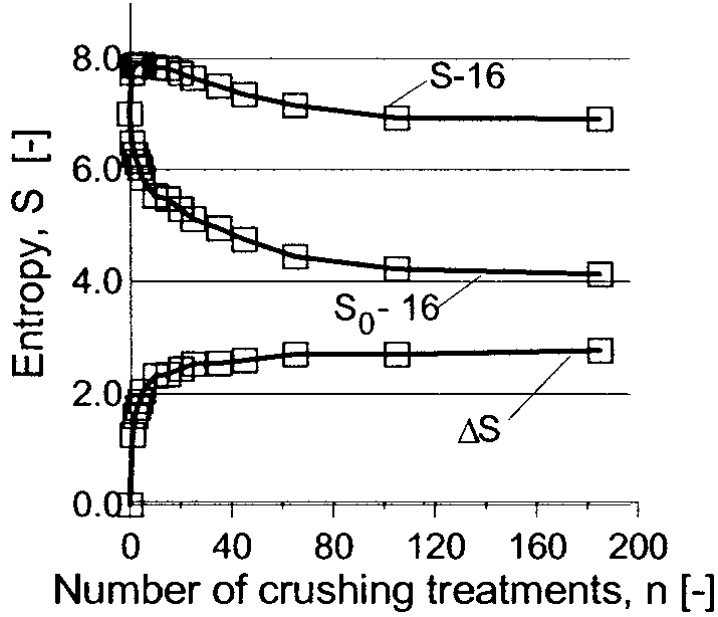
#### 3.3.1 Boyut Küçültme ve Entropi İlişkisi

Boyut küçültme esnasında kırılma ve parçalanma ile birlikte küçük tanelerin tepkimeyi yavaşlatma etkisi nedeniyle en büyük tane boyu aralığında değişim durağandır. Buna bağlı olarak öğütme olması nedeniyle malzemenin karakteristiğindeki yaşanan düzensizliğe bağlı olarak entropi değeri artar.

Fakat öğütme esnasında yaşanan boyut küçültmenin özellikle değirmen sonuna doğru azalması ile meydana gelen düzensizlikte azalma gözlemlenir. Bu nedenle entropi değerinde de değirmen sonuna doğru entropi değerlerinde azalma olduğu değerlendirilir.

J. Lőrincz ve ark. 2014 yılında yaptıkları çalışmada boyut küçültmeye bağlı olarak meydana gelen düzensizliği ve buna bağlı olarak entropi değerinde yaşanan artışı aşağıda belirtilen şekilde göstermişlerdir. [17]

Ayrıca aynı çalışmada boyut küçültme işlemleri ile entropi değerlerinde meydana gelen değişim aşağıdaki şekilde gösterilmiştir.



Şekil 3. Kırma işlemlerine bağlı olarak toplam entropi değerlerindeki değişim [17]

Görüldüğü gibi boyut küçültme işlemleri belli bir noktadan sonra toplam entropi değerinin değişimine etki etmemektedir.

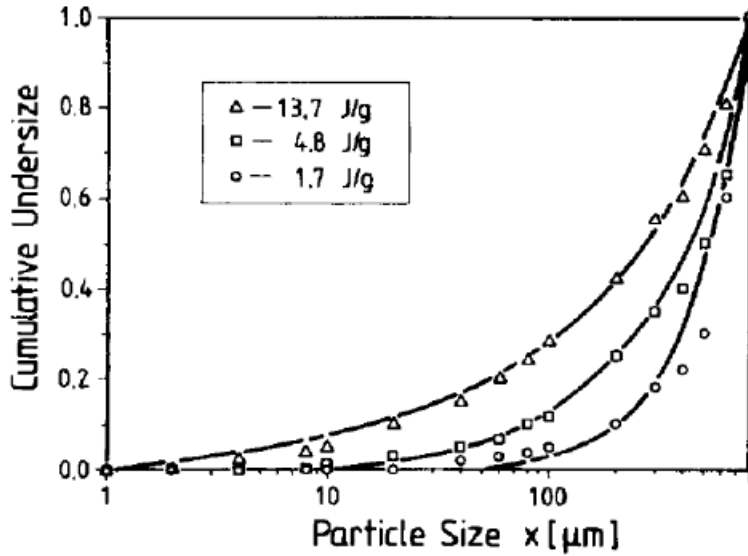
Kaynak taramalarında entropi analizinin tane boyu analizi üzerinde kullanıldığını gösteren birçok yayına rastlanmıştır. Ole A. Mikelsen ve ark. entropi analizi ile yığın halde bulunan flokülant tanelerinin karakteristik davranışlarını ortaya koymuşlardır. İncelik indeksleri temel alınarak entropi hesapları kullanılarak yapılan çalışmada farklı yığınların farklı karakterde özellik gösterdiği gözlemlenmiştir. [24]

Belirtilen çalışmalardaki örneklerde de görüldüğü gibi birikimli elek altı değerleri temel alınarak hesaplanan entropi değerlerinin malzeme karakteristiğini belirleme açısından bir parametre olarak kullanılabilmesi anlaşılmaktadır.

### 3.4 Birikimli Elek Altı Eğrisi ve Eğri Altında Kalan Alan Değerleri

Harold Heywood, yığın içindeki inceliği ifade edebilmek için uygulanan elek analizleri ile birikimli elek altı eğrilerini, bakiye eğrilerini çizerek eğri altında kalan alan ile malzeme karakterini ilişkilendirmeye çalışmıştır. Farklı karakterdeki minerallerin farklı tane boyu dağılımlarının olduğu, buna bağlı olarak ta birikimli elek altı eğrisi altında kalan alan değerlerinin birbirinden farklı olduğu gözlemlenmiştir [25].

V. Zhukov ve ark. tarafından 1998 yılında yayımlanan çalışmada ise, birikimli elek altı eğrileri çizilerek öğütme esnasında tüketilen enerji gösterilmiştir. Yapılan bu çalışmada birikimli elek altı eğrisi altında kalan alanları küçük olan malzemelerin enerji tüketimleri düşük çıkmıştır. Buna bağlı olarak ta birikimli elek altı eğrisi altında kalan ile enerji tüketimi ve incelik indeksi değerleri arasında doğrusal bir ilişkinin olduğu söylenebilmektedir. [26]

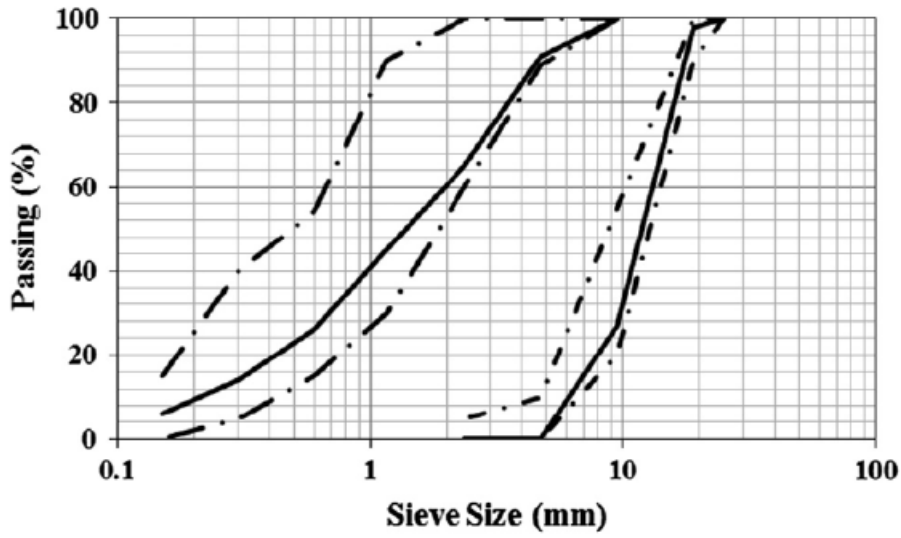


Şekil 4. Birikimli elek altı değerleri ile incelik indeksi değerleri ve enerji tüketimleri [26]

Elek altı eğrileri ve malzeme karakteristiğini inceleyen bazı çalışmalarda ise bakiye değerlerinin entropi değerleri hesaplanarak malzemenin karakteristik özellikleri ortaya konulmuştur. Yapılan bu çalışmalarda elek üstü kalan bakiye değerlerinin birikimli entropi değerleri alınarak belirsizlik tanımlanmaya çalışılmıştır. J. Navarro ve ark. 2009 yılında yaptığı çalışmada, birikimli elek üstü bakiyeleri ile hesaplanan birikimli entropi

değerlerinin belirsizliği tanımlama adına bir yöntem olarak kullanılabileceğini göstermiştir. [27]

E. Ghiasvand ve ark. tarafından portland çimentosu taneleri üzerine yapılan birikimli tane boyu analizinde ince taneli agregalar ile kalın taneli agregaların birikimli elek altı eğrileri aşağıda gösterildiği gibi çıkarılmıştır. Her bir tane boyunda görüldüğü gibi incelik indeks değerleri arttıkça eğri altı kalan alan artmaktadır.



Şekil 5. Farklı kaliteleredeki agregalarda birikimli tane boyu dağılımı [28]

İncelik ile elektriksel direnç, basınç dayanımı, sorptivite katsayısı ve RCPT değerleri arasındaki ilişkilerin gösterildiği çalışmada, yüksek incelik değerlerine sahip çimentonun uzun vadeli etkilerinin düşük olmasından dolayı her zaman ekonomik olarak faydalı olmayacağı gösterilmiştir. [28]

Yukarıdaki çalışmalardan da görüldüğü gibi birikimli elek altı ve bakiye değerlerinin, malzemenin karakteristiğini belirleme açısından kullanılabileceğini gösteren birçok çalışma yapılmıştır.

#### 4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu çalışma esnasında yapılan analizlerde kullanılan örnekler, kuru bilyalı değirmenler ile çalışan çimento üretim tesislerine ait olup, bu örnekler kapalı devre sistemi ile çalışan değirmenlerin devre etrafından ve değirmen içinden alınmıştır. Bu çalışma kapsamında kullanılacak veriler toplam besleme, değirmen içi ve sınıflandırıcı beslemesinden temin edilmiştir.

Çalışma boyunca devre etrafı madde denklığı çalışmaları JKSIMMET bilgisayar programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.



Fotoğraf 1. Değirmen yatay görünümü (Tesis-4)



Fotoğraf 2. Değirmen içi görünümü (Tesis-3)

#### 4.1 Tesis-1 Örnek Alma ve Deneysel Çalışmaları

Tesiste bulunan öğütme devresi, yüksek verimli havalı sınıflandırıcısı olan kapalı devre bilyalı değirmen devresidir. Bilyalı değirmenin tasarım parametreleri aşağıda verilmiştir.

Çizelge 3. Bilyalı değirmen tasarım parametreleri (Tesis-1)

Değirmen Çapı (m)	4.36	
Değirmen Uzunluğu (m)	13.48	
Değirmen Gücü (kW)	3200	
	Birinci Bölme	İkinci Bölme
Etkili Çap (m)	4.1	4
Etkili Uzunluk (m)	3.75	8.5
Bilya Boyu (mm)	90	55

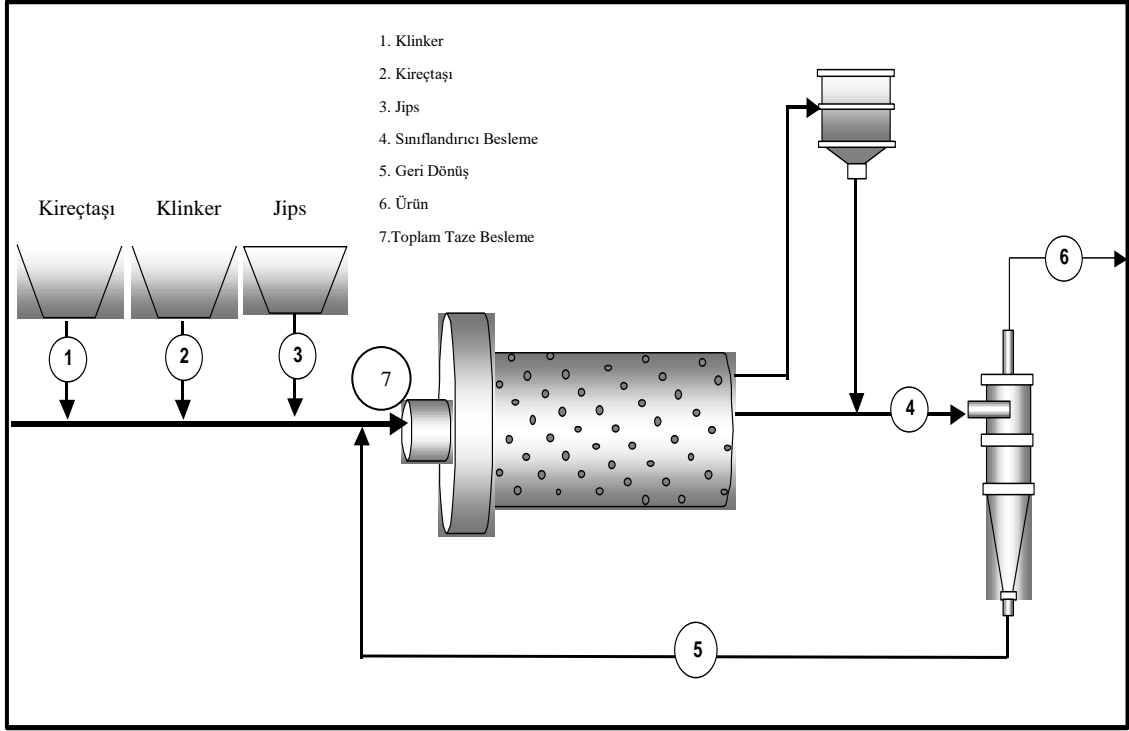


Örnek alma çalışması, sistem normal halde çalışırken gerçekleştirilmiştir. Alınan örneğin yüzey alanı öğütme yardımcıları ile 325m<sup>2</sup>/kg 'dır. Örnek alma esnasında değişen tüm değişkenler kontrol odasında kayıt altına alınmıştır. Değirmenin çalışma parametreleri aşağıdaki çizelgede verildiği gibidir.

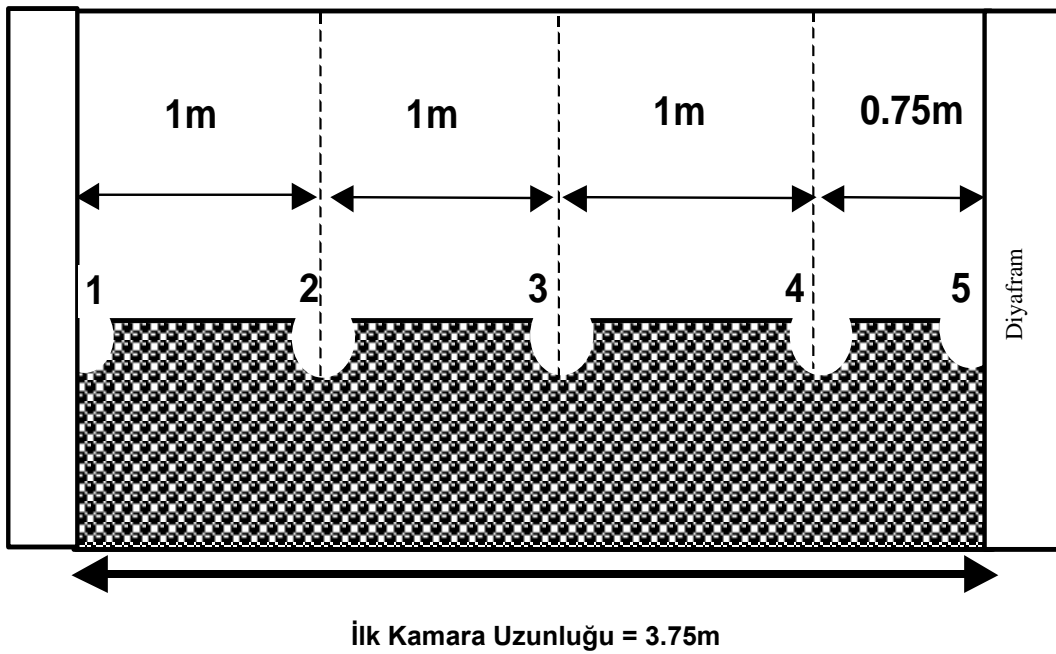
Çizelge 4. Değirmenin çalışma parametreleri (Tesis-1)

Klinker (t/sa)	86.20
Alçıtaşı (t/sa)	5.27
Kireçtaşı (t/sa)	4.46
Devreden Yük (t/sa)	169.45
Değirmen Gücü (kW)	3075
Elevatör Gücü (kW)	38.05
Seperatör Gücü (kW)	97.15
Seperatör Hızı (%)	81.73
Öğütme Yardımcıları (ml/t)	250

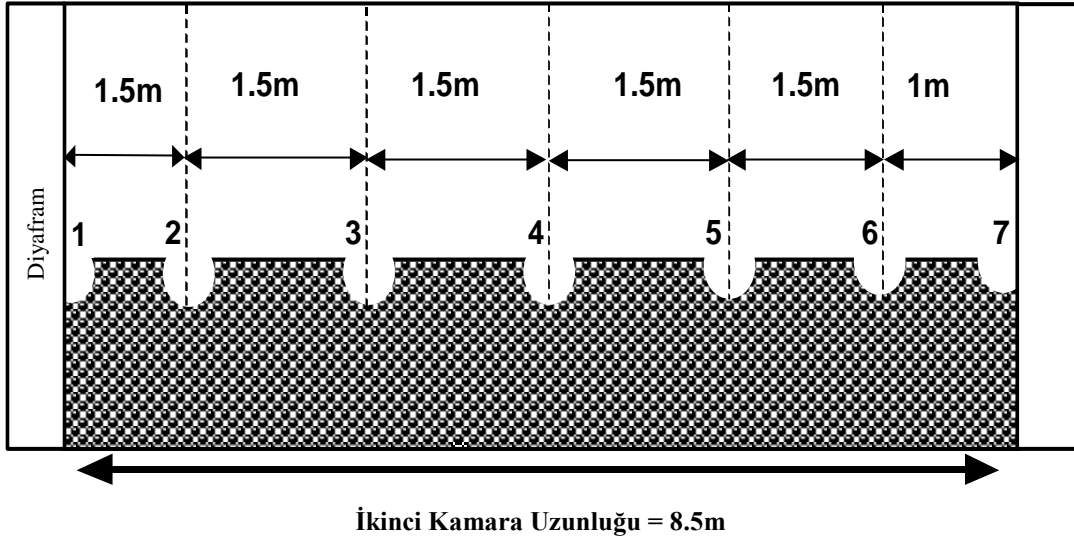
Devre çalışır halde iken devre etrafındaki akışlardan örnekler alınmıştır. Devre gözlemleri tamamlandıktan sonra öğütme durdurularak değirmen içinden örnekleme yapılmıştır. Tesisteki kapalı devre akış şeması ve değirmen boyunca tanımlanan örnek alma noktaları aşağıda gösterilmiştir.



Şekil 6. Kapalı devre öğütme sistemi akış şeması (Tesis-1)

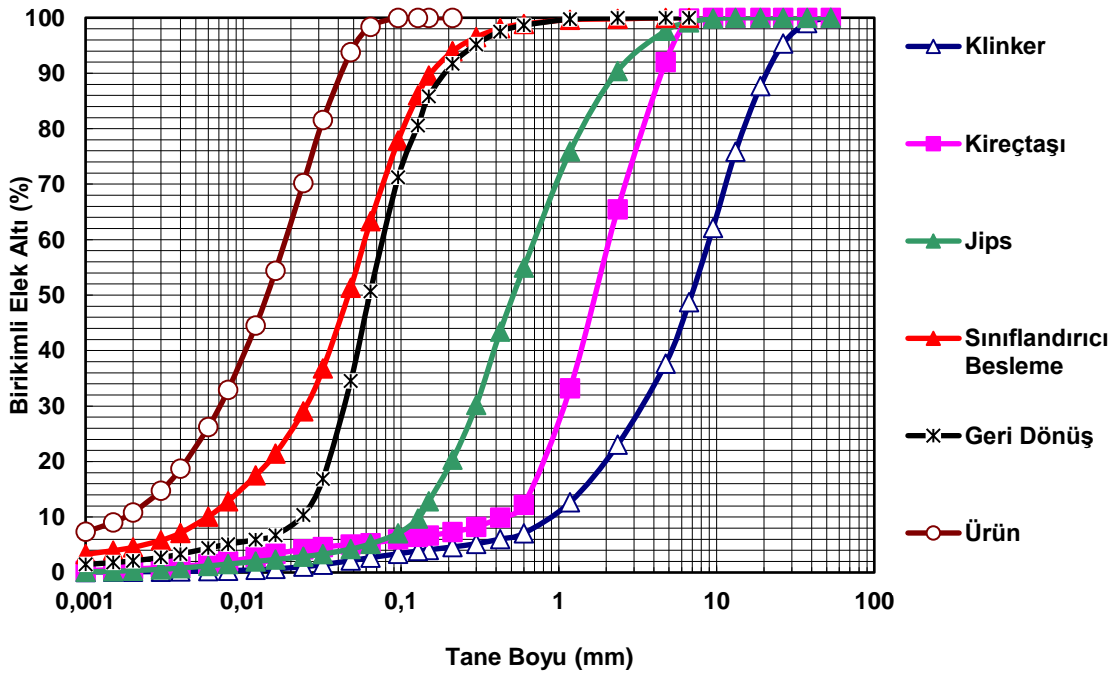


Şekil 7. Değirmen birinci kamarası örnek alma noktaları (Tesis-1)



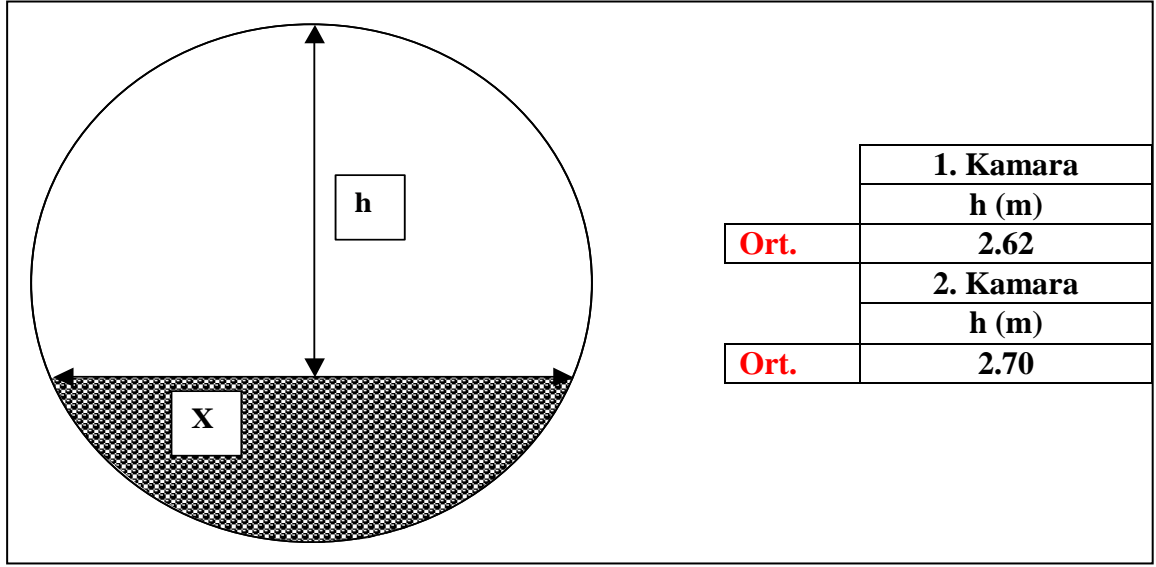
Şekil 8. Değirmen ikinci kamara örnek alma noktaları (Tesis-1)

Çalışma esnasında alınan tüm örnekler 53mm ile 153 $\mu$ m arasında eleklerle elenmiştir. 153 $\mu$ m altındaki numuneler ise lazer tarayıcı kullanılarak tane boyuna göre sınıflandırılmıştır. Bu elemeler ile elde edilen birikimli elek altı değerleri ile oluşan birikimli elek altı eğrisi aşağıda gösterilmiştir.



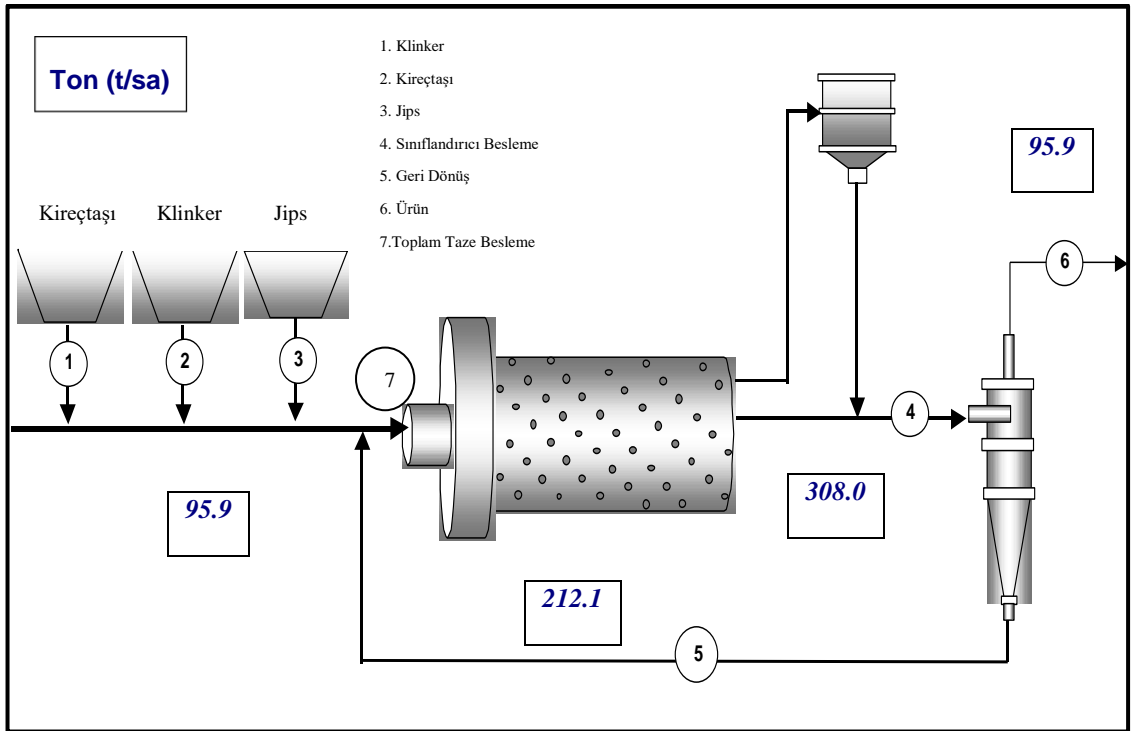
Şekil 9. Devre etrafı birikimli tane boyu dağılımı (Tesis-1)

Örnek alma sırasında hesaplanan değirmen içi ölçüleri aşağıdaki grafikte gösterilmiştir.



Şekil 10. Değirmen içi ölçüleri (Tesis-1)

Tesis-1'e ait devre etrafı madde denklığı aşağıdaki şekilde gösterilmiştir.



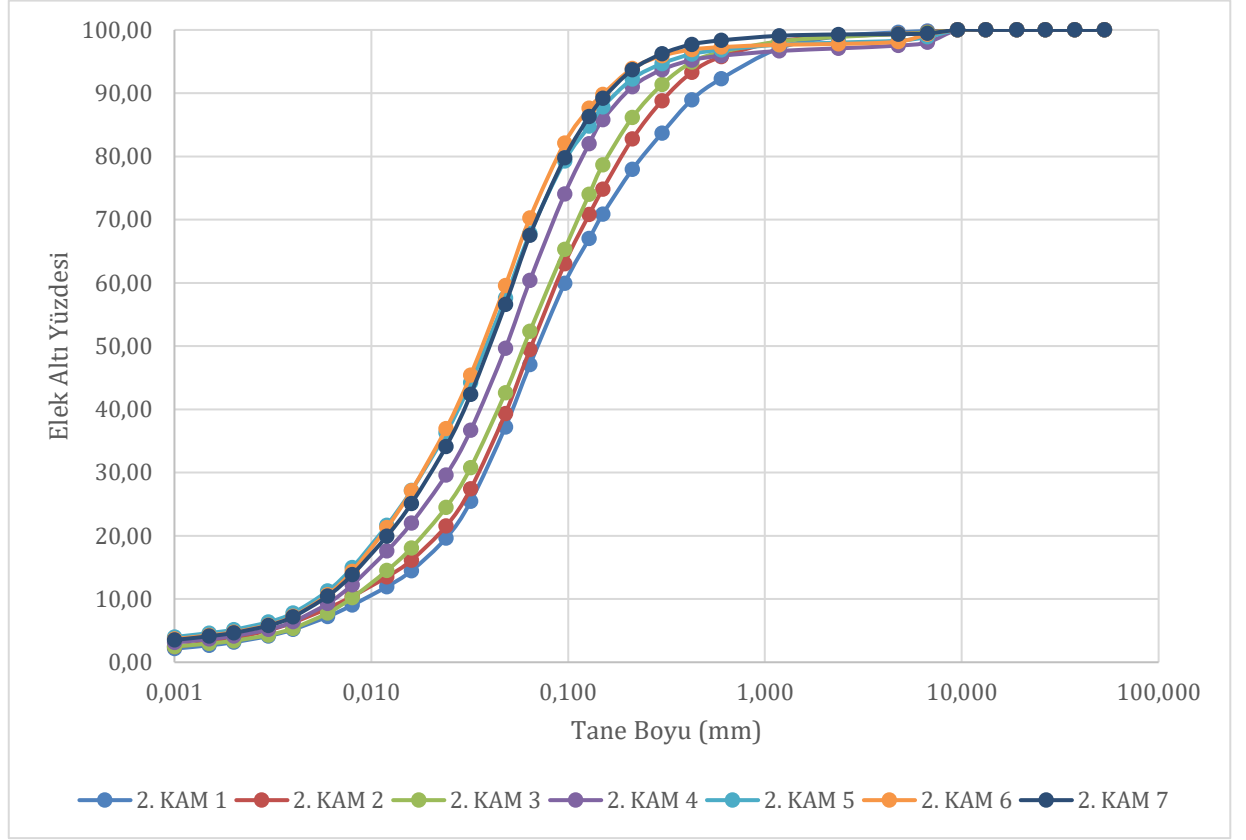
Şekil 11. Devre etrafı madde denklığı (Tesis-1)

Tesis-1 de bu çalışmaya konu örnekler kapalı devre sistem ile çalışan bir değirmenin 2. kamarasından alınmıştır. Tesis-1 içindeki 2. kamara uzunluğu 8.5m olup, örnekler; 0, 1.5, 3, 4.5, 6, 7.5 ve 8.5 metrelerden alınmıştır. Bu örneklere göre yapılan birikimli tane boyu analizleri aşağıdaki çizelgede verilmiştir.

Çizelge 5. Birikimli elek altı yüzdeleri (Tesis-1)

	2. KAM 1	2. KAM 2	2. KAM 3	2. KAM 4	2. KAM 5	2. KAM 6	2. KAM 7
Tane Boyu (mm)	-Σ%	-Σ%	-Σ%	-Σ%	-Σ%	-Σ%	-Σ%
53,000	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
37,500	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
26,500	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
19,000	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
13,200	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
9,500	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
6,700	99,82	99,63	99,58	98,03	98,89	99,32	99,45
4,750	99,62	99,36	99,33	97,52	98,30	98,14	99,33
2,360	98,97	98,98	98,89	97,08	98,00	97,78	99,28
1,180	97,10	98,20	98,18	96,68	97,66	97,65	99,07
0,600	92,29	95,76	96,49	95,91	96,85	97,28	98,35
0,425	88,96	93,30	94,89	95,22	96,18	96,89	97,71
0,300	83,69	88,80	91,36	93,71	94,67	95,90	96,22
0,212	77,93	82,75	86,14	90,99	92,25	93,91	93,71
0,150	70,85	74,81	78,64	85,78	87,82	89,80	89,17
0,128	67,00	70,80	74,00	82,00	84,80	87,60	86,30
0,096	59,91	63,02	65,30	74,03	79,27	82,11	79,76
0,064	47,05	49,45	52,35	60,38	67,82	70,26	67,52
0,048	37,22	39,34	42,63	49,65	57,59	59,56	56,58
0,032	25,44	27,43	30,79	36,69	44,22	45,41	42,35
0,024	19,65	21,54	24,50	29,61	36,30	36,94	34,12
0,016	14,47	16,14	18,08	22,01	27,18	27,15	25,11
0,012	11,96	13,49	14,49	17,59	21,66	21,29	19,95
0,008	9,03	10,42	10,21	12,26	14,96	14,39	13,85
0,006	7,21	8,51	7,78	9,28	11,27	10,68	10,46
0,004	5,18	6,27	5,37	6,41	7,79	7,27	7,19
0,003	4,15	5,05	4,31	5,19	6,35	5,88	5,80
0,002	3,17	3,79	3,40	4,15	5,15	4,76	4,65
0,0015	2,68	3,14	2,96	3,66	4,61	4,25	4,12
0,001	2,15	2,45	2,48	3,12	4,00	3,67	3,52

Değirmenin 2. kamarasından alınan örnekleme doğrultusunda her bir örnek noktası için birikimli elek altı eğrileri çizilmiştir.



Şekil 12. 2. Kamara içi birikimli elek altı eğrisi (Tesis-1)

Bu çalışmanın sonuçlar ve değerlendirme kısmında, her iki örnek nokta arası için hesaplanan toplam eğri altı alanı, yukarıda verilen grafikteki noktalar arası eğri altı alanları hesaplanarak bulunmuştur.

#### 4.2 Tesis-2 Örnek Alma ve Deneysel Çalışmaları

Tesiste bulunan çimento öğütme devresi, yüksek verimli havalı sınıflandırıcısı olan kapalı devre bilyalı değirmen devresidir. Bilyalı değirmenin tasarım parametreleri aşağıda verilmiştir.

Çizelge 6. Bilyalı değirmen tasarım parametreleri (Tesis-2)

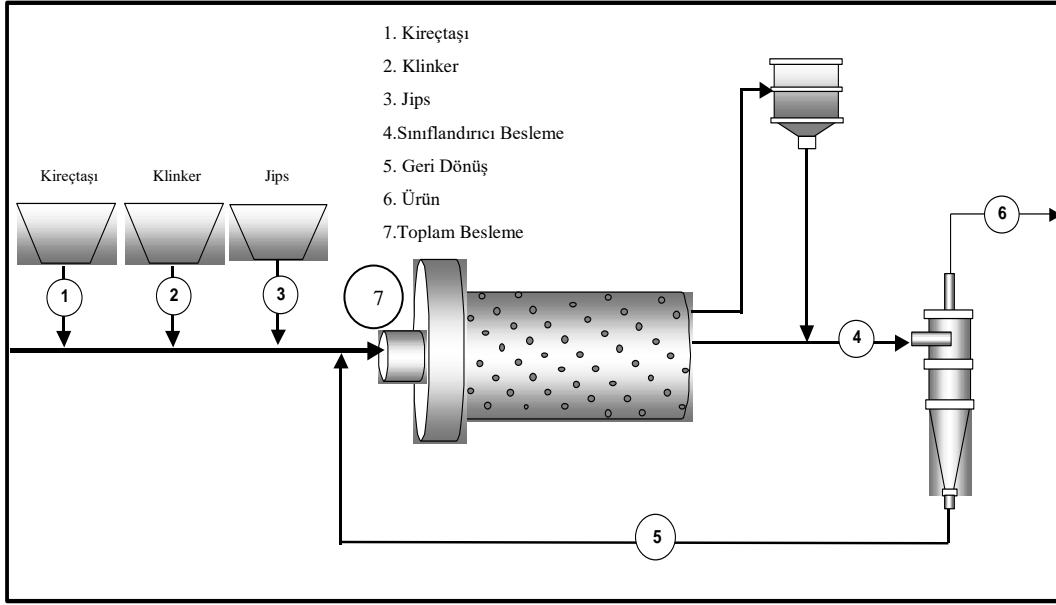
Değirmen Çapı (m)	4.4	
Değirmen Uzunluğu (m)	12.02	
Değirmen Gücü (kW)	3520	
	Birinci Bölme	İkinci Bölme
Etkili Çap (m)	4.18	4.32
Etkili Uzunluk (m)	4.32	6.58
Bilya Boyu (mm)	90	30
Yük Miktarı (%)	32.5	32.2

Örnek alma çalışması değirmen sistem normal halde çalışırken gerçekleştirilmiştir. Alınan örneğin yüzey alanı öğütme yardımcıları ile 381m<sup>2</sup>/kg 'dır. Örnek alma esnasında değişen tüm değişkenler kontrol odasında kayıt altına alınmış olup, işletmenin çalışma parametreleri aşağıdaki çizelgede verildiği gibidir.

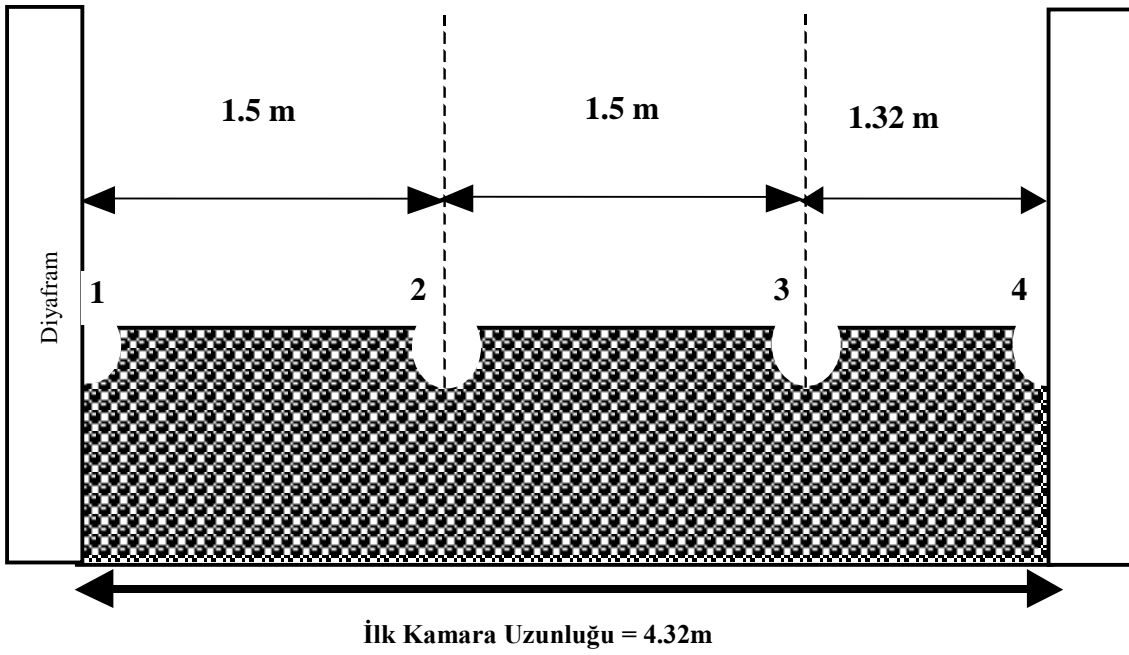
Çizelge 7. Değirmenin çalışma parametreleri (Tesis-2)

Klinker (t/sa)	93.4
Alçıtaşı (t/sa)	5.6
Kireçtaşı (t/sa)	5.6
Devreden Yük (t/sa)	64.6
Değirmen Gücü (kW)	207
Elevatör Gücü (kW)	64
Seperatör Gücü (kW)	219
Seperatör Hızı (%)	179
Öğütme Yardımcıları (ml/t)	520

Devre çalışırken devre etrafındaki akışlardan örnekler alınmıştır. Devre gözlemleri tamamlandıktan sonra öğütme durdurularak değirmen içi örnekleme yapılmıştır. Tesisteki kapalı devre akış şeması ve değirmen boyunca belirlenen örnek alma noktaları aşağıda gösterilmiştir.

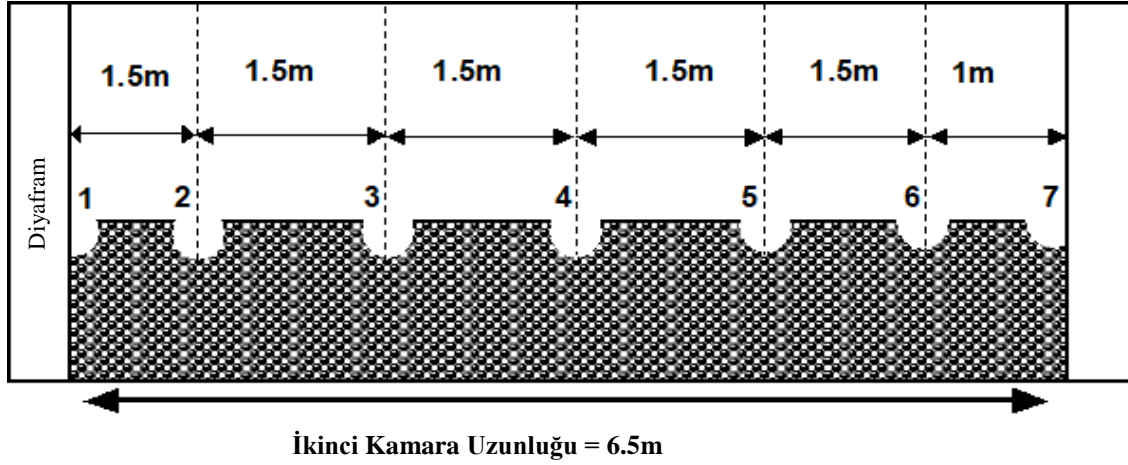


Şekil 13. Kapalı devre öğütme sistemi akış şeması (Tesis-2)



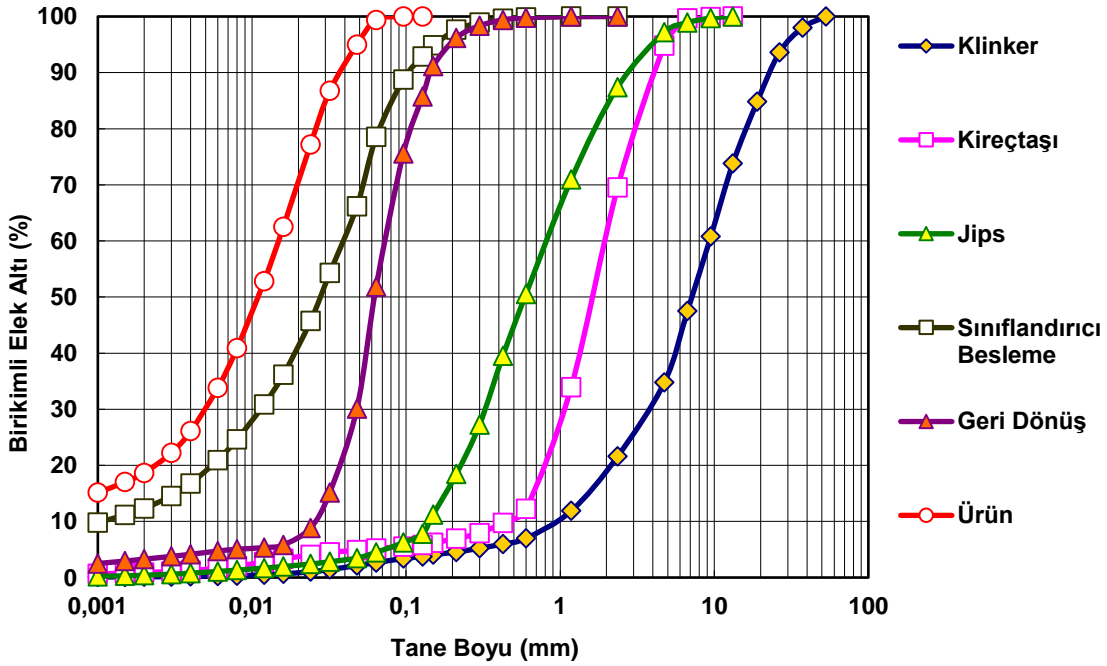
Şekil 14. Değirmen birinci kamarası örnek alma noktaları (Tesis-2)





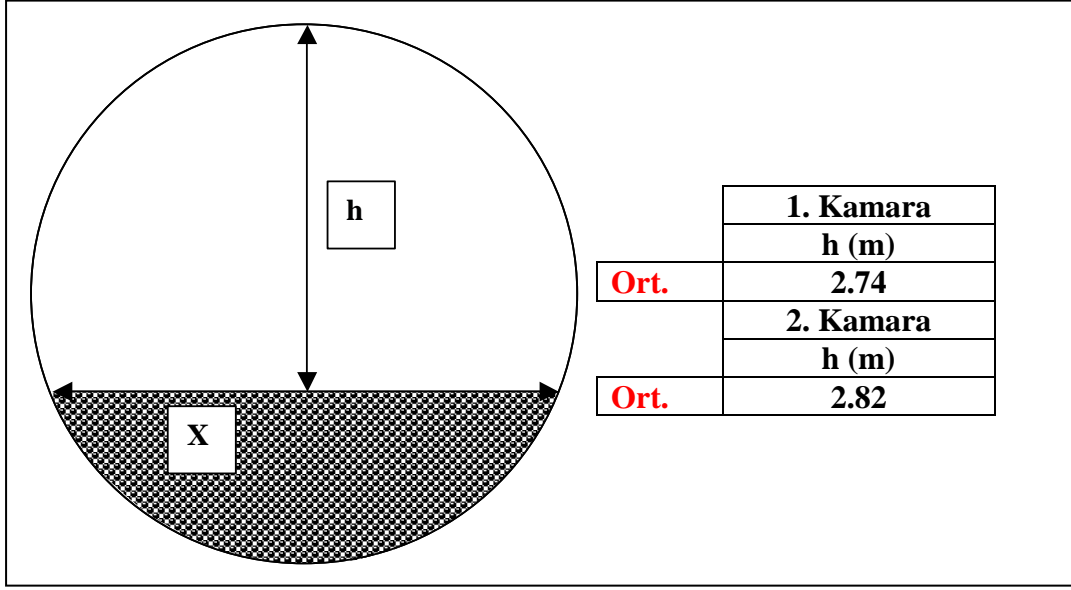
Şekil 15. Değirmen İkinci kamarası örnek alma noktaları (Tesis-2)

Çalışma esnasında alınan tüm örnekler 53mm den 153 $\mu$ m arasında elenmiştir. 153 $\mu$ m altındaki numuneler ise lazer tarayıcı kullanılarak tane boyuna göre sınıflandırılmıştır. Bu eleme ile akıştaki tane boyu birikmiş elek altı eğrisi aşağıda gösterilmiştir.



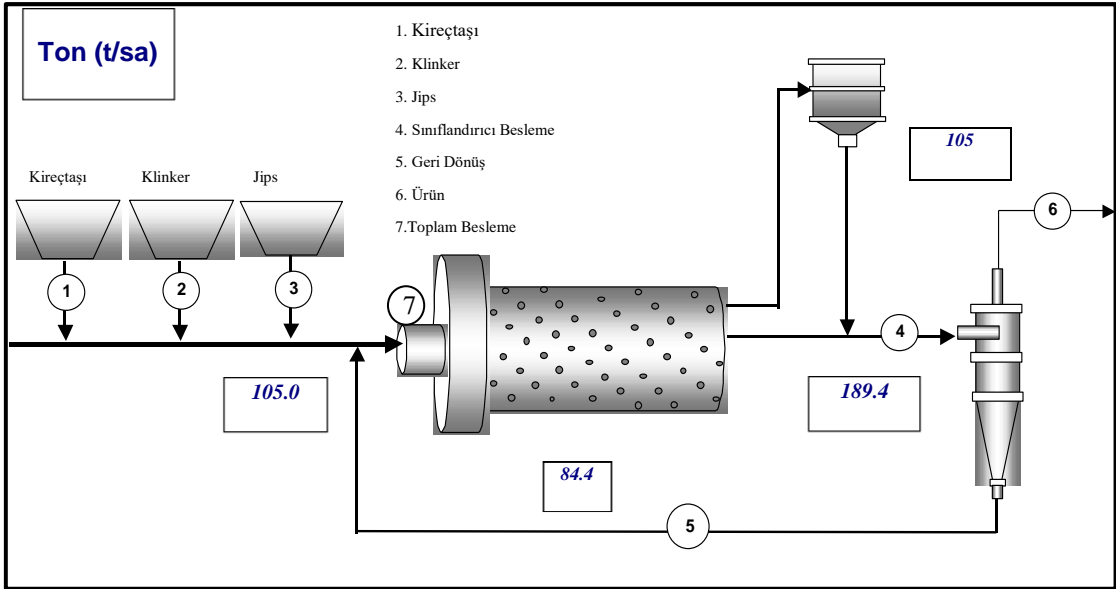
Şekil 16. Devre etrafı birikimli tane boyu dağılımı (Tesis-2)

Örnek alma sırasında hesaplanan değirmen içi ölçüleri aşağıdaki grafikte gösterilmiştir.



Şekil 17. Değirmen içi ölçüleri (Tesis-2)

Tesis-2 'ye ait devre etrafı madde denklığı aşağıdaki şekilde gösterilmiştir.



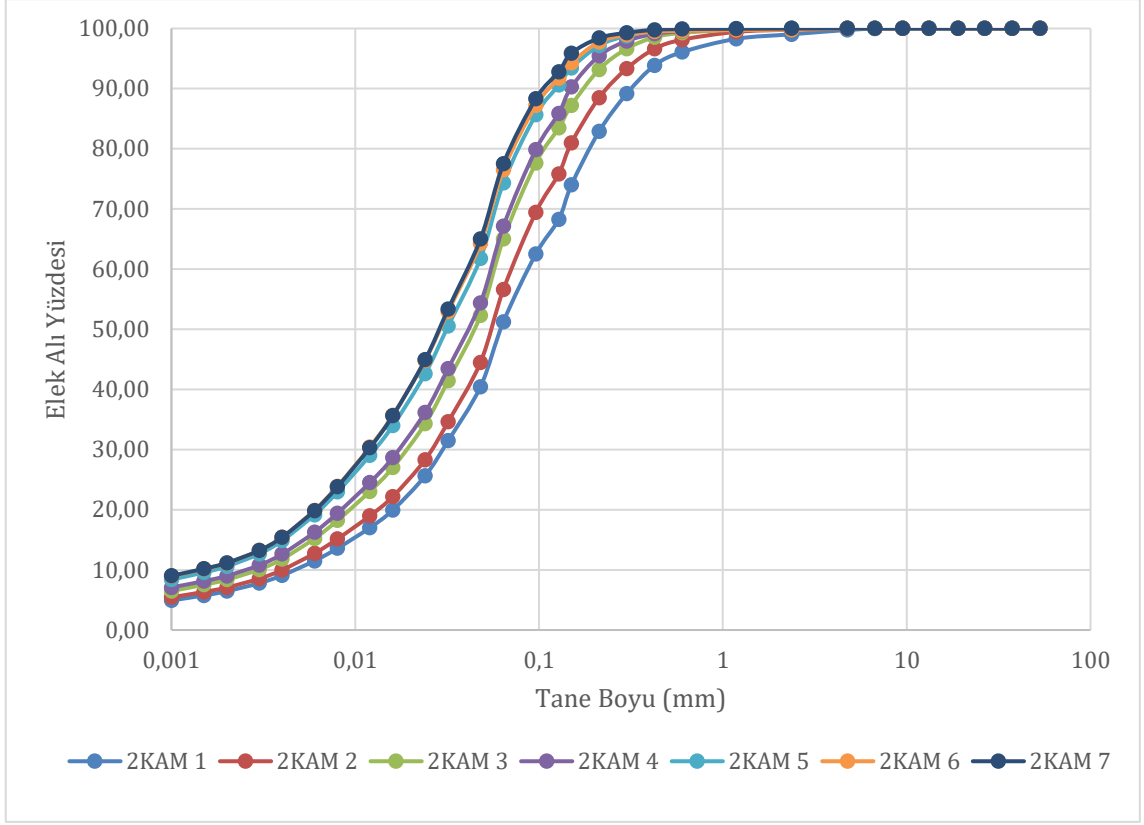
Şekil 18. Devre etrafı madde denklığı (Tesis-2)

Tesis-2 de bu çalışmaya konu örnekler kapalı devre sistem çalışan bir değirmenin 2. kamarasından alınmıştır. Tesis-2 içindeki 2. kamara uzunluğu 6.6m olup, örnekler; 0, 0.88, 1.86, 2.88, 3.86, 4.88 ve 6.6. metrelerden alınmıştır. Bu örneklere göre yapılan birikimli tane boyu analizleri aşağıdaki çizelgede verilmiştir.

Çizelge 8. Birikimli elek altı yüzdeleri (Tesis-2)

	2KAM 1	2KAM 2	2KAM 3	2KAM 4	2KAM 5	2KAM 6	2KAM 7
Tane Boyu (mm)	-Σ%	-Σ%	-Σ%	-Σ%	-Σ%	-Σ%	-Σ%
53	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
37,5	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
26,5	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
13,2	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
9,5	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
6,7	99,95	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
4,75	99,75	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
2,36	99,03	99,80	99,95	100,00	100,00	99,78	100,00
1,18	98,27	99,43	99,81	99,88	99,96	99,75	99,96
0,6	96,08	98,12	99,26	99,53	99,77	99,60	99,91
0,425	93,86	96,62	98,54	99,10	99,54	99,49	99,78
0,3	89,16	93,34	96,63	97,92	98,77	98,95	99,29
0,212	82,87	88,48	93,18	95,44	97,16	97,76	98,41
0,15	73,99	80,98	87,21	90,30	93,44	94,29	95,89
0,128	68,27	75,81	83,48	85,88	90,58	91,73	92,79
0,096	62,50	69,42	77,62	79,84	85,66	87,19	88,31
0,064	51,24	56,61	65,01	67,13	74,33	76,49	77,53
0,048	40,45	44,49	52,29	54,38	61,78	64,25	64,98
0,032	31,46	34,61	41,44	43,46	50,52	52,95	53,33
0,024	25,63	28,31	34,28	36,17	42,60	44,78	44,92
0,016	19,93	22,18	27,00	28,65	33,96	35,66	35,61
0,012	17,00	18,97	23,04	24,51	29,03	30,39	30,29
0,008	13,58	15,14	18,21	19,42	22,95	23,89	23,81
0,006	11,49	12,75	15,20	16,24	19,16	19,90	19,84
0,004	9,08	9,98	11,80	12,63	14,86	15,44	15,42
0,003	7,78	8,53	10,06	10,77	12,66	13,20	13,21
0,002	6,45	7,07	8,36	8,99	10,58	11,12	11,15
0,0015	5,75	6,32	7,51	8,12	9,56	10,12	10,17
0,001	4,91	5,45	6,48	7,08	8,38	8,97	9,02

Bu değerlere bağlı olarak birikimli elek altı eğrisi aşağıdaki verilmiştir.



Şekil 19. 2. Kamara içi birikimli elek altı eğrisi (Tesis-2)

Bu çalışmanın sonuçlar ve değerlendirme kısmında her bir örnek alma noktası için hesaplanan toplam eğri altı alanı, yukarıda verilen grafikteki noktalar arası eğri altı alanları hesaplanarak bulunmuştur.

#### 4.3 Tesis-3 (Değirmen-4) Örnek Alma ve Deneysel Çalışmaları

Tesiste bulunan çimento öğütme devresi, ikinci nesil yüksek verimli havalı sınıflandırıcısı olan kapalı devre kuru bilyalı değirmen devresidir. Bilyalı değirmenin tasarım parametreleri aşağıda verilmiştir.

Çizelge 9. Bilyalı değirmen tasarım parametreleri (Tesis-3)

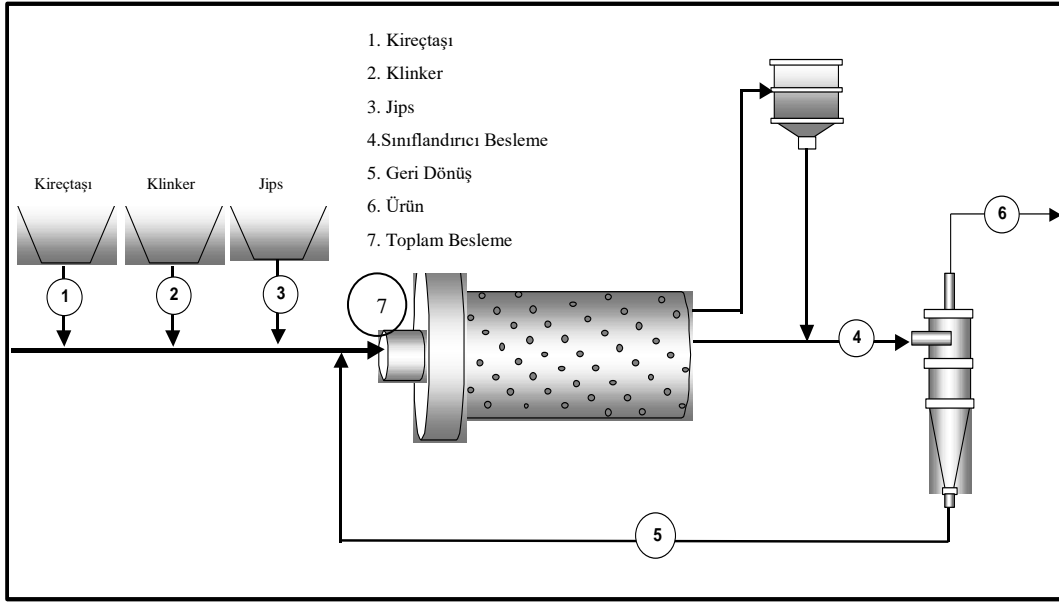
Değirmen Çapı (m)	3.8	
Değirmen Uzunluğu (m)	11.4	
Değirmen Gücü (kW)	2500	
Değirmen Devri (rpm)	16	
	Birinci	İkinci Bölme
Etkili Çap (m)	3.7	3.7
Etkili Uzunluk (m)	3	7.5
Bilya Boyu (mm)	90	40

Örnek alma çalışması değirmen sistem normal halde çalışırken gerçekleştirilmiştir. Alınan örneğin yüzey alanı öğütme yardımcıları ile 370m<sup>2</sup>/kg 'dır. Örnek alma esnasında değişen tüm değişkenler kontrol odasında kayıt altına alınmıştır. İşletmenin çalışma parametreleri aşağıdaki çizelgede verildiği gibidir.

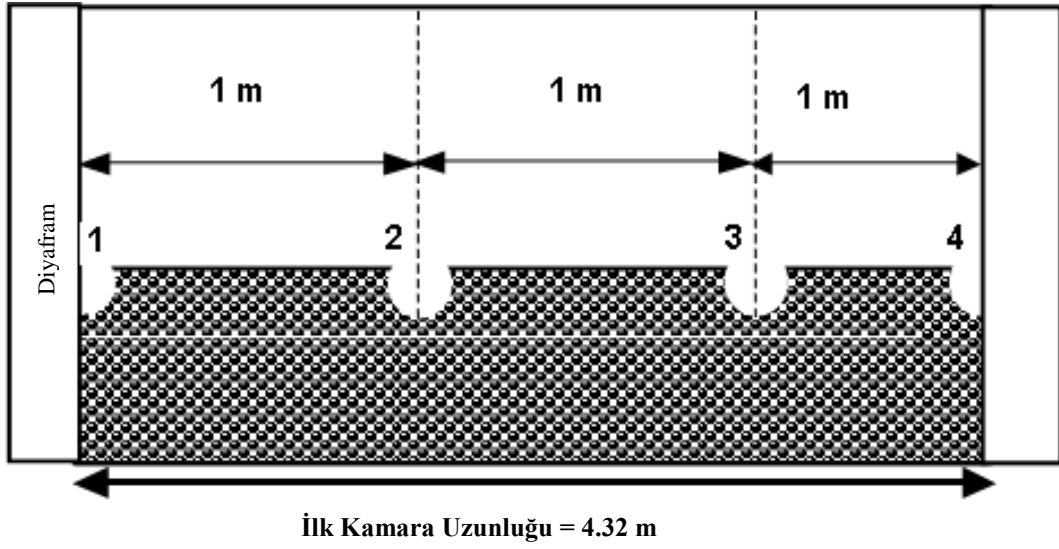
Çizelge 10. Değirmenin çalışma parametreleri (Tesis-3)

Klinker (t/sa)	52.45
Alçıtaşı (t/sa)	2.88
Kireçtaşı (t/sa)	3.15
Devreden Yük (t/sa)	81
Değirmen Gücü (amp)	391
Elevatör Gücü (amp)	30
Seperatör Gücü (amp)	98
Seperatör Devri (rpm)	949
Öğütme Yardımcıları (ml/t)	0

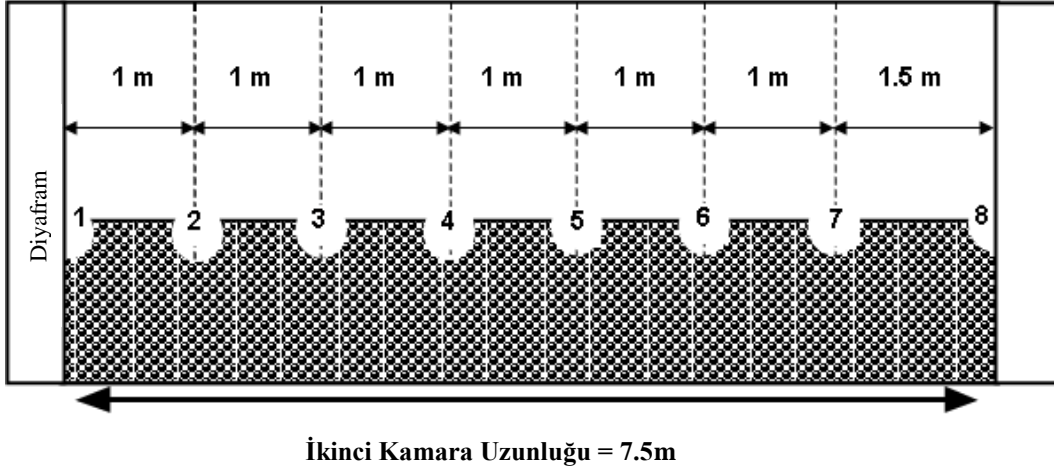
Devre çalışırken devre etrafındaki akışlardan örnekler alınmıştır. Devre gözlemleri tamamlandıktan sonra öğütme durdurularak değirmen içi örnekleme yapılmıştır. Tesisteki kapalı devre akış şeması ve değirmen boyunca belirlenen örnek alma noktaları aşağıda gösterilmiştir.



Şekil 20. Kapalı devre öğütme sistemi akış şeması (Tesis-3)

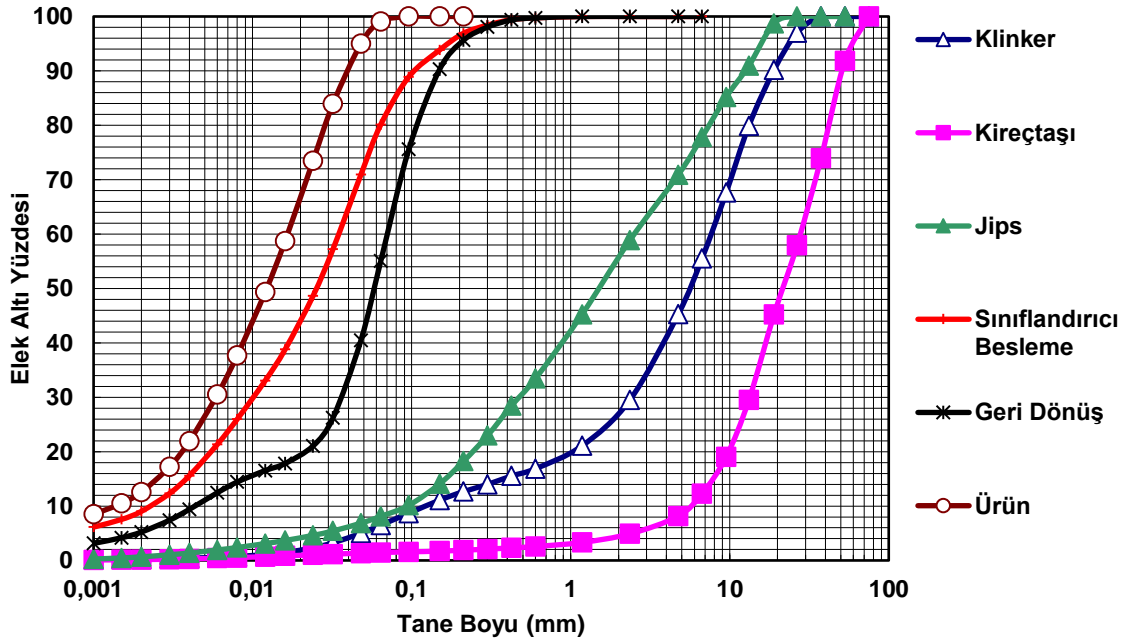


Şekil 21. Değirmen birinci kamarası örnek alma noktaları (Tesis-3)



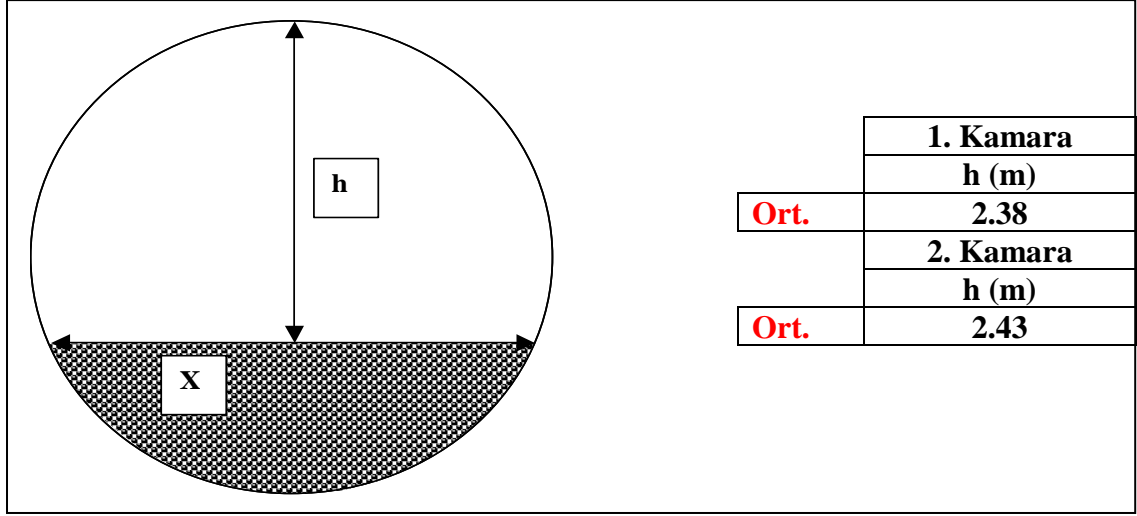
Şekil 22. Değirmen ikinci kamarası örnek alma noktaları (Tesis-3)

Çalışma esnasında alınan tüm örnekler 53mm den 153µm arasında elenmiştir. 153µm altındaki numuneler ise lazer tarayıcı kullanılarak tane boyuna göre sınıflandırılmıştır. Bu eleme ile akıştaki tane boyu birikmiş elek altı eğrisi aşağıda gösterilmiştir.



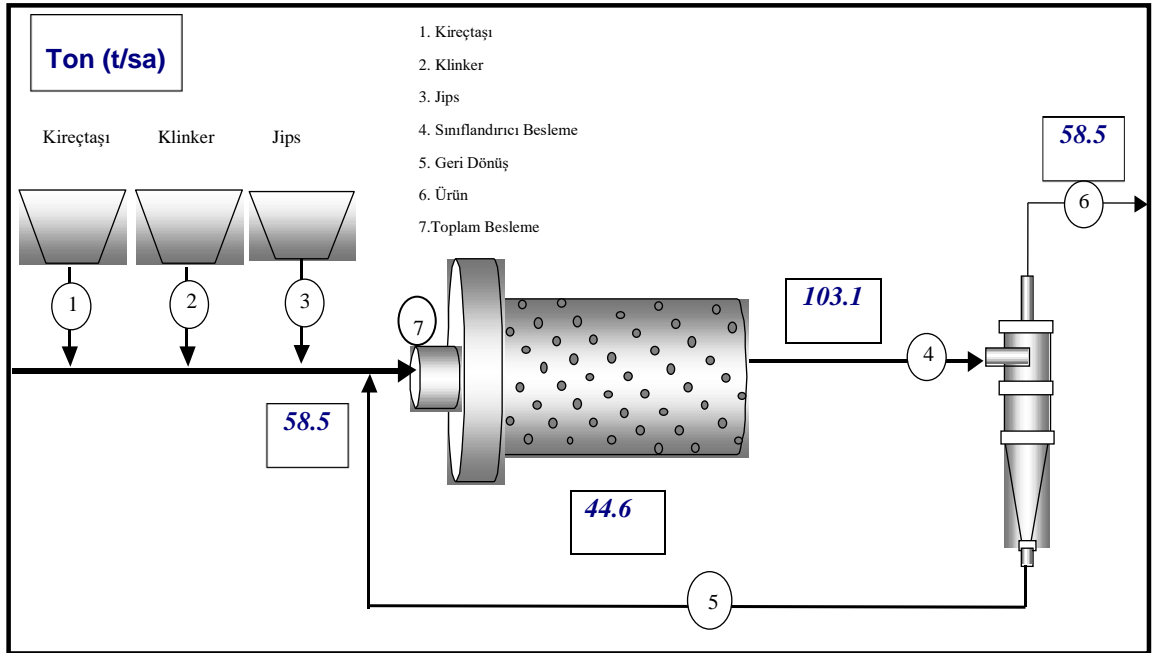
Şekil 23. Devre etrafı birikimli tane boyu dağılımı (Tesis-3)

Örnek alma sırasında hesaplanan değirmen içi ölçüleri aşağıdaki grafikte gösterilmiştir.



Şekil 24. Değirmen içi ölçüleri (Tesis-3)

Tesis-3'e ait devre etrafı madde denklığı aşağıdaki şekilde gösterilmiştir.



Şekil 25. Devre etrafı madde denklığı (Tesis-3)

Tesis-3 de bu çalışmaya konu örnekler kapalı devre sistem çalışan bir değirmenin 2. kamarasından alınmıştır. Tesis-3 içindeki 2. kamara uzunluğu 7.5m olup, örnekler; 0, 1,

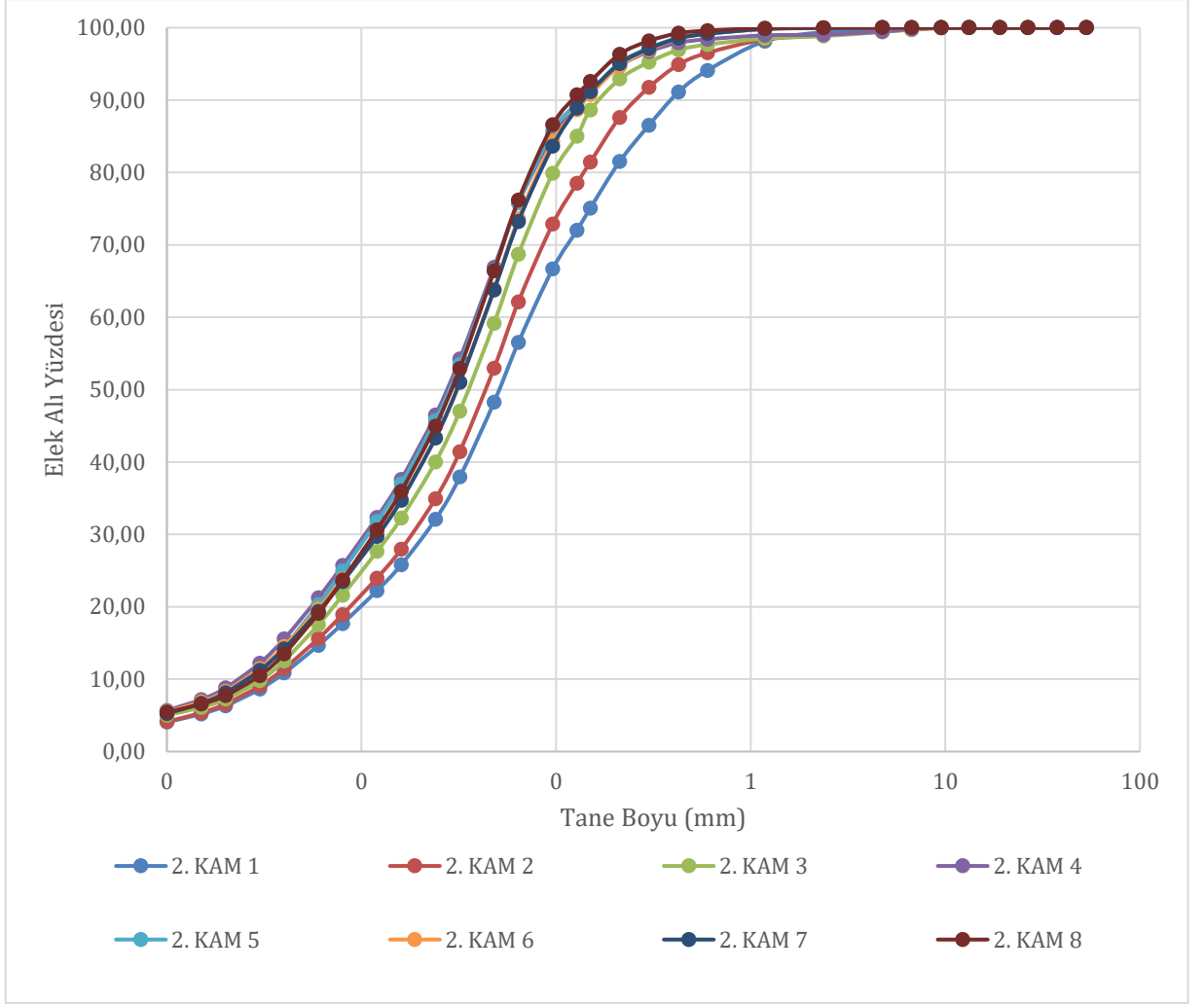


2, 3, 4, 5, 6 ve 7.5. metrelerden alınmıştır. Bu örneklere göre yapılan birikimli tane boyu dağılımları aşağıdaki çizelgede verilmiştir.

Çizelge 11. Birikimli elek altı yüzdeleri (Tesis-3)

	2. KAM 1	2. KAM 2	2. KAM 3	2. KAM 4	2. KAM 5	2. KAM 6	2. KAM 7	2. KAM 8
Tane Boyu (mm)	-Σ%	-Σ%	-Σ%	-Σ%	-Σ%	-Σ%	-Σ%	-Σ%
53,000	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
37,500	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
26,500	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
19,000	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
13,200	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
9,500	99,97	99,96	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
6,700	99,85	99,71	99,78	99,85	100,00	100,00	100,00	100,00
4,750	99,76	99,48	99,42	99,47	100,00	100,00	100,00	100,00
2,360	99,37	98,91	98,84	99,03	99,96	99,98	99,98	99,98
1,180	98,14	98,37	98,50	98,94	99,83	99,81	99,82	99,95
0,600	94,10	96,52	97,67	98,40	99,18	99,15	99,15	99,60
0,425	91,10	94,88	96,92	97,92	98,58	98,48	98,53	99,24
0,300	86,52	91,75	95,24	96,70	97,21	96,92	97,09	98,17
0,212	81,51	87,59	92,90	94,71	95,15	94,70	95,03	96,33
0,150	75,08	81,43	88,64	91,06	91,24	90,76	91,16	92,58
0,128	72,00	78,50	84,99	88,78	89,57	88,67	88,90	90,71
0,096	66,66	72,87	79,87	85,09	85,72	84,26	83,63	86,58
0,064	56,52	62,13	68,68	75,78	75,82	73,57	73,24	76,18
0,048	48,26	52,96	59,16	66,89	66,46	63,86	63,75	66,40
0,032	37,92	41,43	47,03	54,23	53,47	51,02	51,00	52,91
0,024	32,08	34,93	40,01	46,49	45,73	43,38	43,33	44,95
0,016	25,81	27,95	32,24	37,59	36,97	34,89	34,69	35,97
0,012	22,22	23,97	27,63	32,35	31,77	29,99	29,70	30,63
0,008	17,68	18,93	21,59	25,70	24,94	23,83	23,45	23,70
0,006	14,66	15,61	17,52	21,24	20,28	19,73	19,36	19,08
0,004	10,85	11,46	12,52	15,54	14,43	14,53	14,19	13,48
0,003	8,63	9,06	9,80	12,20	11,17	11,49	11,20	10,49
0,002	6,31	6,57	7,23	8,79	8,08	8,35	8,12	7,73
0,0015	5,19	5,35	6,10	7,18	6,75	6,87	6,65	6,55
0,001	4,07	4,14	5,02	5,67	5,52	5,47	5,24	5,44

Bu değerlere bağlı olarak birikimli elek altı eğrisi aşağıda gösterilmiştir.



Şekil 26. 2. Kamara içi birikimli elek altı eğrisi (Tesis-3)

Bu çalışmanın sonuçlar ve değerlendirme kısmında her bir örnek alma noktası için hesaplanan toplam eğri altı alanı, yukarıda verilen grafikteki noktalar arası eğri altı alanları hesaplanarak bulunmuştur.

#### 4.4 Tesis-4 (Değirmen-5) Örnek Alma ve Deneysel Çalışmaları

Tesiste bulunan 5. kapalı çimento öğütme devresi, ikinci nesil yüksek verimli havalı sınıflandırıcısı olan kapalı devre bilyalı değirmendir. Bilyalı değirmenin tasarım parametreleri aşağıda verilmiştir.

Çizelge 12. Bilyalı değirmen tasarım parametreleri (Tesis-4)

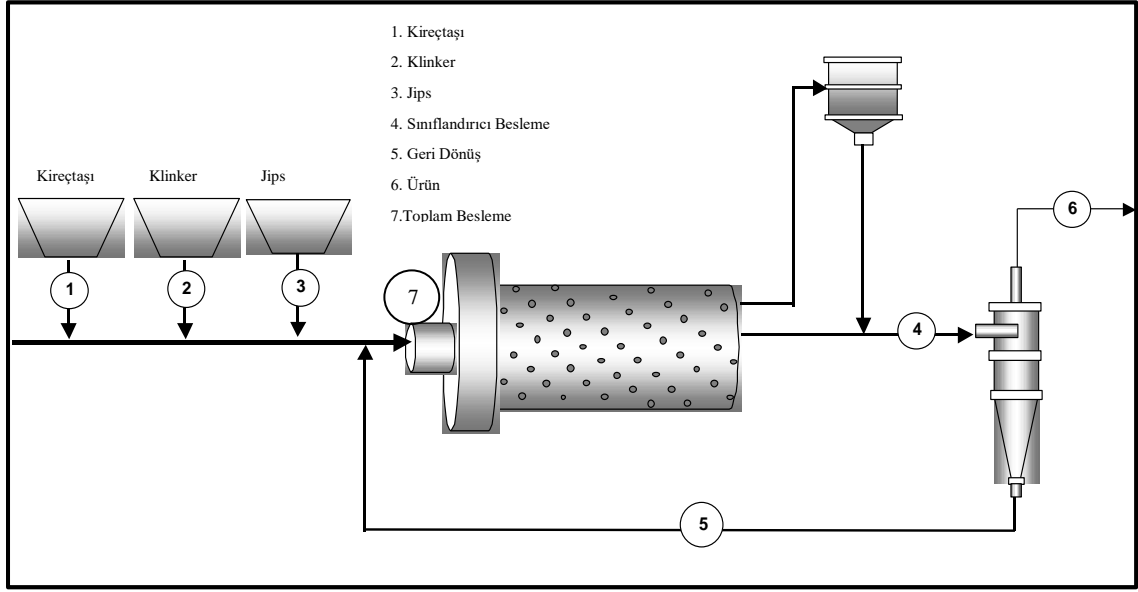
Değirmen Çapı (m)	4.6	
Değirmen Uzunluğu (m)	15	
Değirmen Gücü (kW)	4100	
Değirmen Devri (rpm)	15	
	Birinci Bölme	İkinci Bölme
Etkili Çap (m)	4.5	4.5
Etkili Uzunluk (m)	4.5	9.5
Bilya Boyu (mm)	90	60

Örnek alma çalışması değirmen sistem normal halde çalışırken gerçekleştirilmiştir. Alınan örneğin yüzey alanı öğütme yardımcıları ile 366m<sup>2</sup>/kg 'dır. Örnek alma esnasında değişen tüm değişkenler kontrol odasında kayıt altına alınmıştır. İşletmenin çalışma parametreleri aşağıdaki çizelgede verildiği gibidir.

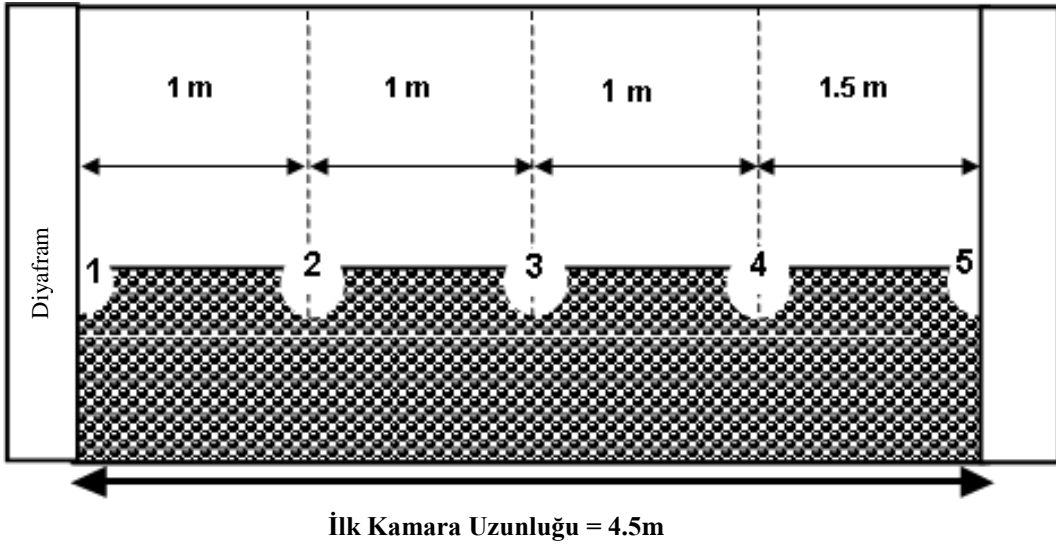
Çizelge 13. Değirmenin çalışma parametreleri (Tesis-4)

Klinker (t/sa)	97.2
Alçıtaşı (t/sa)	4.88
Kireçtaşı (t/sa)	5.85
Devreden Yük (t/sa)	197
Değirmen Gücü (kW)	3703
Elevatör Gücü (kW)	51
Seperatör Gücü (kW)	309
Seperatör Hızı (%)	69.4
Öğütme Yardımcıları (ml/t)	0

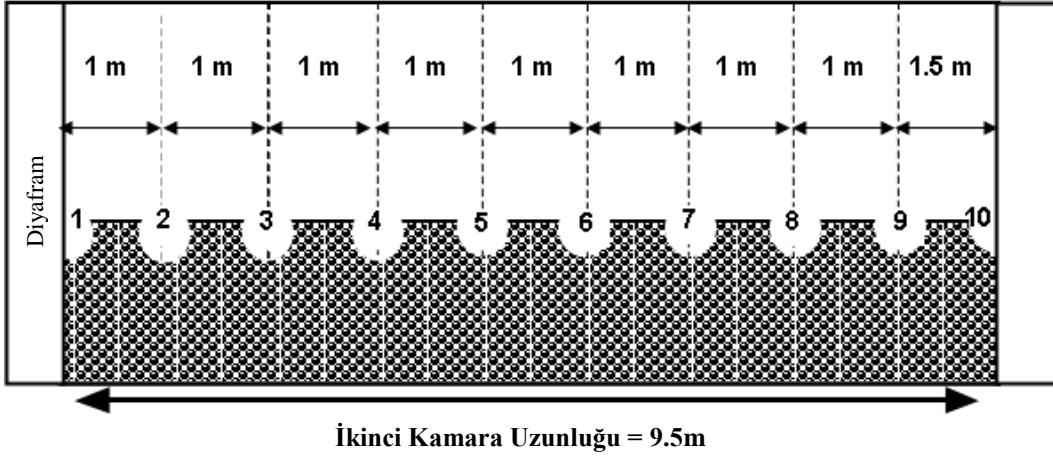
Devre çalışırken devre etrafındaki akışlardan örnekler alınmıştır. Devre gözlemleri tamamlandıktan sonra öğütme durdurularak değirmen içi örnekleme yapılmıştır. Tesisteki kapalı devre akış şeması ve değirmen boyunca belirlenen örnek alma noktaları aşağıda gösterilmiştir.



Şekil 27. Kapalı devre öğütme sistemi akış şeması (Tesis-4)

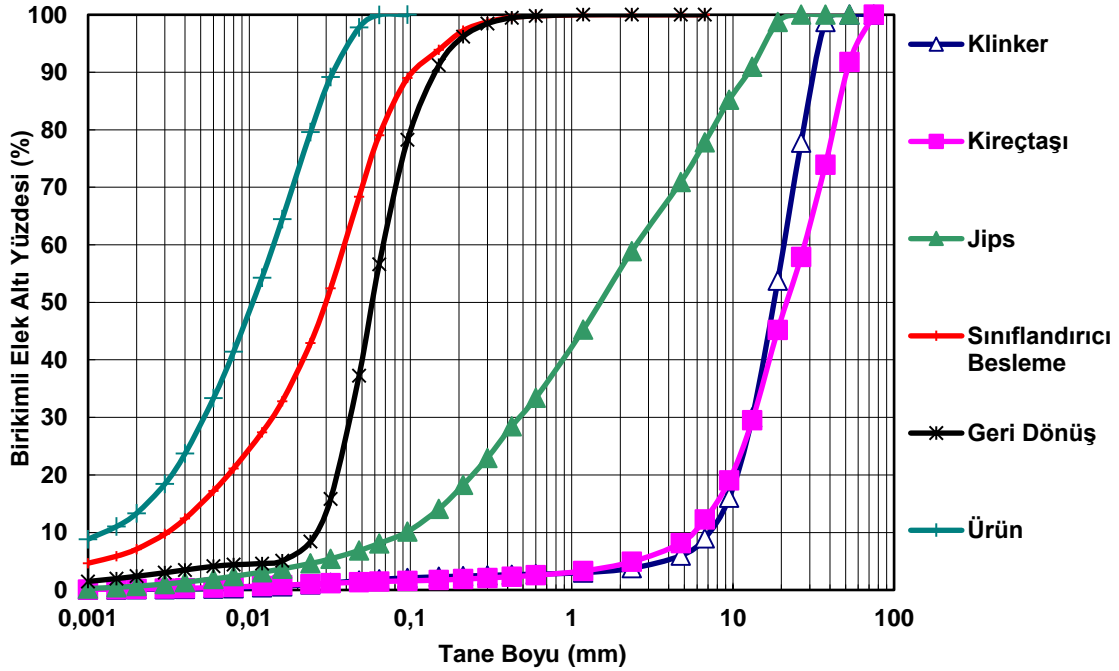


Şekil 28. Değirmen birinci kamarası örnek alma noktaları (Tesis-4)



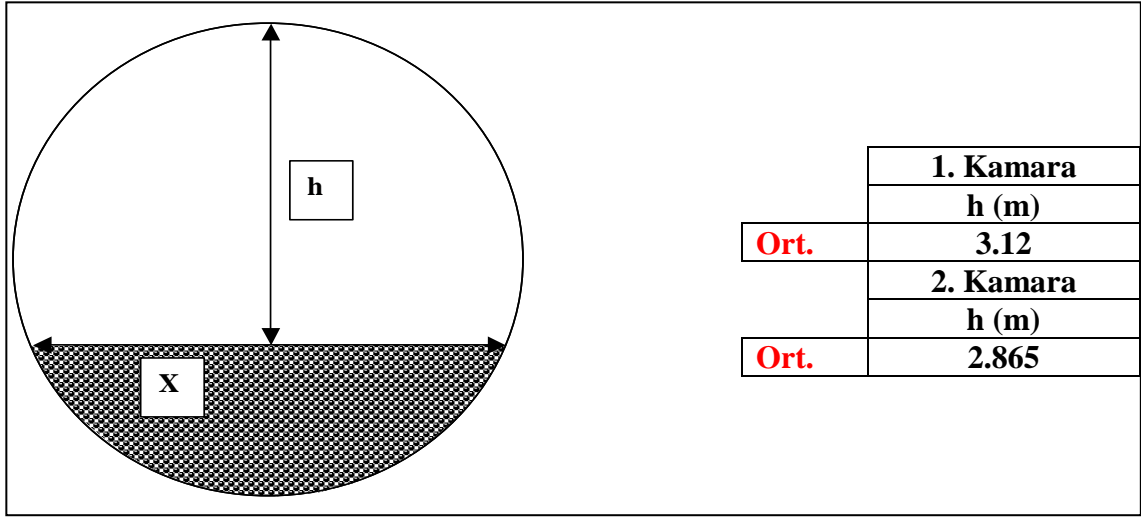
Şekil 29. Değirmen ikinci kamarası örnek alma noktaları (Tesis-4)

Çalışma esnasında alınan tüm örnekler 53mm den 153µm arasında elenmiştir. 153µm altındaki numuneler ise lazer tarayıcı kullanılarak tane boyuna göre sınıflandırılmıştır. Bu eleme ile akıştaki tane boyu birikmiş elek altı eğrisi aşağıda gösterilmiştir.



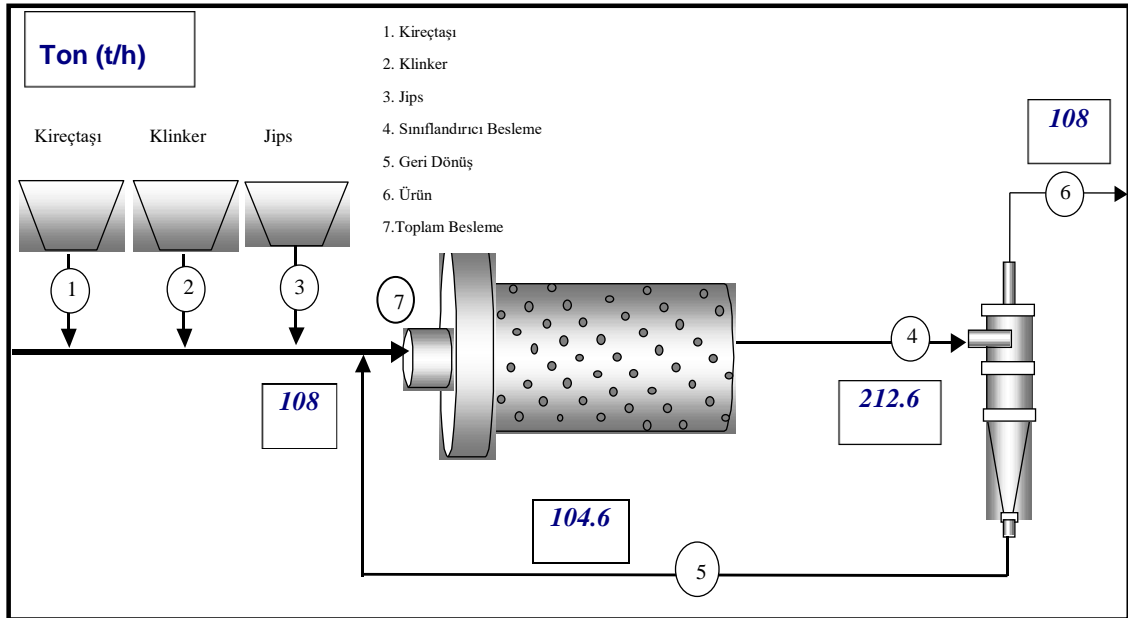
Şekil 30. Devre etrafı birikimli tane boyu dağılımı (Tesis-4)

Örnek alma sırasında hesaplanan değirmen içi ölçüleri aşağıdaki grafikte gösterilmiştir.



Şekil 31. Değirmen içi ölçüleri (Tesis-4)

Tesis-4'e ait devre etrafı madde denklığı aşağıdaki şekilde gösterilmiştir.



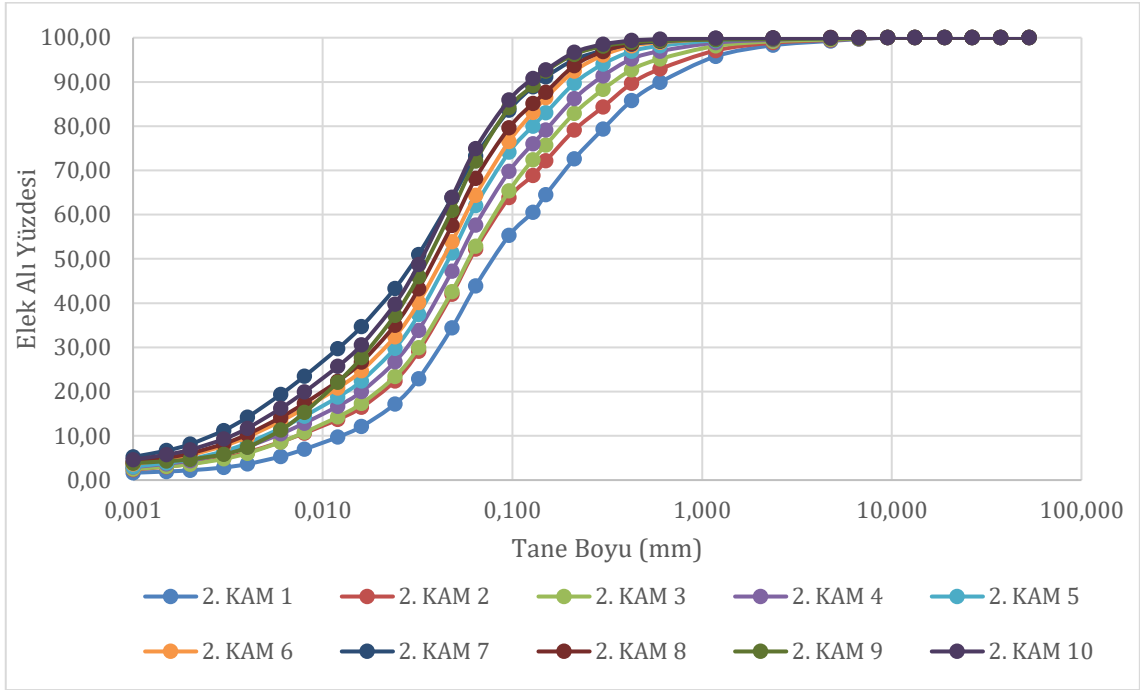
Şekil 32. Devre etrafı madde denklığı (Tesis-4)

Tesis-4 de bu çalışmaya konu örnekler kapalı devre sistem çalışan bir değirmenin 2. kamarasından alınmıştır. Tesis-4 içindeki 2. kamara uzunluğu 9.5m olup, örnekler; 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9.5. metrelerden alınmıştır. Bu örneklere göre yapılan birikimli tane boyu analizleri aşağıdaki çizelgede verilmiştir.

Çizelge 14. Birikimli elek altı yüzdeleri (Tesis-4)

Tane Boyu (mm)	2. KAM 1	2. KAM 2	2. KAM 3	2. KAM 4	2. KAM 5	2. KAM 6	2. KAM 7	2. KAM 8	2. KAM 9	2. KAM 10
	-Σ%	-Σ%	-Σ%	-Σ%	-Σ%	-Σ%	-Σ%	-Σ%	-Σ%	-Σ%
53,000	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
37,500	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
26,500	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
19,000	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
13,200	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
9,500	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
6,700	99,66	99,75	99,82	100,00	99,95	99,98	100,00	100,00	99,85	99,95
4,750	99,26	99,48	99,59	99,89	99,91	99,95	100,00	100,00	99,82	99,95
2,360	98,27	98,86	99,18	99,52	99,78	99,91	99,98	99,89	99,66	99,91
1,180	95,78	97,10	98,12	98,88	99,41	99,72	99,82	99,84	99,56	99,88
0,600	89,93	92,92	95,19	96,95	98,16	98,95	99,15	99,34	99,29	99,65
0,425	85,76	89,66	92,75	95,20	96,90	98,13	98,53	98,68	98,97	99,35
0,300	79,35	84,34	88,28	91,34	94,02	96,03	97,09	96,88	98,07	98,49
0,212	72,60	79,12	82,91	86,25	89,70	92,43	95,03	93,70	96,22	96,70
0,150	64,51	72,14	75,75	79,13	83,00	86,41	91,16	87,66	92,41	92,75
0,128	60,52	68,84	72,40	76,00	80,00	83,10	88,90	85,10	89,19	90,80
0,096	55,29	63,86	65,36	69,76	74,12	76,53	83,63	79,62	84,18	85,91
0,064	43,88	52,23	52,89	57,65	62,07	64,39	73,24	68,23	72,13	74,94
0,048	34,40	42,00	42,60	47,18	51,36	53,89	63,75	57,53	60,93	63,92
0,032	22,91	29,09	29,95	33,85	37,41	40,11	51,00	43,22	45,98	48,71
0,024	17,17	22,40	23,38	26,71	29,77	32,40	43,33	35,00	37,23	39,78
0,016	12,11	16,44	17,29	19,99	22,42	24,71	34,69	26,64	27,66	30,54
0,012	9,72	13,70	14,29	16,70	18,76	20,80	29,70	22,35	22,11	25,69
0,008	6,97	10,60	10,79	12,87	14,46	16,22	23,45	17,34	15,28	19,90
0,006	5,33	8,64	8,58	10,43	11,70	13,31	19,36	14,18	11,29	16,20
0,004	3,61	6,26	6,05	7,51	8,35	9,74	14,19	10,33	7,40	11,71
0,003	2,84	4,96	4,77	5,93	6,52	7,72	11,20	8,19	5,82	9,26
0,002	2,21	3,67	3,59	4,40	4,71	5,65	8,12	6,04	4,69	6,85
0,0015	1,94	3,03	3,05	3,67	3,88	4,64	6,65	5,02	4,27	5,73
0,001	1,65	2,36	2,48	2,92	3,03	3,62	5,24	4,00	3,81	4,61

Bu değerlere bağlı olarak birikimli elek altı eğrisi aşağıda gösterilmiştir.



Şekil 33.2. Kamara içi birikimli elek altı eğrisi (Tesis-4)

Bu çalışmanın sonuçlar ve değerlendirme kısmında her bir örnek alma noktası için hesaplanan toplam eğri altı alanı, yukarıda verilen grafikteki noktalar arası eğri altı alanları hesaplanarak bulunmuştur.

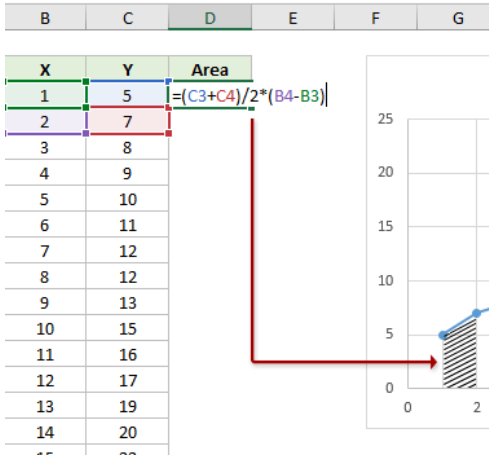


## 5. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME

Bu çalışmaya konu olan 4 farklı testisten alınan numunelerin elek analizlerinde farklı tek parametrelili incelik indeksleri kullanılarak değirmen boyunca meydana gelen boyut küçültmenin sistematığı ortaya konulmuştur. Değerlendirmeye konu olan veriler, devre etrafında; toplam beslemeden ve sınıflandırıcı beslemeden alınmış olup değirmen içinde ise belli aralıklar alınmıştır. Toplanan veriler aşağıda belirtildiği şekilde sırasıyla işlenmiştir.

Toplanan örnekler 53mm ile 153mm arasında eleklerle elenmiş olup, 153mm altı lazer yardımıyla elenerek elenen örneklere ait birikimli elek altı değerleri tespit edilmiştir. Deneysel çalışmalarda eleme sonucu elde edilen birikimli elek altı değerleri kullanılmıştır.

Öncelikle birikimli elek altı eğrisi altında kalan alan hesabı, her bir elek açıklığı için geometrik alan formülleri kullanılarak yapılmıştır.



Şekil 34. Eğri altında kana alan hesabı

İstatiksel entropi değerleri ise birikimli elek altı değerlerinin kendi logaritmik değeri ile çarpılmasıyla hesaplanmıştır.

Pano		Yazı Tipi						
ORTALAMA		=B3*LOG10(B3)						
A	B	X	Y	Z	AA	AB	AC	AD
Tane Boyu (mm)	2. KAM 1	2. KAM 1	2. KAM 2	2. KAM 3	2. KAM 4	2. KAM 5	2. KAM 6	2. KAM 7
1		Entropi Değerleri	Entropi Değerleri	Entropi Değerleri	Entropi Değerleri	Entropi Değerleri	Entropi Değerleri	Entropi Değerleri
2	-Σ%	200,0	200,0	200,0	200,0	200,0	200,0	200,0
3	53,000	100,00	200,0	200,0	200,0	200,0	200,0	200,0
4	37,500	100,00	200,0	200,0	200,0	200,0	200,0	200,0
5	26,500	100,00	200,0	200,0	200,0	200,0	200,0	200,0
6	19,000	100,00	200,0	200,0	200,0	200,0	200,0	200,0
7	13,200	100,00	200,0	200,0	200,0	200,0	200,0	200,0

Şekil 35. Entropi değeri hesabında izlenen yöntem

Her bir örnek noktası için buradan elde edilen toplam entropi değeri toplam alan değeri ile ilişkilendirilerek aradaki ilişki değerlendirilmiştir. Bu ilişkiye malzemenin %50 sinin geçtiği d50 indeksi de eklenerek incelik indeksi ile alan-entropi arasındaki ilişki gösterilmiştir.

Birikimli elek altı eğrilerinde her bir nokta için d<sub>10</sub>, d<sub>30</sub>, d<sub>50</sub>, d<sub>60</sub>, d<sub>80</sub> ve d<sub>90</sub> değerleri tespit edilmiştir. Tespit edilen bu değerler ile örnek mesafesi arasındaki ilişki ortaya çıkarılmıştır. Ayrıca, 10, 30, 45, 50, 60, 80 ve 90 µm boyutunun altına geçen malzeme yüzdesi de her bir nokta için tespit edilmiş ve örnek mesafesi ile ilişkilendirilmiştir.

Tek parametrelilik incelik indeksleri kullanılarak Kick ve Bond yasaları ile her bir indeks için Kick değerleri ve Bond değerleri bulunmuştur. Bulunan bu değerler hem kendi içlerinde örnekleme mesafesi ile hem de birbirleriyle karşılaştırılarak aralarındaki ilişki ortaya çıkarılmıştır.

Hizalama		Sayı				
fx =LOG10(I6/J6)						
H	I	J	V	W	X	Y
			KICK			
	0	1,5	E <sub>1</sub>	E <sub>2</sub>	E <sub>3</sub>	E <sub>4</sub>
30	9	7,5	=LOG10(I6)	-0,023	0,078	0,104

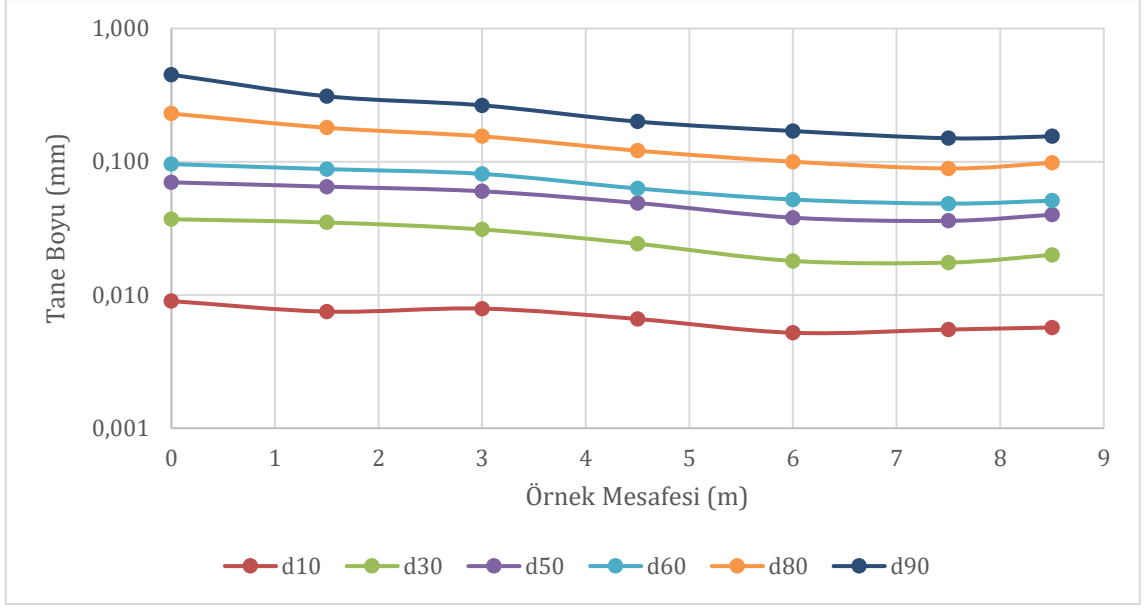
Şekil 36. Enerji hesaplamalarında izlenen yöntem

Bu çalışmada hesaplanan istatistiksel entropi değerlerinde k sabiti ile enerji hesaplamalarında bulunan formül katsayılarının tamamı 1 olarak kabul edilmiştir.

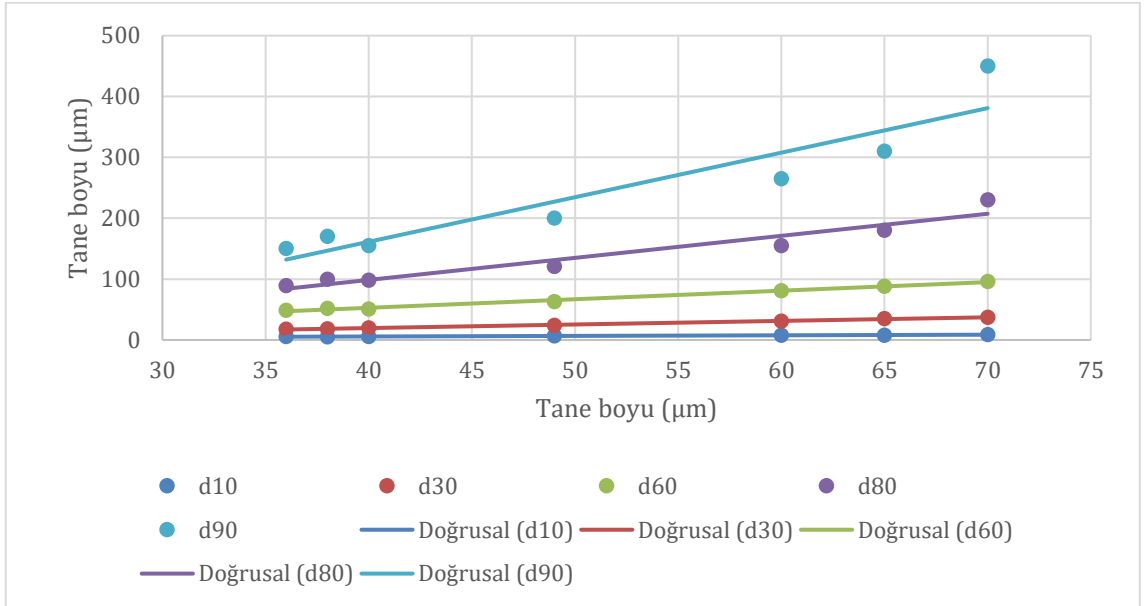
Ayrıca devre etrafından değirmen besleme ve havalı sınıflandırıcı indeksleri de değirmen içi verilerine eklenerek değirmen devresi enerji ilişkilerinin de doğrusalığı sorgulanmıştır.

### 5.1 Tesis-1 Sonuçları ve Değerlendirmesi

Birikimli elek altı değerlerine bakılarak tespit edilen  $d_{10}$ ,  $d_{30}$ ,  $d_{50}$ ,  $d_{60}$ ,  $d_{80}$  ve  $d_{90}$  incelik indeksleri ve örnek alma mesafesi arasında kurulan ilişki ile aşağıdaki grafik elde edilmiştir. Örnek alma mesafesi arttıkça öğütme gerçekleşmekte ve belirlenen indekslerdeki tane boyu incelmektedir.

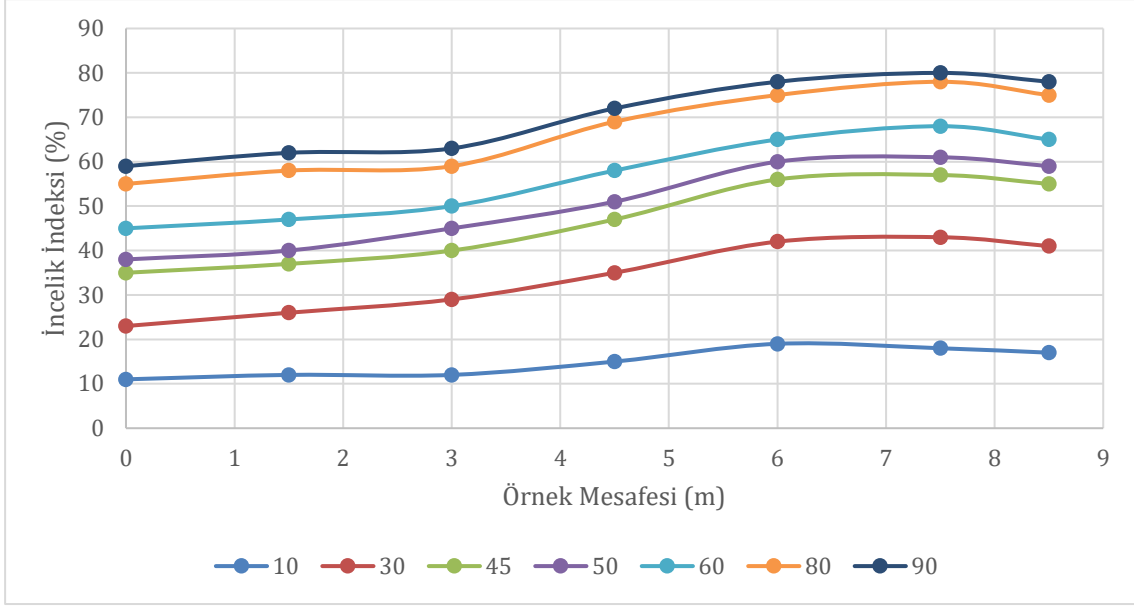


Şekil 37. Örnek mesafesi ve tespit edilen incelik indeksleri arasındaki ilişki (Tesis-1)



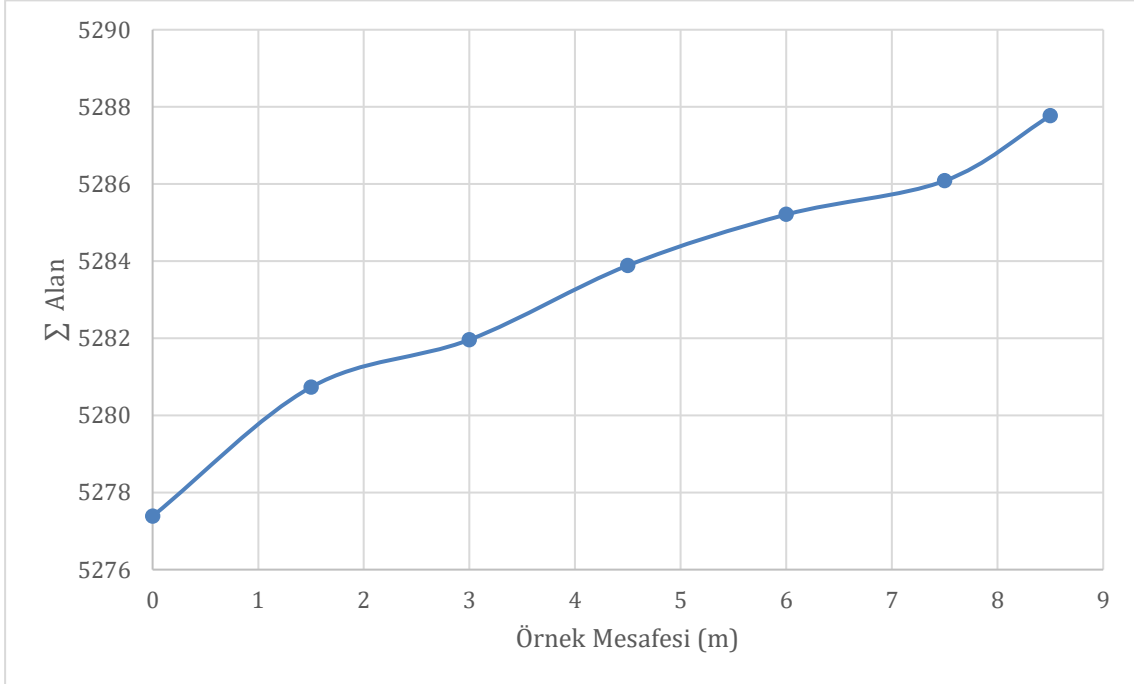
Şekil 38. D<sub>50</sub> ile diğer tek parametrelilik incelik indeksleri arasındaki ilişki (Tesis-1)

Tek parametrelilik indekslerin birbiriyle olan doğrusal ilişkisi gösterildikten sonra, aşağıdaki grafikte; 10, 30, 45, 50, 60, 80 ve 90 µm boyutunun altına geçen malzeme yüzdesi olan tek parametrelilik indeks değeri tespit edilerek örnek mesafesi ile ilişkilerine bakılmıştır.

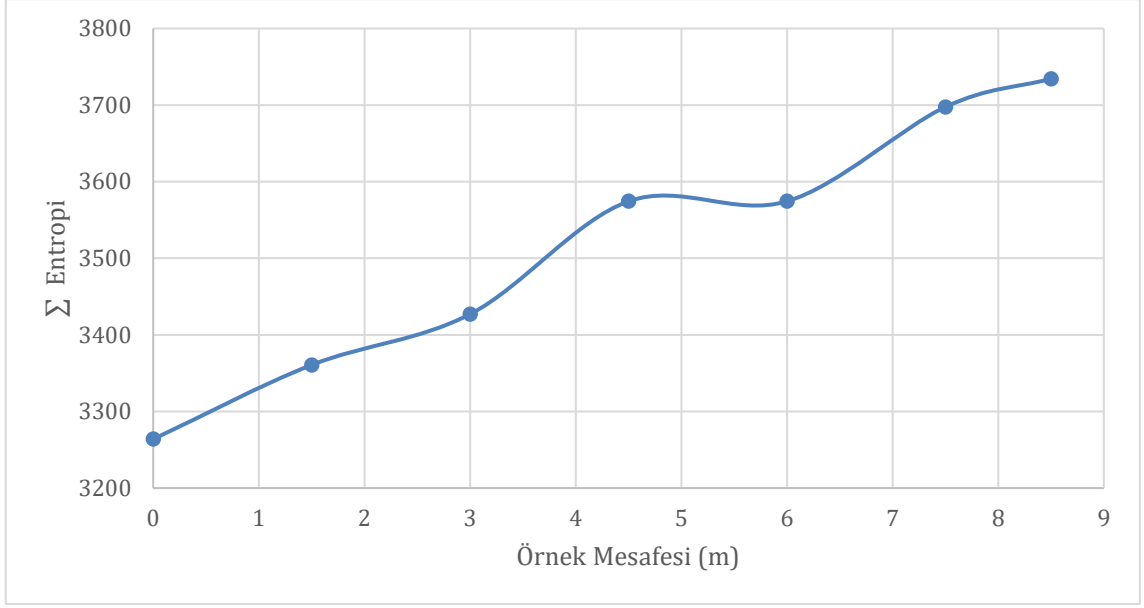


Şekil 39. 10, 30, 45, 50, 60, 80 ve 90  $\mu\text{m}$  boyutunun altına geçen malzeme yüzdesi ile örnek mesafesi arasındaki ilişki (Tesis-1)

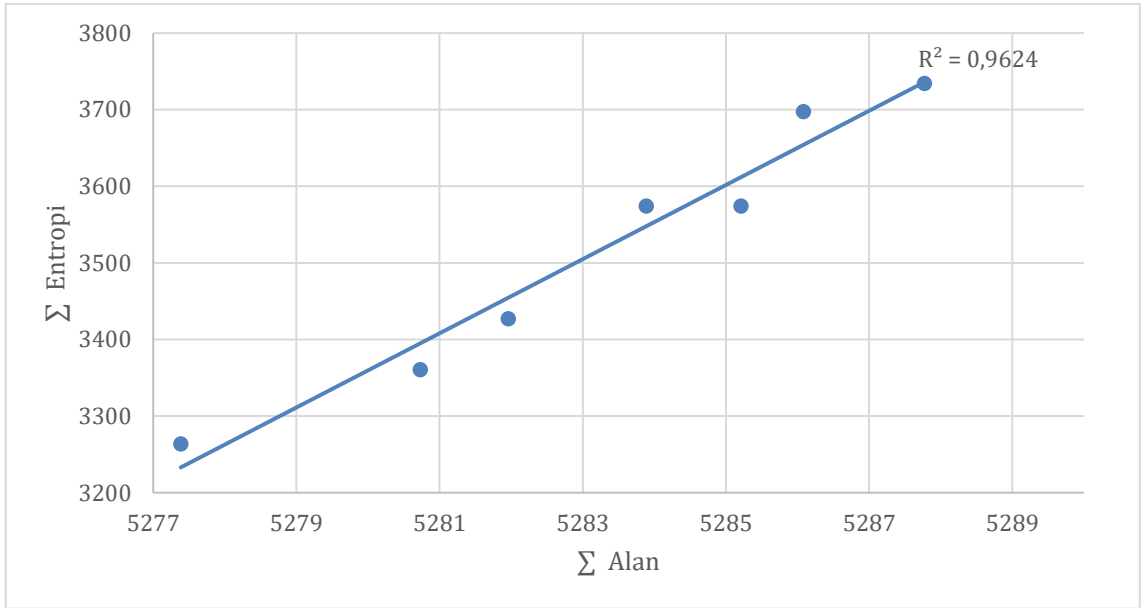
Birikimli elek altı eğrisinin altında kalan alan ile toplam entropi değerleri örnek mesafesi ile ilişkilendirilerek 2. kamara boyunca hesaplanan toplam alan ve toplam entropi değerlerinde meydana gelen değişim aşağıdaki grafiklerde gösterilmiştir.



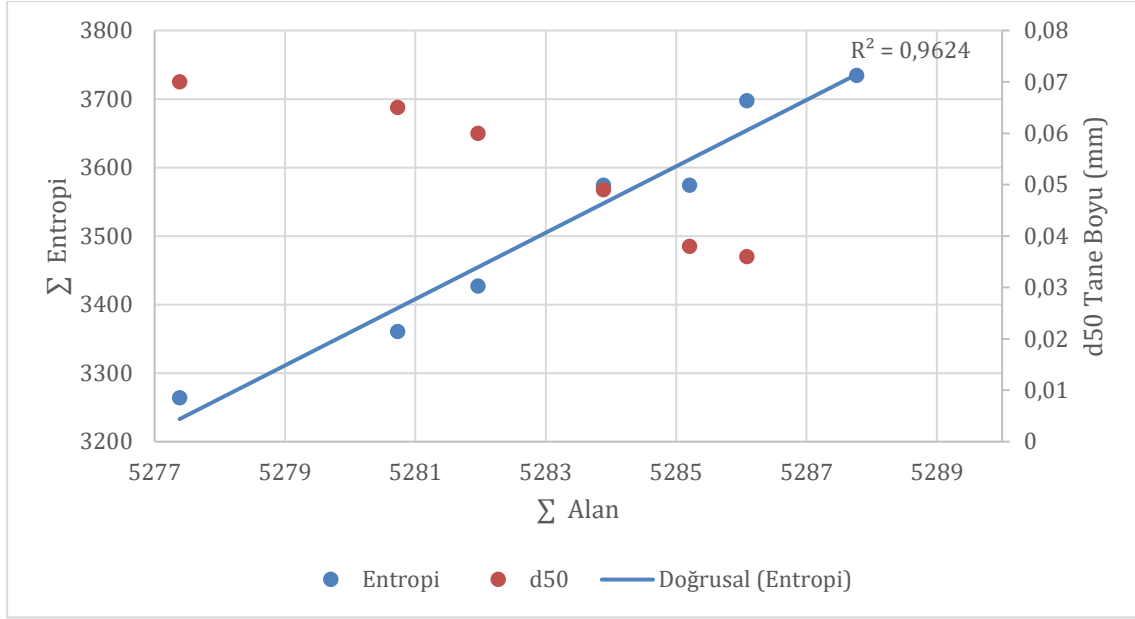
Şekil 40.  $\Sigma$  Alan-Örnek mesafesi (Tesis-1)



Şekil 41. Σ Entropi-Örnek mesafesi (Tesis-1)



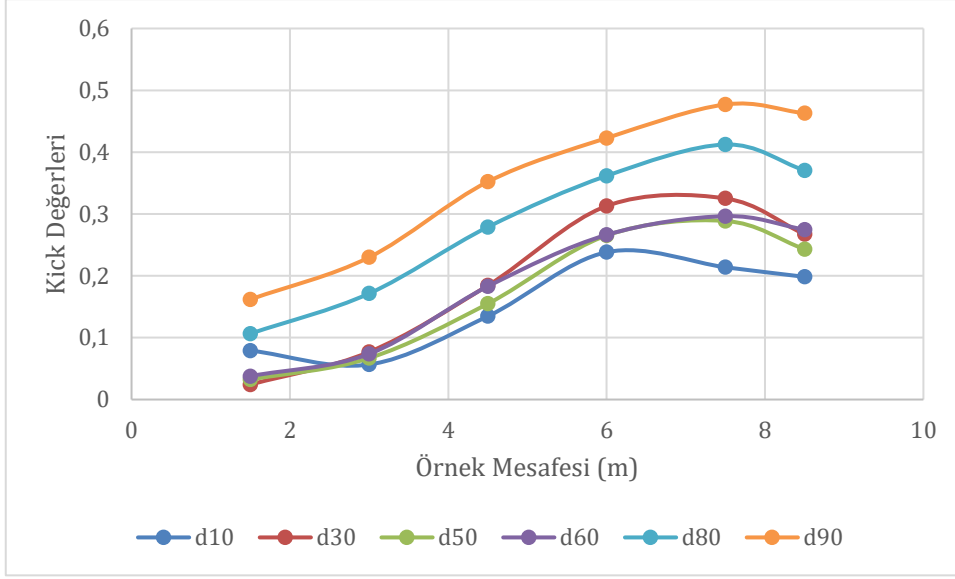
Şekil 42. Σ Entropi ve Σ Alan (Tesis-1)



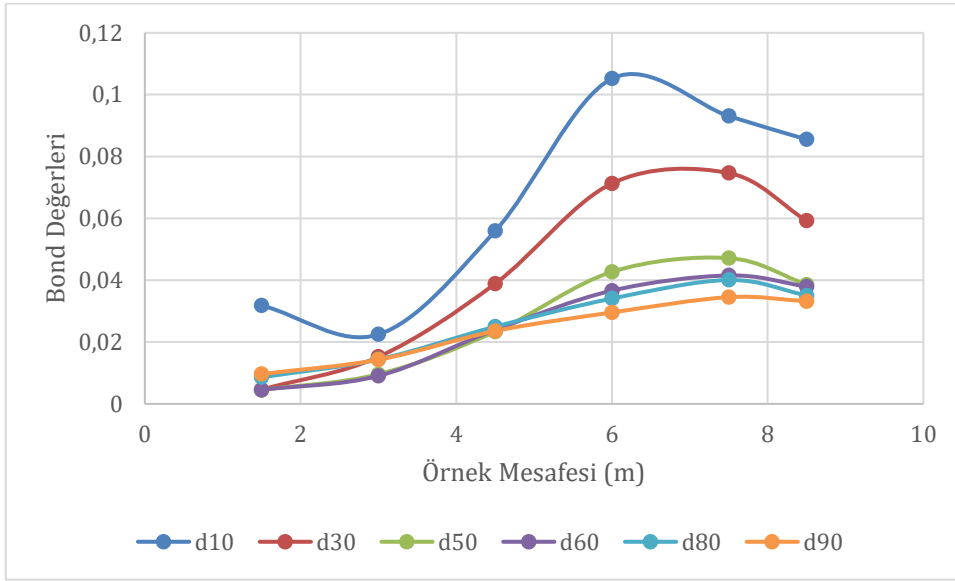
Şekil 43.  $\Sigma$  Alan  $\Sigma$  Entropi ve d50 arasındaki ilişki (Tesis-1)

2. Kamara boyunca elde edilen verilerde toplam alan ve toplam entropi değerleri arasında doğrusal bir ilişkinin olduğu görülmektedir.

Birikimli elek altı değerleri ile elde edilen  $d_{10}$ ,  $d_{30}$ ,  $d_{50}$ ,  $d_{60}$ ,  $d_{80}$  ve  $d_{90}$  değerleri ile Kick ve Bond formülleri kullanılarak Kick ve Bond 'a göre örnek alma noktalarındaki öğütme enerjileri hesaplanmıştır. Her bir tek parametrelili incelik indeksi için elde edilen enerji değerlerinin örnek mesafesi ile ilişkisi aşağıdaki grafiklerde gösterilmiştir.  $D_{10}$  ve  $d_{30}$  değerlerinde oluşan beklenmedik değişimler, 2. kamara boyunca yaşanan birikmeler nedeniyle olduğu yorumlanmaktadır.



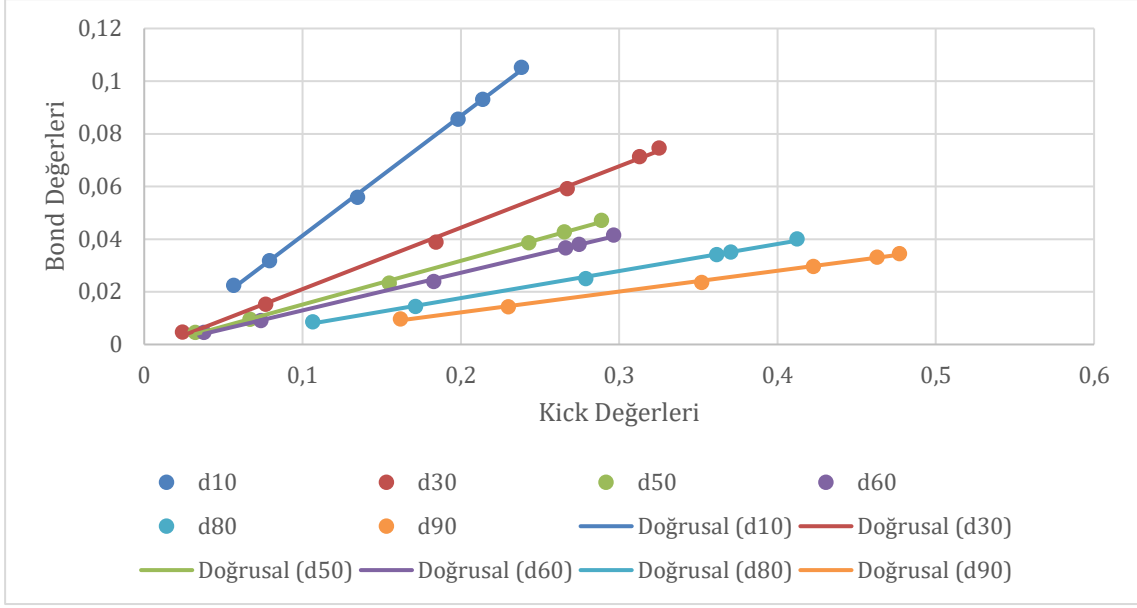
Şekil 44. Kick yasasına göre farklı incelik indeksleri kullanılarak hesaplanan öğütme enerjisinin 2. kamara boyunca değişimi (Tesis-1)



Şekil 45. Bond yasasına göre farklı incelik indeksleri kullanılarak hesaplanan öğütme enerjisinin 2. kamara boyunca değişimi (Tesis-1)

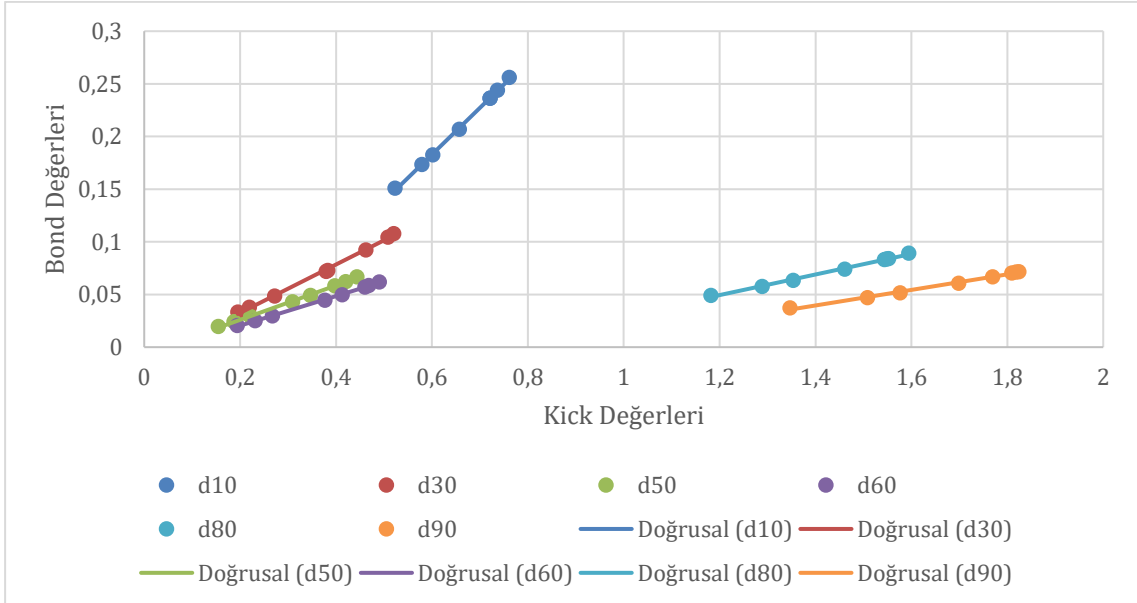
Değirmen içinde 2. kamara boyunca alınan örneklerle belirlenen tek parametrelili incelik indeksleri kullanılarak hesaplanan Kick ve Bond değerlerinin birbirleriyle olan ilişkisi aşağıdaki grafikte değerlendirilmiştir.



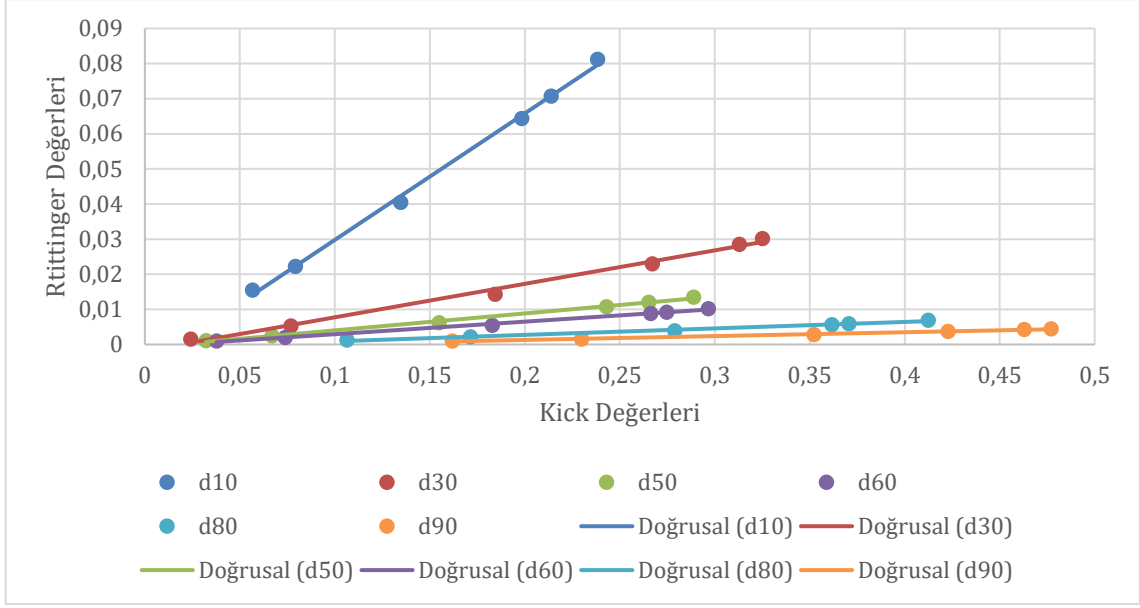


Şekil 46. Kick ve Bond enerji değerlerinin karşılaştırılması (Tesis-1)

Devre etrafındaki enerji değişimini daha geniş bir açı ile görebilmek için toplam besleme değerleri temel alınarak, toplam besleme, değirmen içi ve sınıflandırıcı besleme değerlerindeki enerji değişimi ortaya konulmuştur. Bu enerji ilişkilerinde değirmen çevresindeki değerlerin eklenmesi durumunda da ilişkilerin dağılım şeklini koruduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 47. Kick-Bond ilişkisi (Devre etrafı akışlar dahil) (Tesis-1)



Şekil 48. Rittinger-Kick enerji değerlerinin karşılaştırılması (Tesis-1)

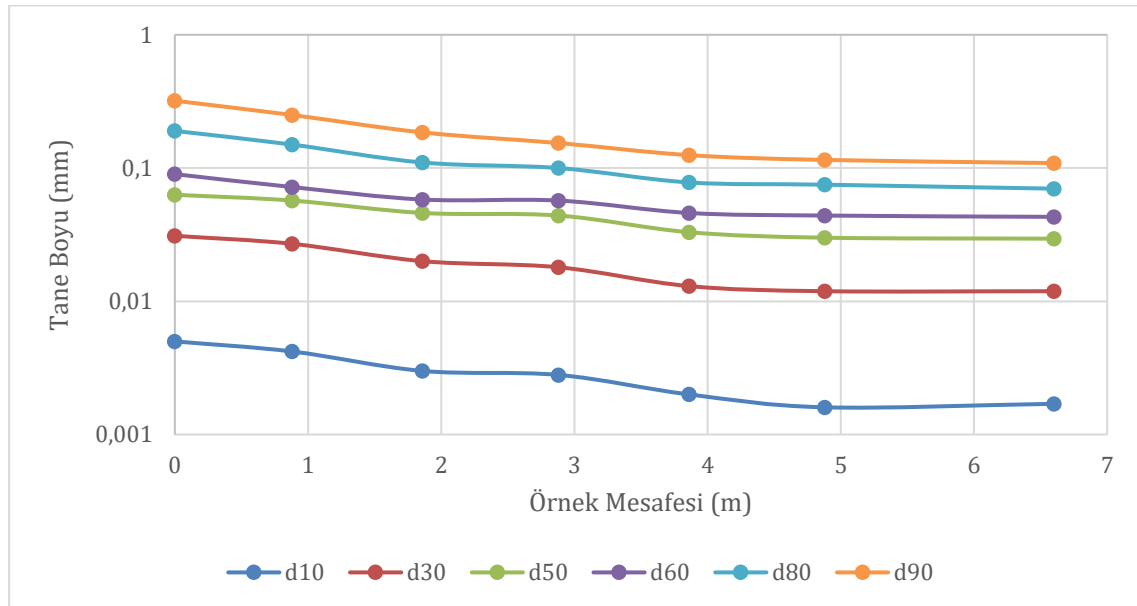
Tesis-1 verilerinde yapılan veri analizlerinde aşağıdaki değerlendirmeler yapılabilir;

- Bu çalışma kapsamında örnek mesafesi ile tek parametrelilikte incelik indeksleri arasındaki ilişki ortaya konularak öğütmenin kinetiği ortaya konulmuştur. Bu kinetikte 0-3 metre arasında öğütmenin yavaş, 3-6 metreler arasında öğütmenin hızlı olduğu, 6. metreden sonra ise değirmenin özellikle düşük indekslerde işlevsizleştiği gözlemlenmiştir.
- Malzemenin %50 'sinin geçtiği elek boyu ( $d_{50}$ ) değerleri ile  $d_{10}$ ,  $d_{30}$ ,  $d_{60}$ ,  $d_{80}$  ve  $d_{90}$  değerleri arasındaki ilişkinin doğrusal olduğu tespit edilmiştir. Dolayısıyla öğütme parametrelerinin değerlendirilmesi yapılırken her hangi bir incelik indeksi temel alınarak değerlendirmelerin yapılabileceği görülmektedir.
- 10, 30, 45, 50, 60, 80 ve 90  $\mu\text{m}$  boyutunun altına geçen malzeme yüzdesi ile örnek mesafesi değerlendirildiğinde değirmenin 6. metresinden sonra değirmen içindeki birikimlerden dolayı incelik indeksi değerlerinin düştüğü gözlemlenmiştir.
- Birikimli elek altı eğrisi altında kalan alan ile istatistiksel entropi değerlerinin örnekleme mesafesi ile ilişkileri gösterilmiş olup, alan ve entropi değerlerinin birbiriyle ilişkisinin doğrusal olduğu gözlemlenmiştir.

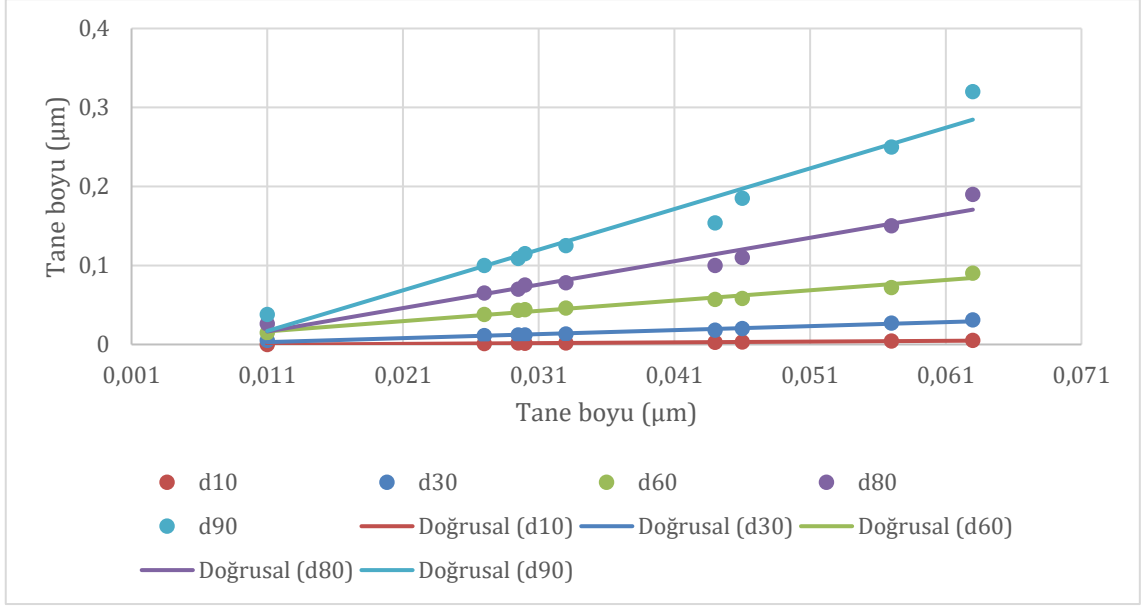
- Kick ve Bond yasaları ile incelik indeksi değerleri karşılaştırıldığında incelik indekslerinin tümünün enerji ilişkilerinde kullanılabileceği anlaşılmaktadır. Kick ve Bond enerji ilişkilerinde değirmen içi verilerine ek olarak devre etrafı (toplam besleme ve sınıflandırıcı besleme) akışları eklendiğinde de bu doğrusallığın korunduğu gözlenmiştir.
- Kick ve Bond değerlerinin mesafe ile olan ilişkisine bakıldığında, Tesis-1 için 6 metreye kadar enerji değerlerinin arttığı, 6 metreden sonra ise artışın azaldığı gözlemlenmiştir. Bu durumda 6. metreden sonra enerji tüketiminin boyut küçültmeye etkisinin azaldığı söylenebilir.

## 5.2 Tesis-2 Sonuçları ve Değerlendirmesi

Birikimli elek altı değerlerine bakılarak tespit edilen  $d_{10}$ ,  $d_{30}$ ,  $d_{50}$ ,  $d_{60}$ ,  $d_{80}$  ve  $d_{90}$  incelik indeksleri ve örnek alma mesafesi arasında kurulan ilişki ile aşağıdaki grafik elde edilmiştir. Örnek alma mesafesi arttıkça öğütme gerçekleşmekte ve belirlenen indekslerdeki tane boyu incelmektedir.

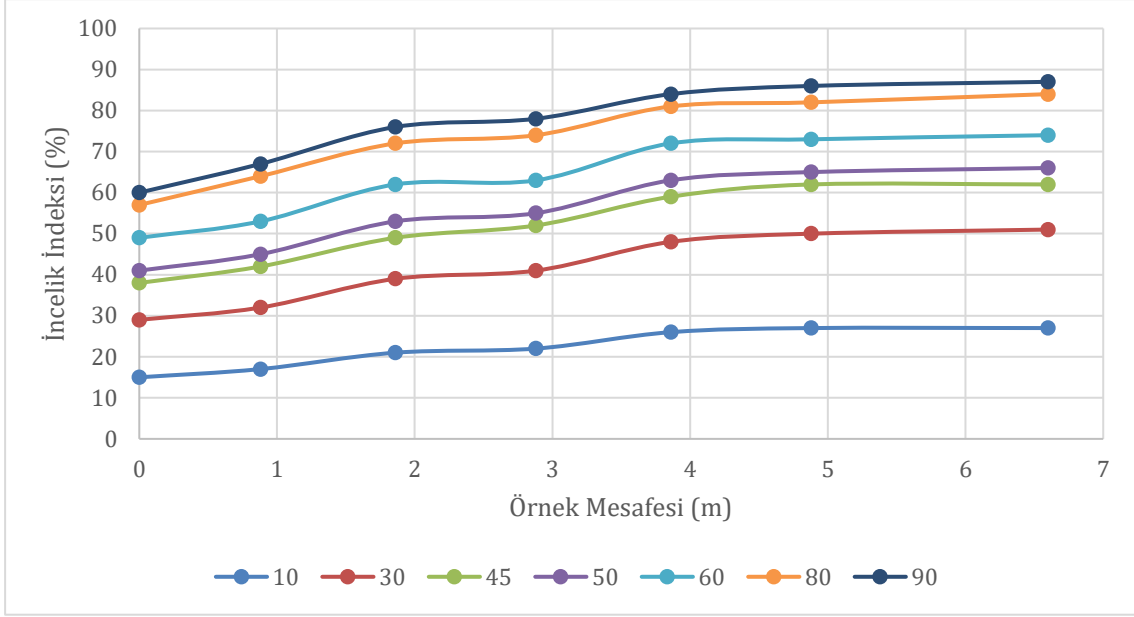


Şekil 49. Örnek mesafesi ve tespit edilen incelik indeksleri arasındaki ilişki (Tesis-2)

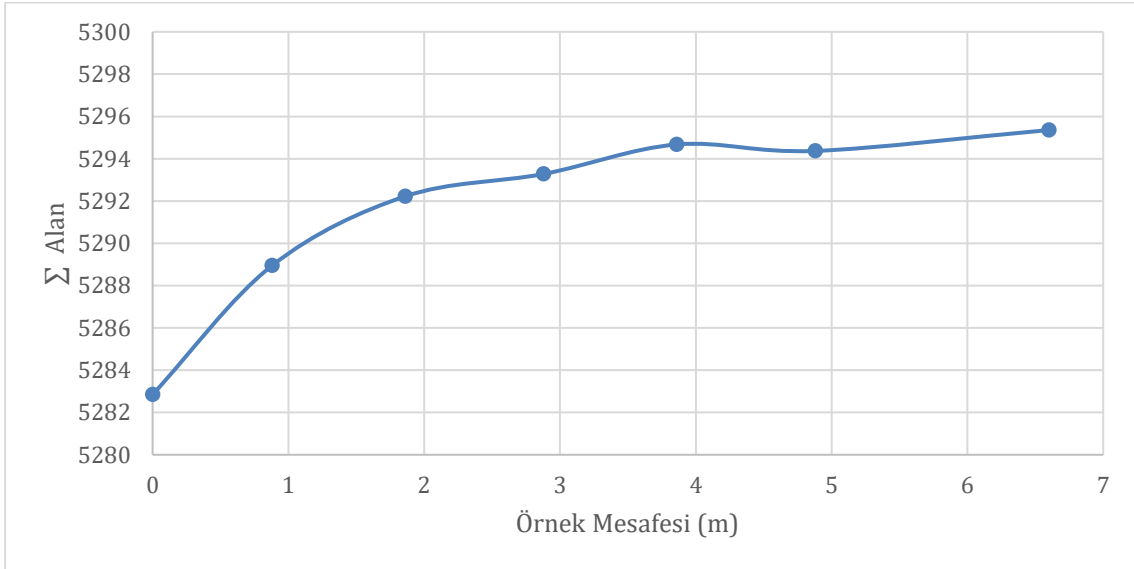


Şekil 50. D50 ile diğer tek parametrelili incelik indeksleri arasındaki ilişki (Tesis-2)

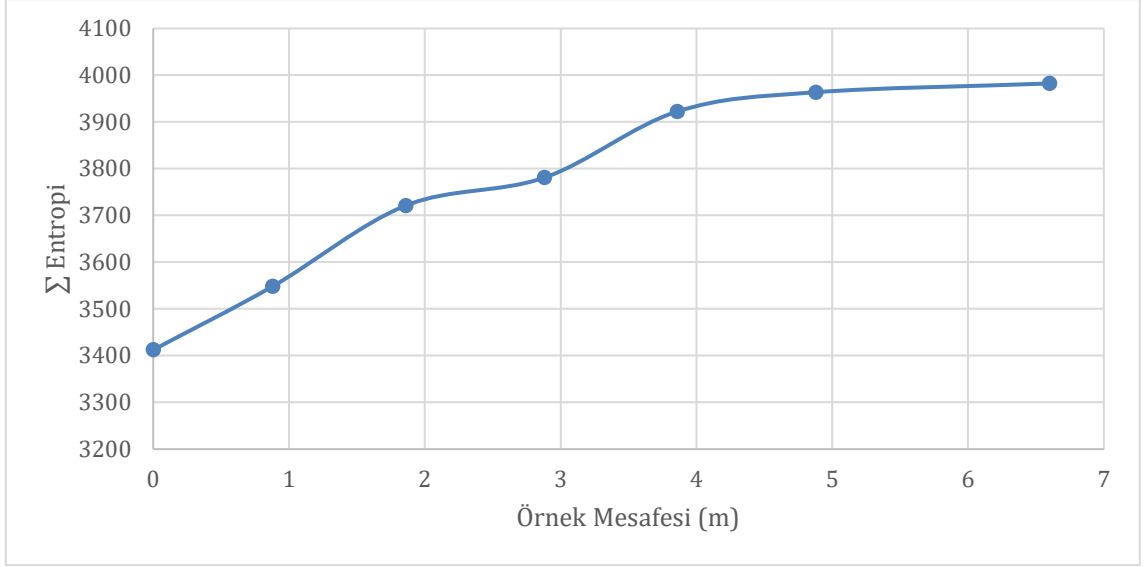
Tek parametrelili indekslerin birbiriyle olan doğrusal ilişkisi gösterildikten sonra, aşağıdaki grafikte; 10, 30, 45, 50, 60, 80 ve 90 µm boyutunun altına geçen malzeme yüzdesi olan tek parametrelili indeks değerleri tespit edilerek, örnek mesafesi ile ilişkilerine bakılmıştır. Görüldüğü gibi malzemenin geçtiği elek aralığı sabit olmasına rağmen değirmen sonuna doğru gidildikçe belirlenen elek değerleri altında kalan malzeme miktarı artmaktadır.



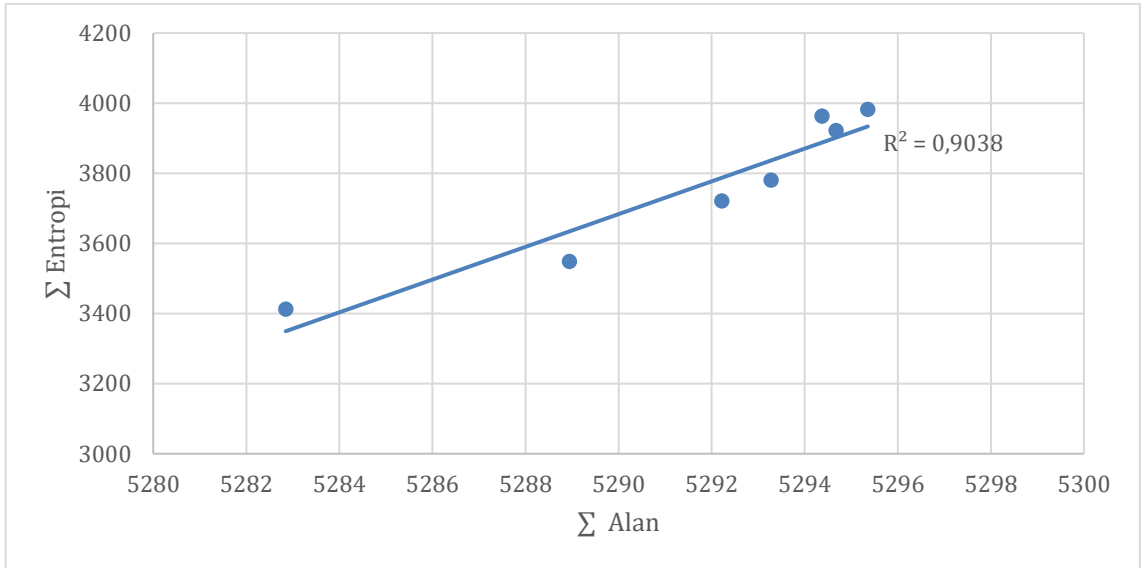
Şekil 51. 10, 30, 45, 50, 60, 80 ve 90  $\mu\text{m}$  boyutunun altına geçen malzeme yüzdesi ile örnek mesafesi arasındaki ilişki (Tesis-2)



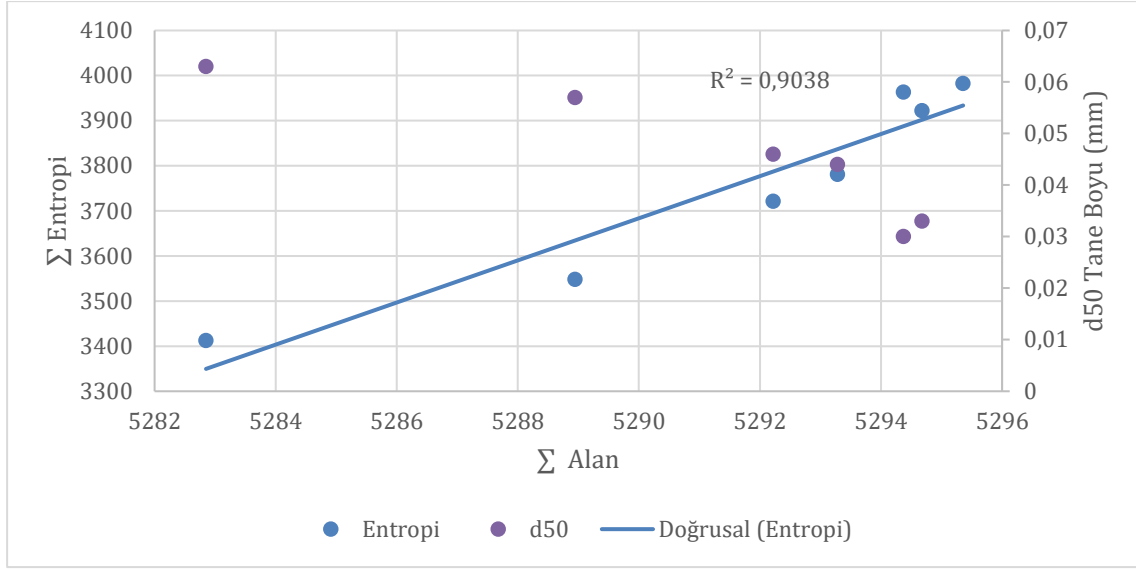
Şekil 52.  $\Sigma$  Alan-Örnek mesafesi (Tesis-2)



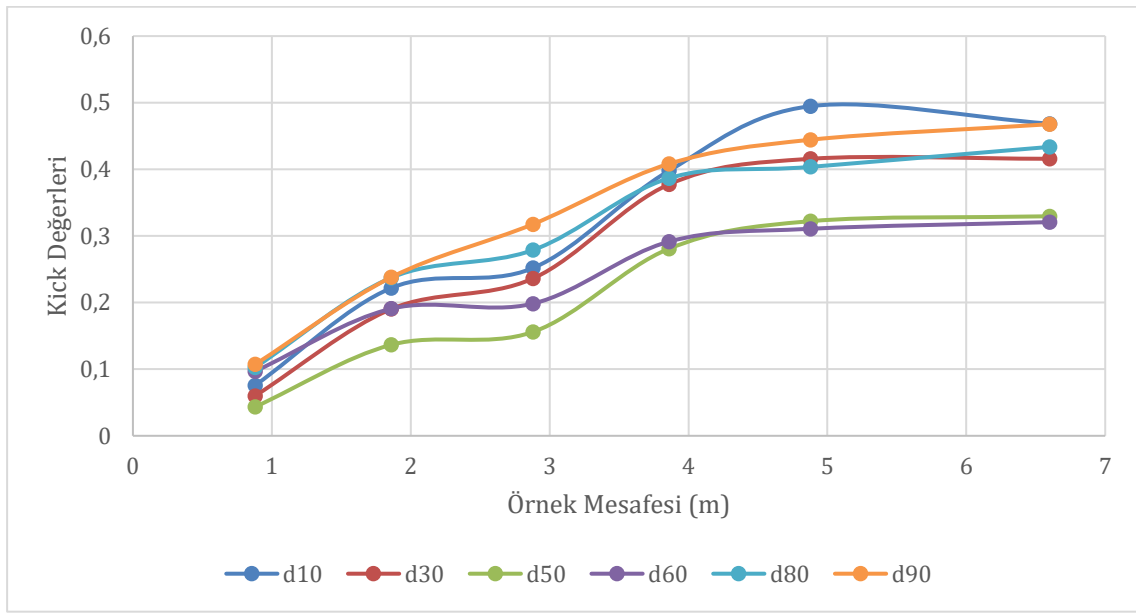
Şekil 53. Σ Entropi-Örnek mesafesi (Tesis-2)



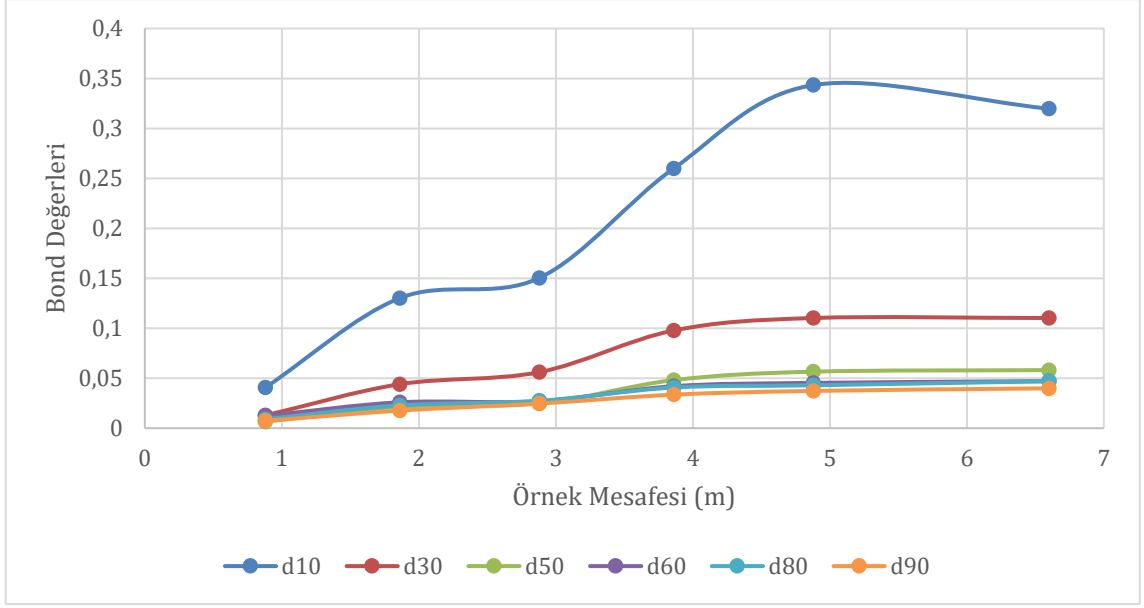
Şekil 54. Σ Entropi ve Σ Alan (Tesis-2)



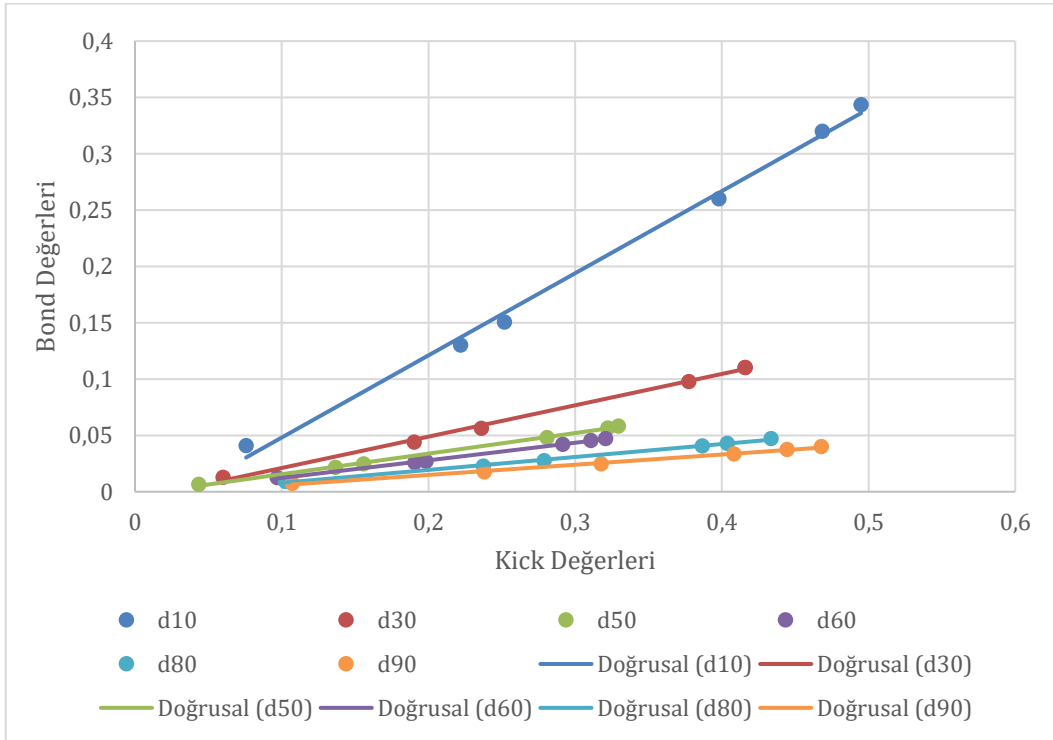
Şekil 55.  $\Sigma$  Alan  $\Sigma$  Entropi ve d50 arasındaki ilişki (Tesis-2)



Şekil 56. Kick yasasına göre farklı incelik indeksleri kullanılarak hesaplanan öğütme enerjisinin 2. kamara boyunca değişimi (Tesis-2)



Şekil 57. Bond yasasına göre farklı incelik indeksleri kullanılarak hesaplanan öğütme enerjisinin 2. kamara boyunca değişimi (Tesis-2)

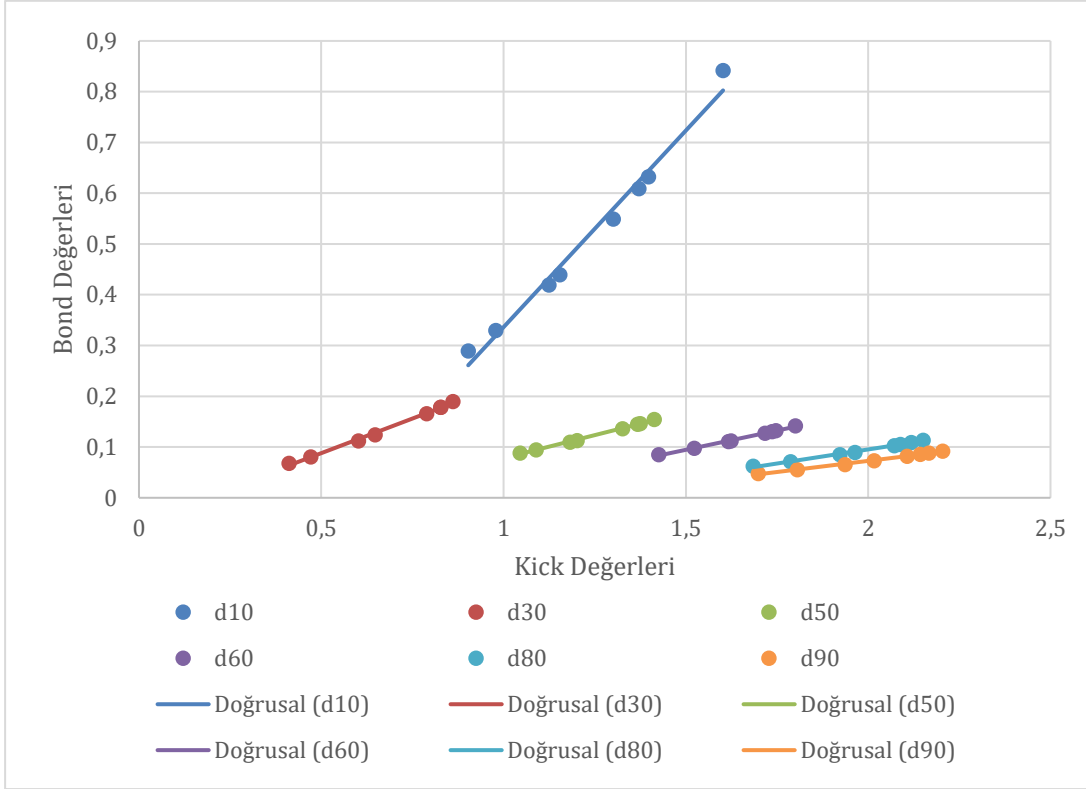


Şekil 58. Kick ve Bond enerji değerlerinin karşılaştırılması (Tesis-2)

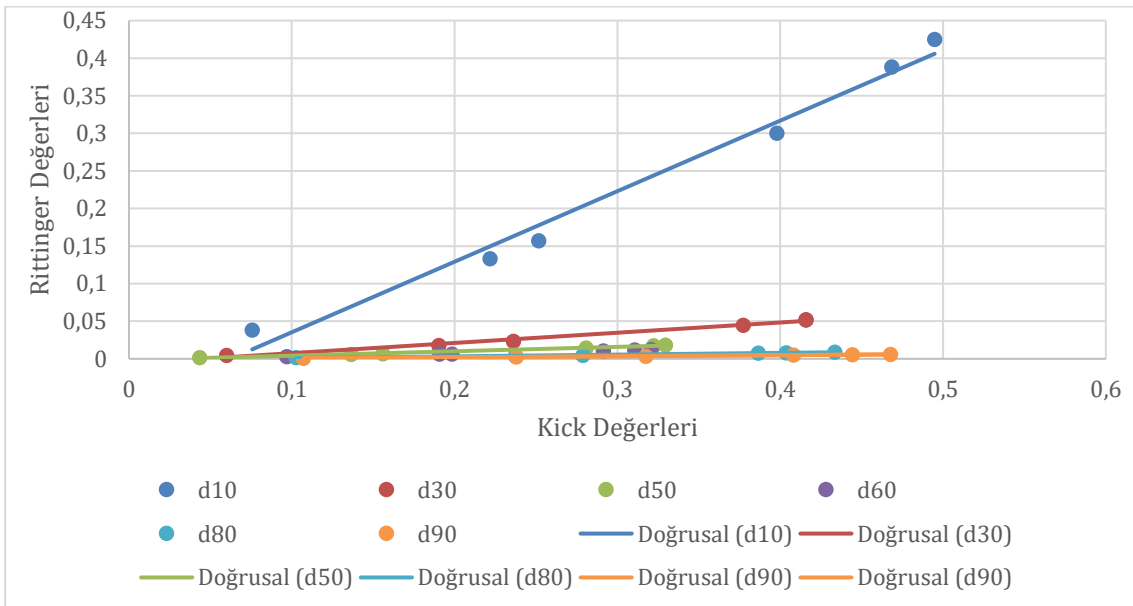
Devre etrafındaki enerji değişimini daha geniş bir açı ile görebilmek için toplam besleme değerleri temel alınarak, toplam besleme, değirmen içi ve sınıflandırıcı besleme değerlerindeki enerji değişimi ortaya konulmuştur. Bu enerji ilişkilerinde değirmen



çevresindeki değerlerin eklenmesi durumunda da ilişkilerin dağılım şeklini koruduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 59. Kick-Bond ilişkisi (Devre etrafı akışlar dahil) (Tesis-2)



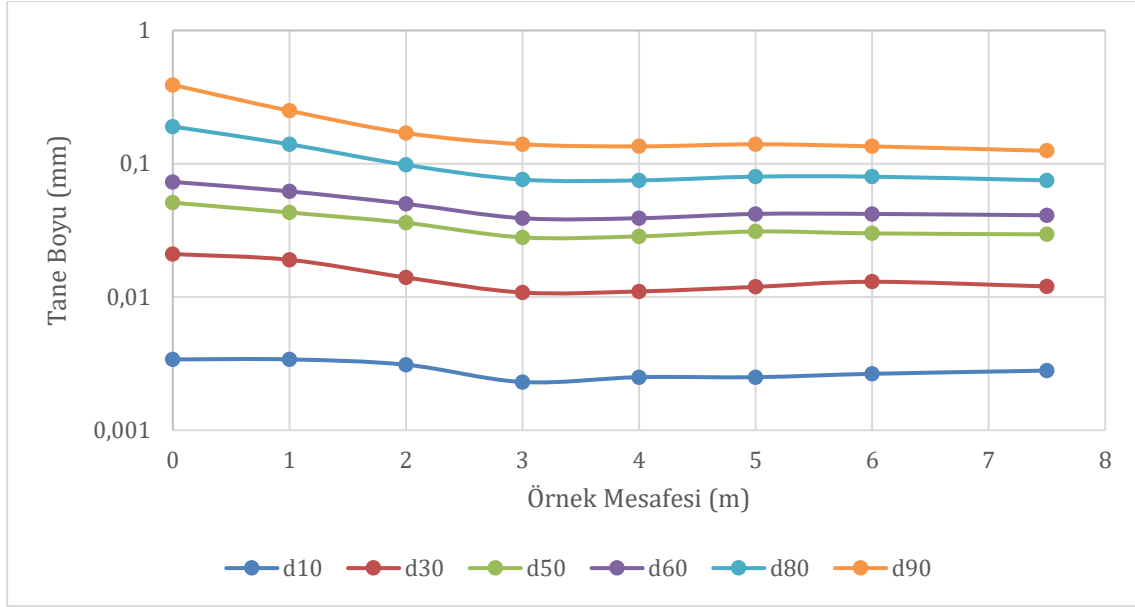
Şekil 60. Kick ve Rittinger enerji değerlerinin karşılaştırılması (Tesis-2)

Tesis-2 verilerinde yapılan veri analizlerinde aşağıdaki değerlendirmeler yapılabilir;

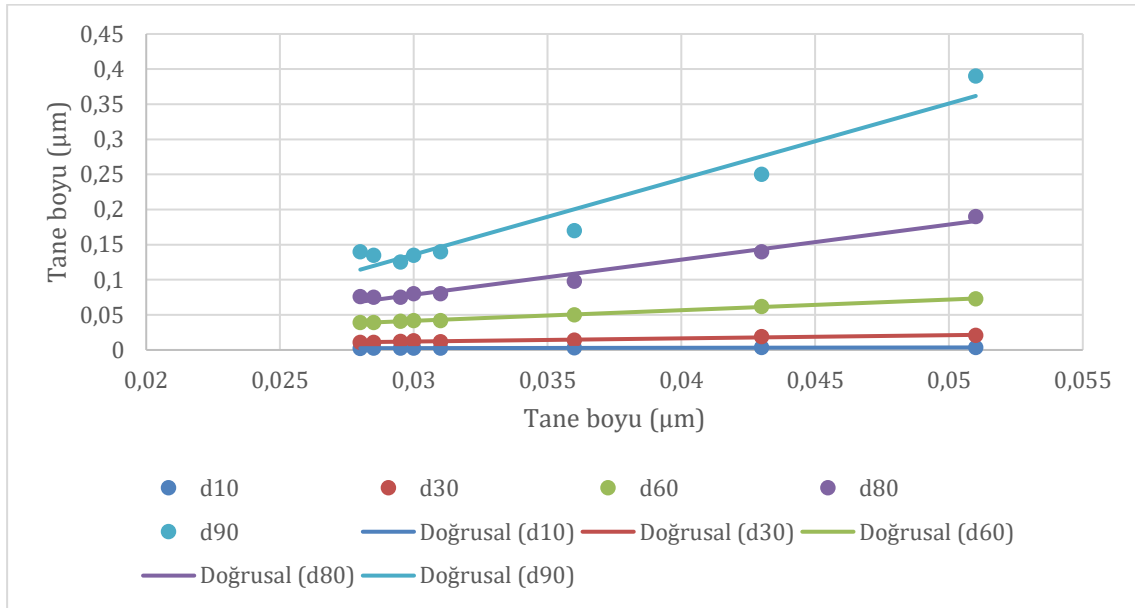
- Bu çalışma kapsamında örnek mesafesi ile tek parametrelili incelik indeksleri arasındaki ilişki çıkarılarak öğütmenin kinetiği ortaya konulmuştur.
- Malzemenin %50 'sinin geçtiği elek boyu ( $d_{50}$ ) değerleri ile  $d_{10}$ ,  $d_{30}$ ,  $d_{60}$ ,  $d_{80}$  ve  $d_{90}$  değerleri arasındaki ilişkinin doğrusal olduğu tespit edilmiştir. Dolayısıyla öğütme kinetiği değerlendirmesi yapılırken her hangi bir incelik indeksi temel alınarak değerlendirmeler yapılabilir.
- 10, 30, 45, 50, 60, 80 ve 90  $\mu\text{m}$  boyutunun altına geçen malzeme yüzdesi ile örnek mesafesi değerlendirilmiştir.
- Birikimli elek altı eğrisi altında kalan alan ile istatistiksel entropi değerlerinin örnekleme mesafesi ile ilişkileri değerlendirilmiş olup, alan ve entropi değerlerinin birbiriyle ilişkisinin doğrusal olduğu gözlemlenmiştir.
- Kick ve Bond yasaları ile incelik indeksi değerleri karşılaştırıldığında incelik indekslerinin tümünün enerji ilişkilerinde kullanılabileceği anlaşılmaktadır. Kick ve Bond enerji ilişkilerinde değirmen içi verilerine ek olarak devre etrafı (toplam besleme ve sınıflandırıcı besleme) akışları eklendiğinde de doğrusallığın korunduğu gözlenmiştir.

### **5.3 Tesis-3 (Değirmen-4) Sonuçları ve Değerlendirmesi**

Birikimli elek altı değerlerine bakılarak tespit edilen  $d_{10}$ ,  $d_{30}$ ,  $d_{50}$ ,  $d_{60}$ ,  $d_{80}$  ve  $d_{90}$  incelik indeksleri ve örnek alma mesafesi arasında kurulan ilişki ile aşağıdaki grafik elde edilmiştir. Örnek alma mesafesi arttıkça öğütme gerçekleşmekte ve belirlenen indekslerdeki tane boyu incelmektedir.

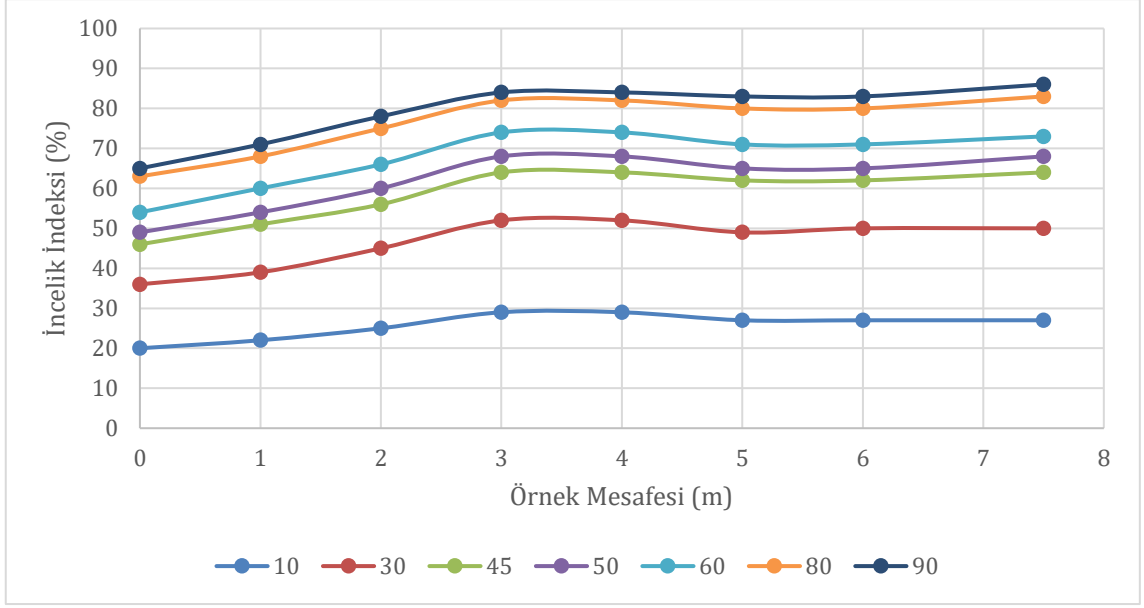


Şekil 61. Örnek mesafesi ve tespit edilen incelik indeksleri arasındaki ilişki (Tesis-3)

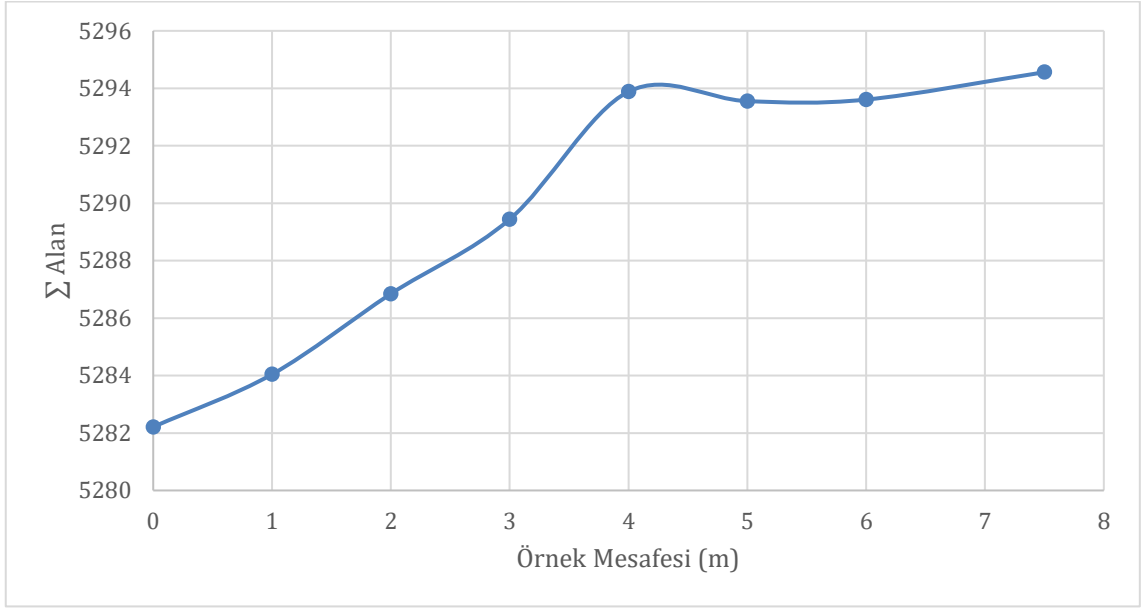


Şekil 62. D50 ile diğer tek parametrelilik incelik indeksleri arasındaki ilişki (Tesis-3)

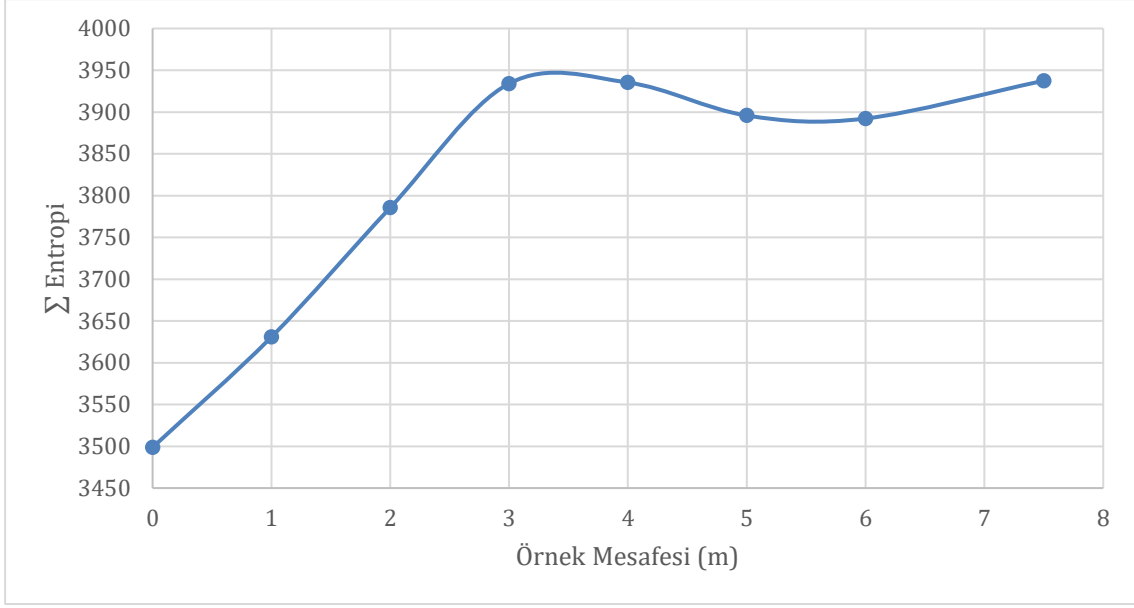
Tek parametrelilik indekslerin birbiriyle olan doğrusal ilişkisi gösterildikten sonra, aşağıdaki grafikte; 10, 30, 45, 50, 60, 80 ve 90 µm boyutunun altına geçen malzeme yüzdesi olan tek parametrelilik indeks değerleri tespit edilerek örnek mesafesi ile ilişkilerine bakılmıştır.



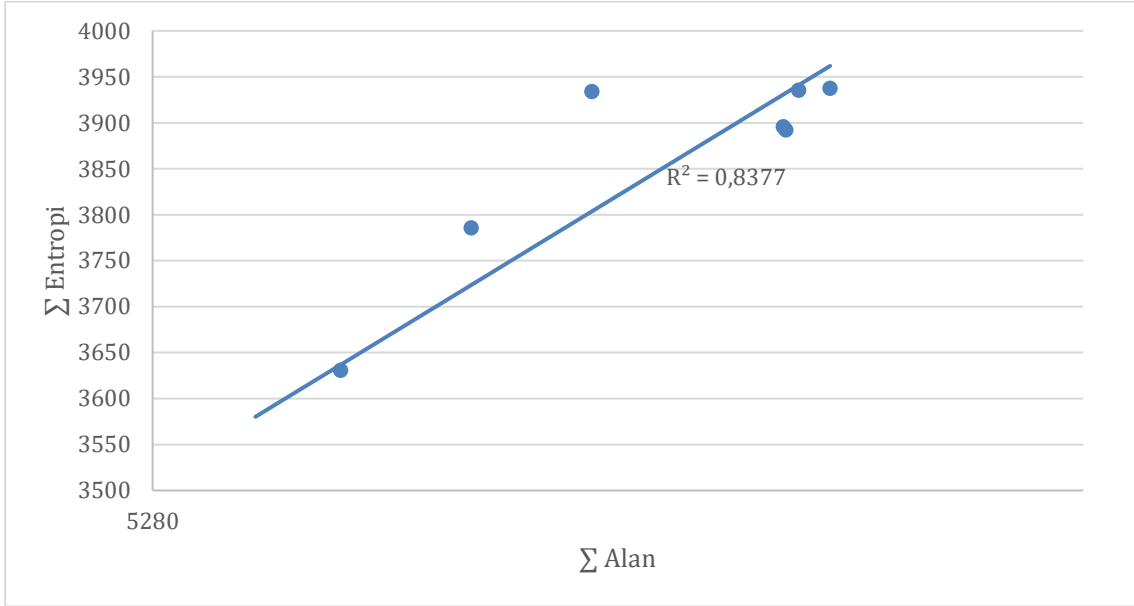
Şekil 63. 10, 30, 45, 50, 60, 80 ve 90 µm boyutunun altına geçen malzeme yüzdesi ile örnek mesafesi arasındaki ilişki (Tesis-3)



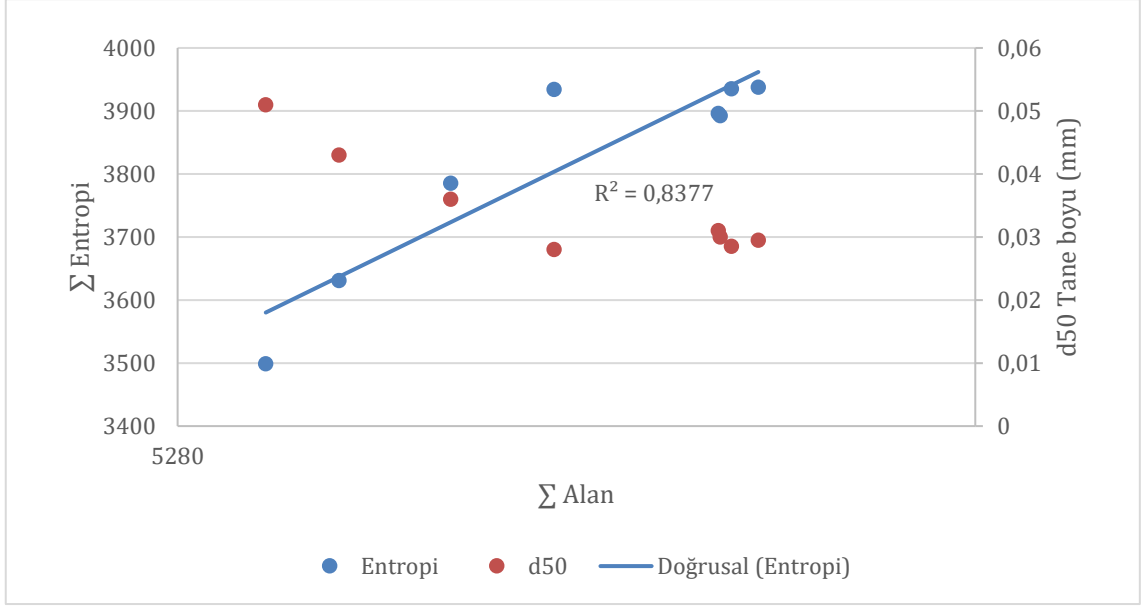
Şekil 64. Σ Alan- Örnek mesafesi (Tesis-3)



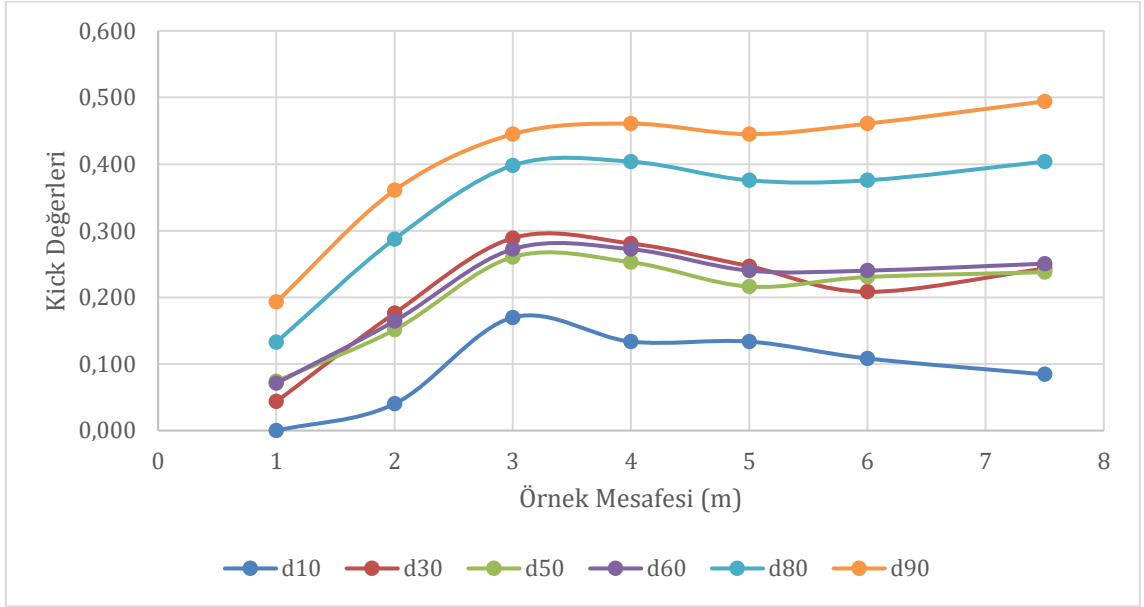
Şekil 65. Σ Entropi-Örnek mesafesi (Tesis-3)



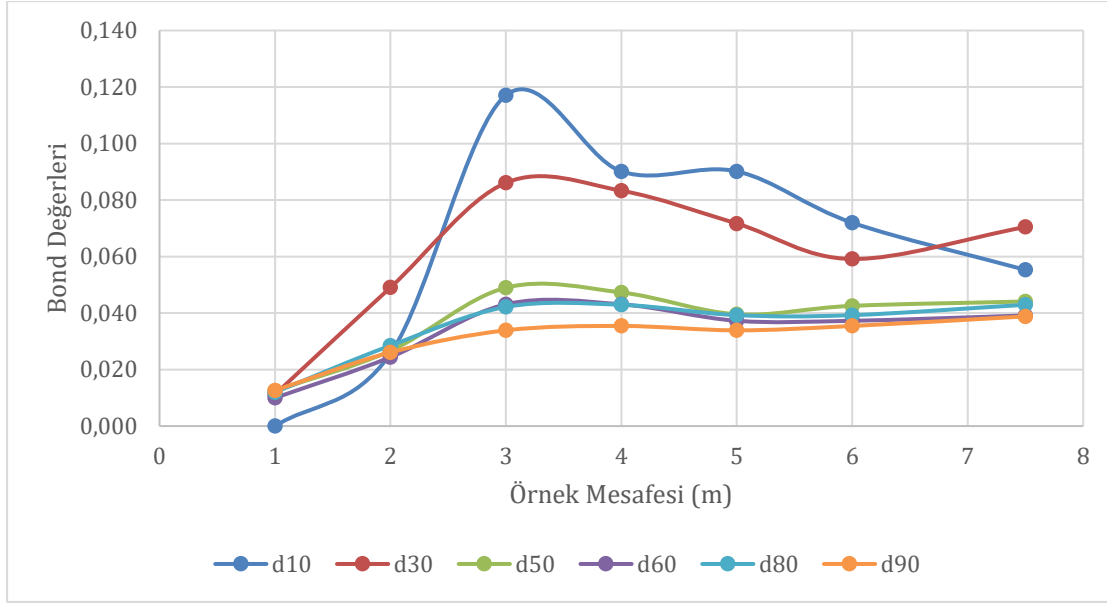
Şekil 66. Σ Entropi ve Σ Alan (Tesis-3)



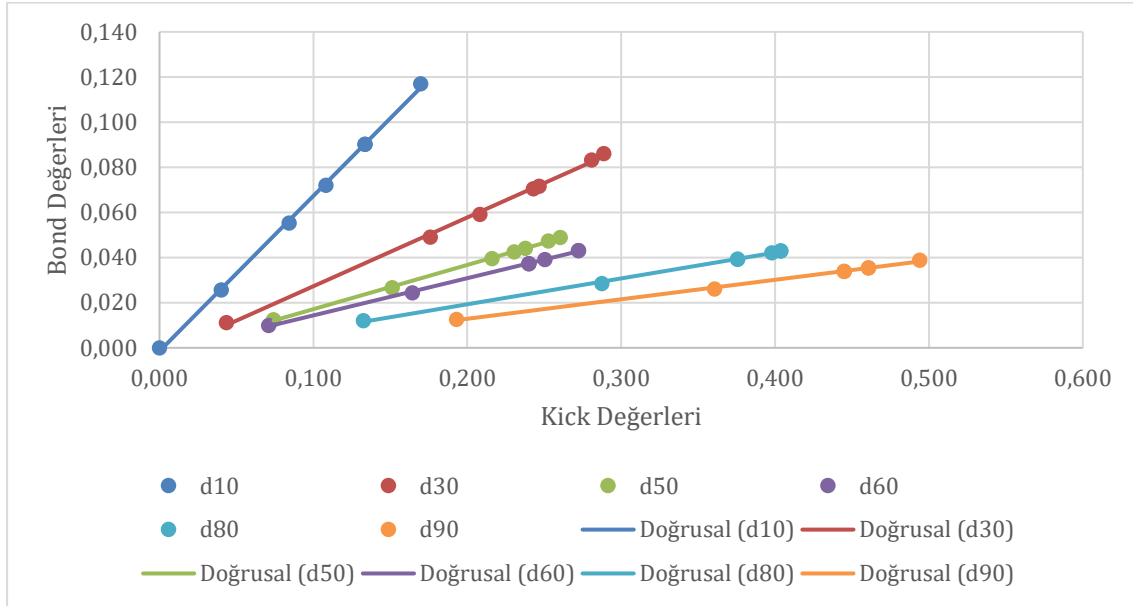
Şekil 67.  $\Sigma$  Alan,  $\Sigma$  Entropi ve d50 arasındaki ilişki (Tesis-3)



Şekil 68. Kick yasasına göre farklı incelik indeksleri kullanılarak hesaplanan öğütme enerjisinin 2. kamara boyunca değişimi (Tesis-3)

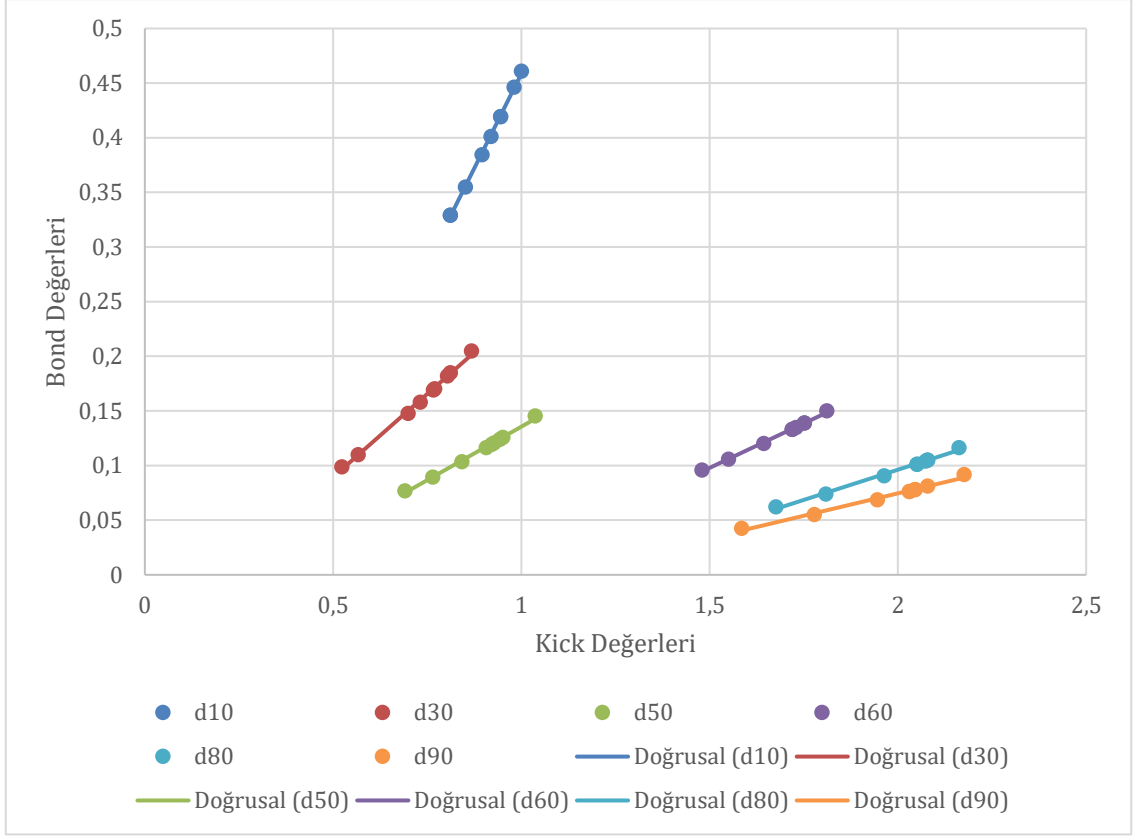


Şekil 69. Bond yasasına göre farklı incelik indeksleri kullanılarak hesaplanan öğütme enerjisinin 2. kamara boyunca değişimi (Tesis-3)

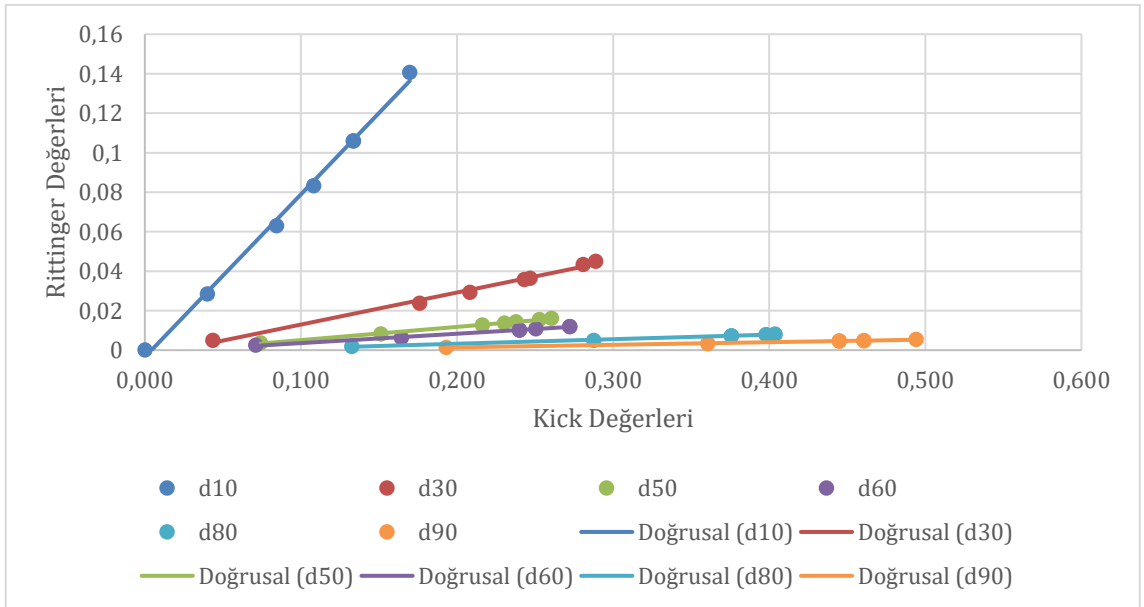


Şekil 70. Kick ve Bond enerji değerlerinin karşılaştırılması (Tesis-3)

Devre etrafındaki enerji değişimini daha geniş bir açı ile görebilmek için toplam besleme değerleri temel alınarak, toplam besleme, değirmen içi ve sınıflandırıcı besleme değerlerindeki enerji değişimi ortaya konulmuştur. Bu enerji ilişkilerinde değirmen çevresindeki değerlerin eklenmesi durumunda da ilişkilerin dağılım şeklini koruduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 71. Kick-Bond ilişkisi (Devre etrafı akışlar dahil) (Tesis-3)



Şekil 72. Kick ve Rittinger enerji değerlerinin karşılaştırılması (Tesis-3)

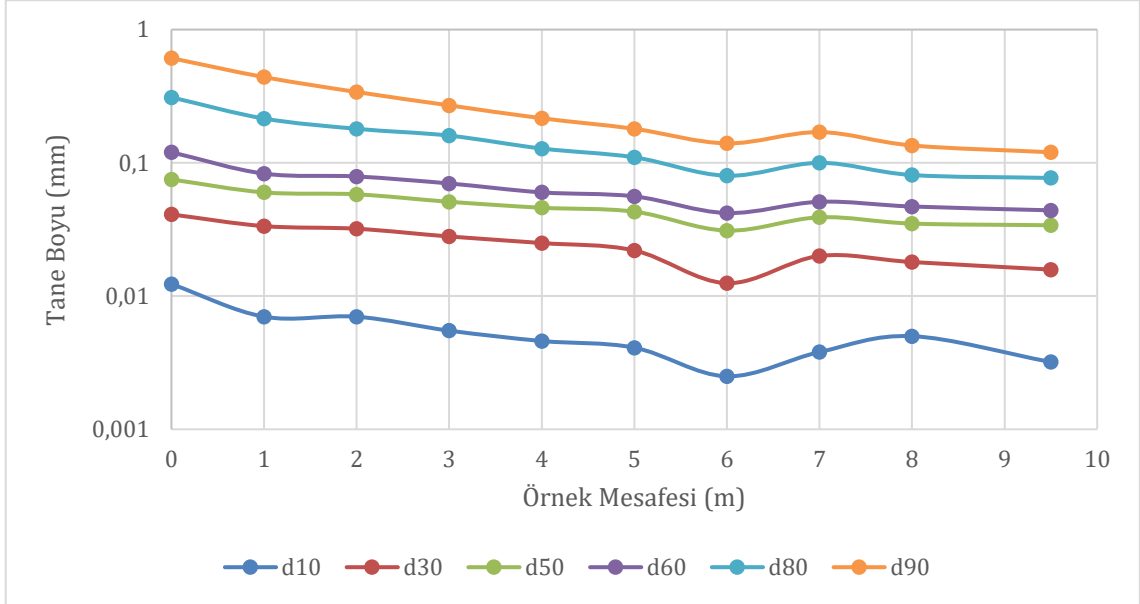
Tesis-3 verilerinde yapılan veri analizlerinde aşağıdaki değerlendirmeler yapılabilir;



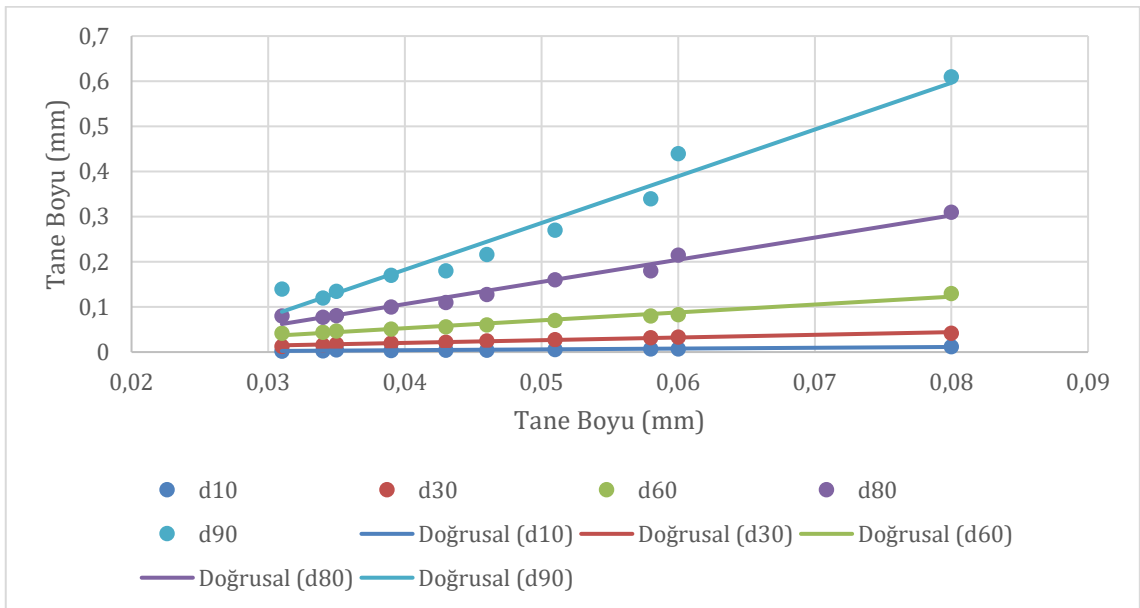
- Bu çalışma kapsamında örnek mesafesi ile tek parametrelilik incelik indeksleri arasındaki ilişki çıkarılarak öğütmenin kinetiği ortaya konulmuştur. Bu kinetiğe göre kamara boyunca yapılan incelemede 0-3 metre arasında öğütmenin hızlı olduğu, 4. Metreden sonrada değirmenin işlevini yitirdiği değerlendirilmektedir.
- 5 ve 6. metrelerde belirli indekslerdeki yükselmeden dolayı değirmen içinde birikmelerin olduğu ifade edilebilir.
- Malzemenin %50 'sinin geçtiği elek boyu ( $d_{50}$ ) değerleri ile  $d_{10}$ ,  $d_{30}$ ,  $d_{60}$ ,  $d_{80}$  ve  $d_{90}$  değerleri arasındaki ilişkinin doğrusal olduğu tespit edilmiştir. Dolayısıyla öğütme kinetiği değerlendirmesi yapılırken her hangi bir incelik indeksi temel alınarak değerlendirmeler yapılabilir.
- 10, 30, 45, 50, 60, 80 ve 90  $\mu\text{m}$  boyutunun altına geçen malzeme yüzdesi ile örnek mesafesi değerlendirilmiştir.
- Birikimli elek altı eğrisi altında kalan alan ile istatistiksel entropi değerlerinin örnekleme mesafesi ile ilişkileri değerlendirilmiş olup, alan ve entropi değerlerinin birbiriyle ilişkisinin doğrusal olduğu gözlemlenmiştir.
- Kick ve Bond değerleri ile mesafe ilişkisine bakıldığında ince indekslerde ( $d_{10}$ ,  $d_{30}$ ) değerlerinin ara ara beklenen dışında hareketleri gözlemlenmiş olup, bu durum daha çok birikmeler ve tane boyu ölçüm yöntemlerinden kaynaklı olduğu düşünülmektedir. Bu durum değirmen boyunca alınan örneklemelerde Kick ve Bond arasındaki ilişkinin doğrusallığına etki etmemiştir.
- Kick ve Bond yasaları ile incelik indeksi değerleri karşılaştırıldığında incelik indekslerinin tümünün enerji ilişkilerinde kullanılabileceği anlaşılmaktadır. Kick ve Bond enerji ilişkilerinde değirmen içi verilerine ek olarak devre etrafı (toplam besleme ve sınıflandırıcı besleme) akışları eklendiğinde de doğrusallığın korunduğu gözlemlenmiştir.

#### 5.4 Tesis-4 (Değirmen-5) Sonuçları ve Değerlendirmesi

Birikimli elek altı değerlerine bakılarak tespit edilen d10, d30, d50, d60, d80 ve d90 incelik indeksleri ve örnek alma mesafesi arasında kurulan ilişki ile aşağıdaki grafik elde edilmiştir. Örnek alma mesafesi arttıkça öğütme gerçekleşmekte ve belirlenen indekslerdeki tane boyu incelmektedir.

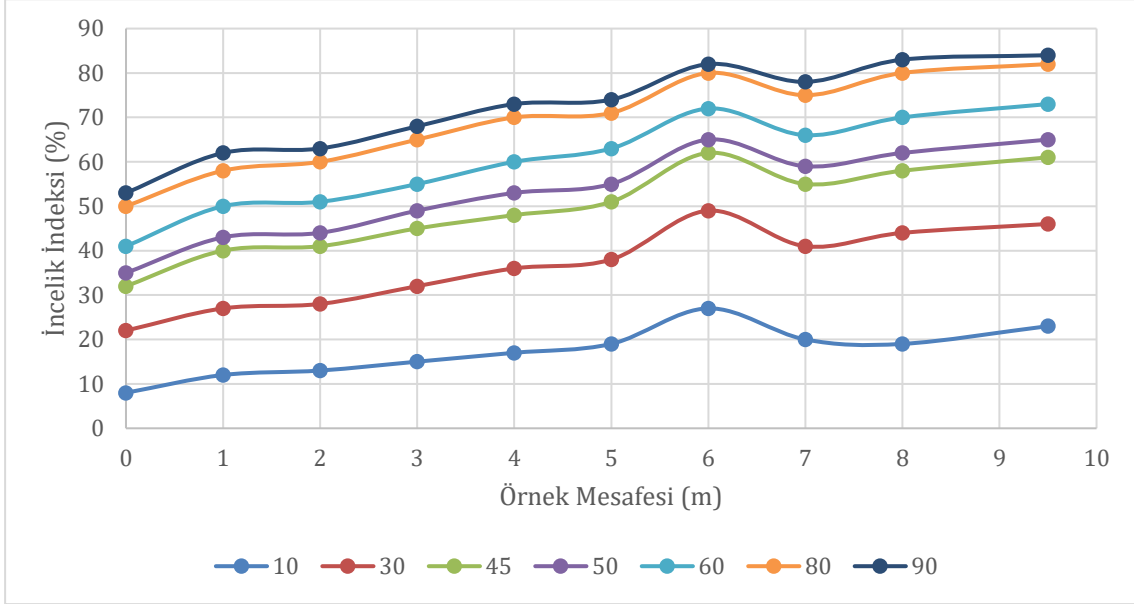


Şekil 73. Örnek mesafesi ve tespit edilen incelik indeksleri arasındaki ilişki (Tesis-4)

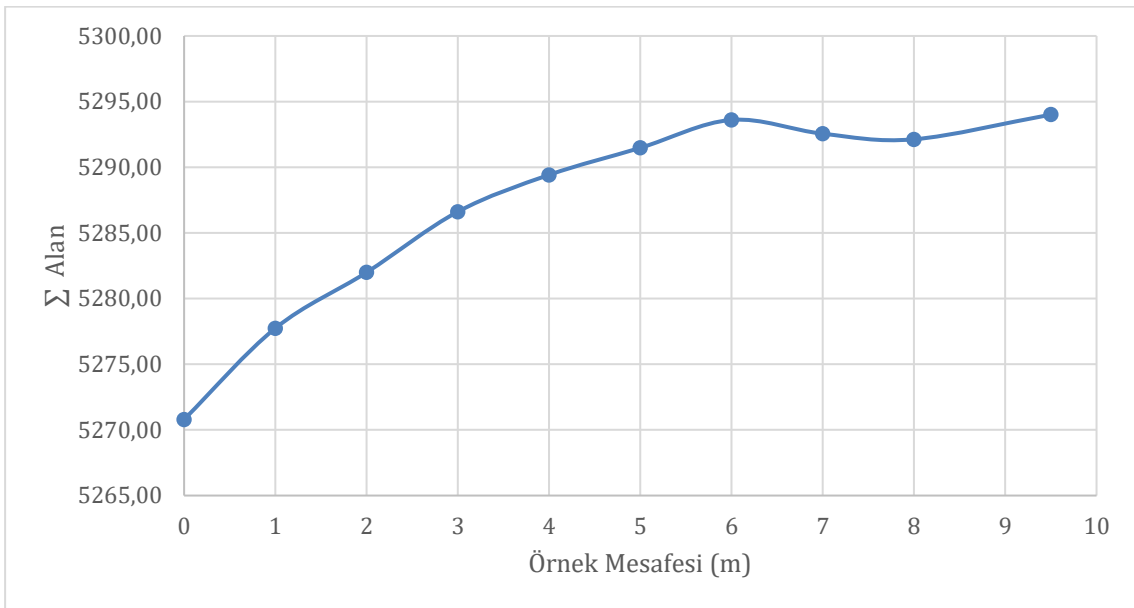


Şekil 74. D50 ile diğer tek parametrelili incelik indeksleri arasındaki ilişki (Tesis-4)

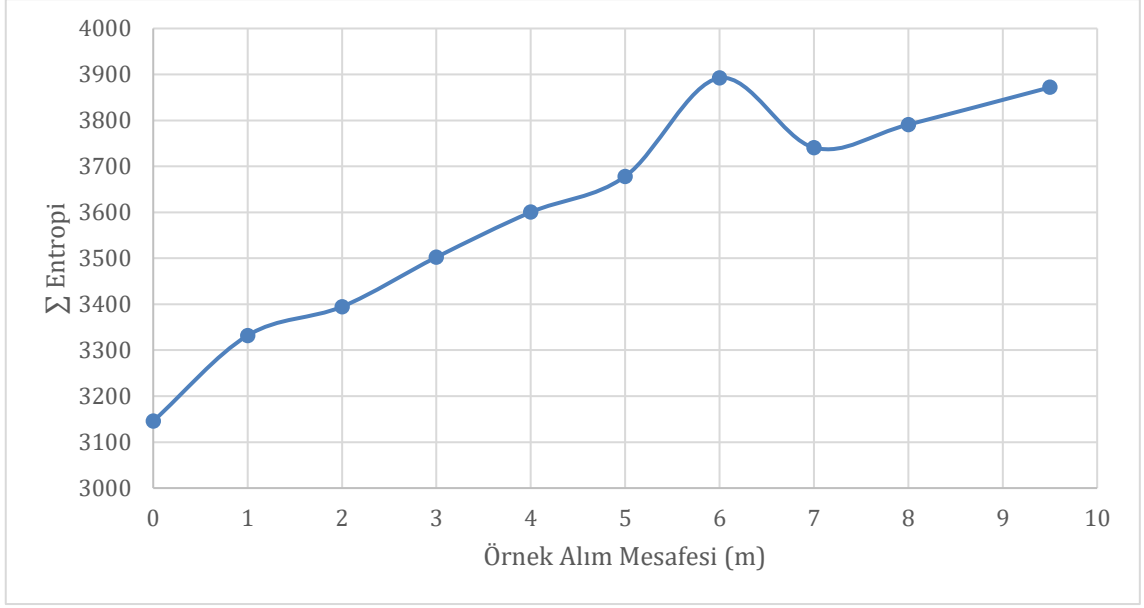
Tek parametrelili indekslerin birbiriyle olan doğrusal ilişkisi gösterildikten sonra, aşağıdaki grafikte; 10, 30, 45, 50, 60, 80 ve 90  $\mu\text{m}$  boyutunun altına geçen malzeme yüzdesi olan tek parametrelili indeks değerleri tespit edilerek örnek mesafesi ile ilişkilerine bakılmıştır.



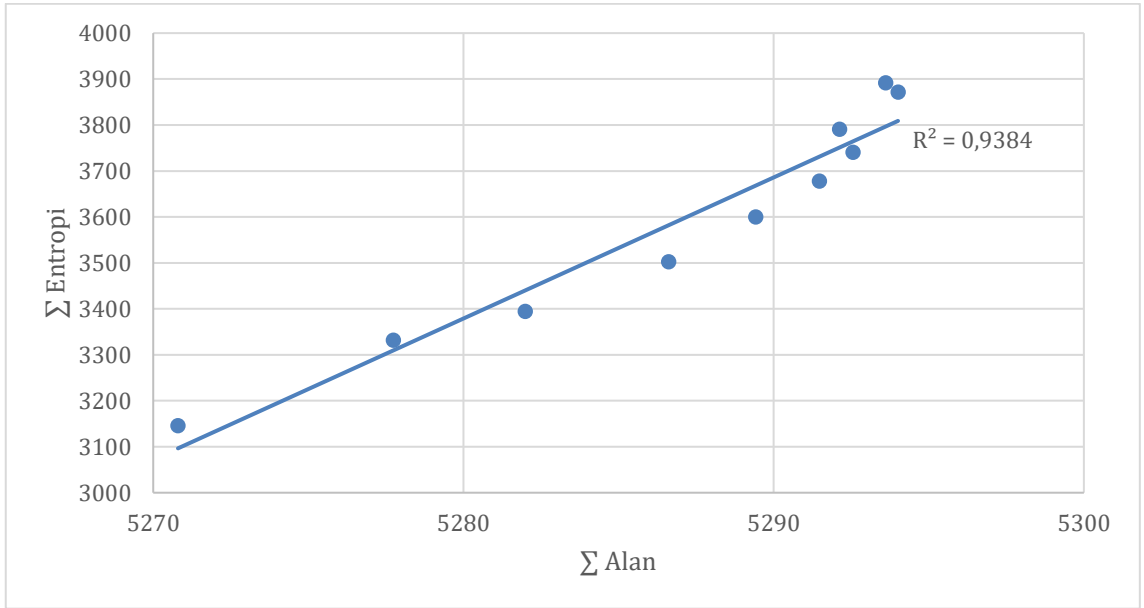
Şekil 75. 10, 30, 45, 50, 60, 80 ve 90  $\mu\text{m}$  boyutunun altına geçen malzeme yüzdesi ile örnek mesafesi arasındaki ilişki (Tesis-4)



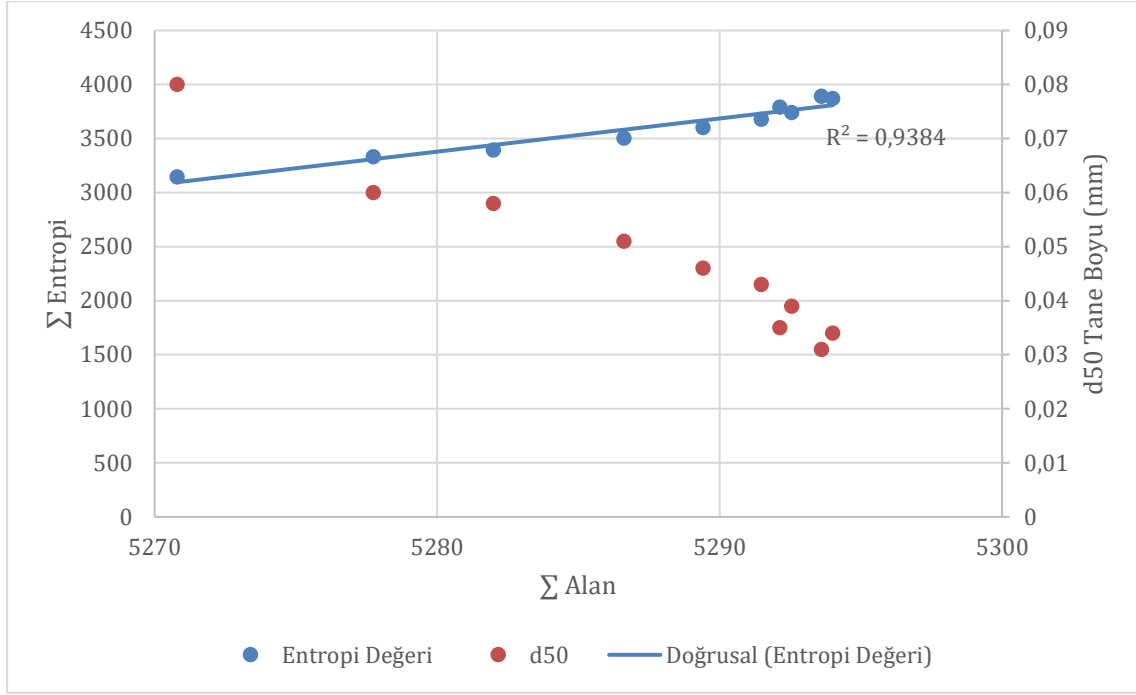
Şekil 76. Σ Alan- Örnek mesafesi (Tesis-4)



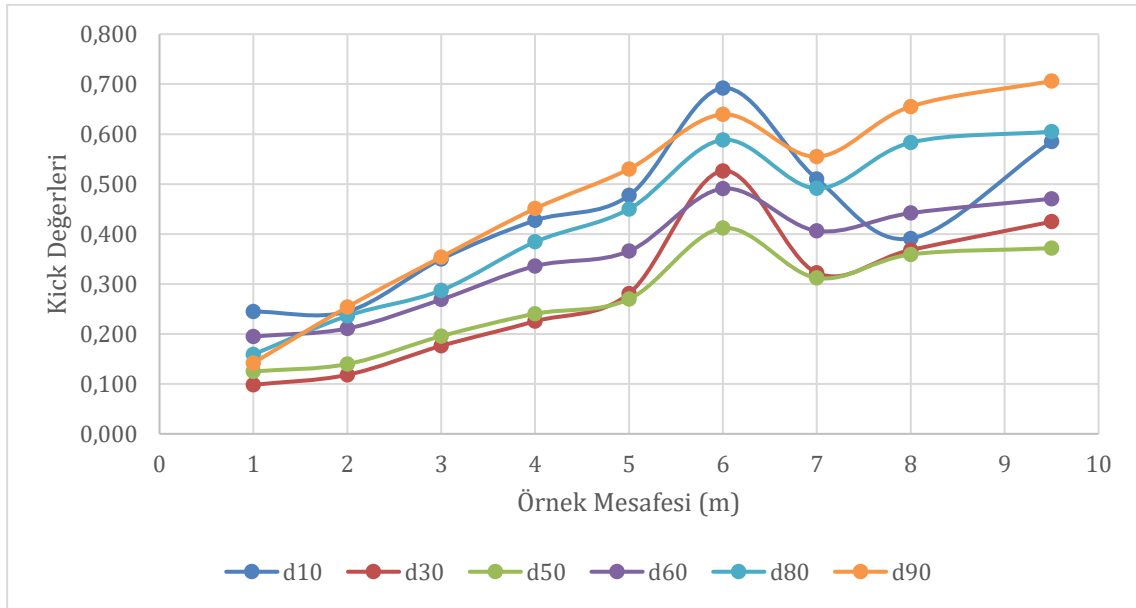
Şekil 77. Σ Entropi-Örnek mesafesi (Tesis-4)



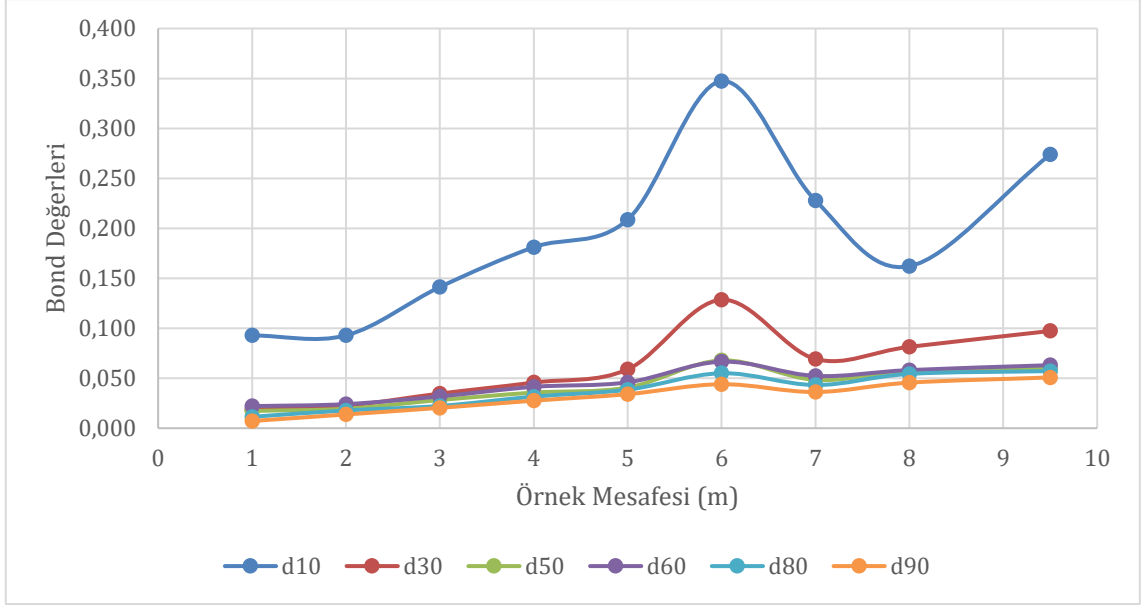
Şekil 78. Σ Entropi ve Σ Alan (Tesis-4)



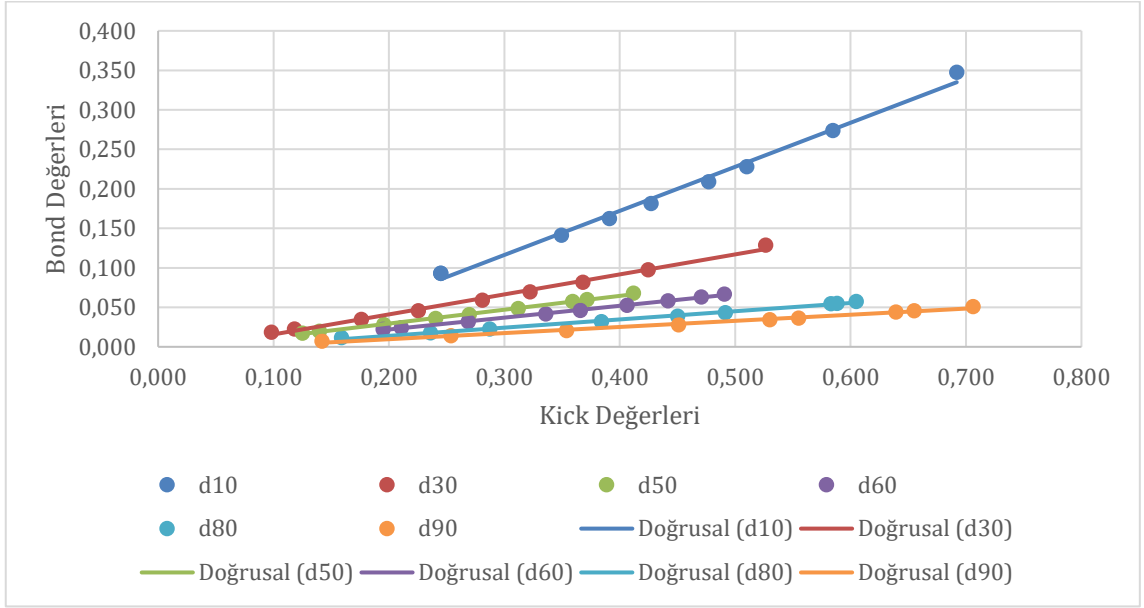
Şekil 79.  $\Sigma$  Alan  $\Sigma$  Entropi ve d50 arasındaki ilişki (Tesis-4)



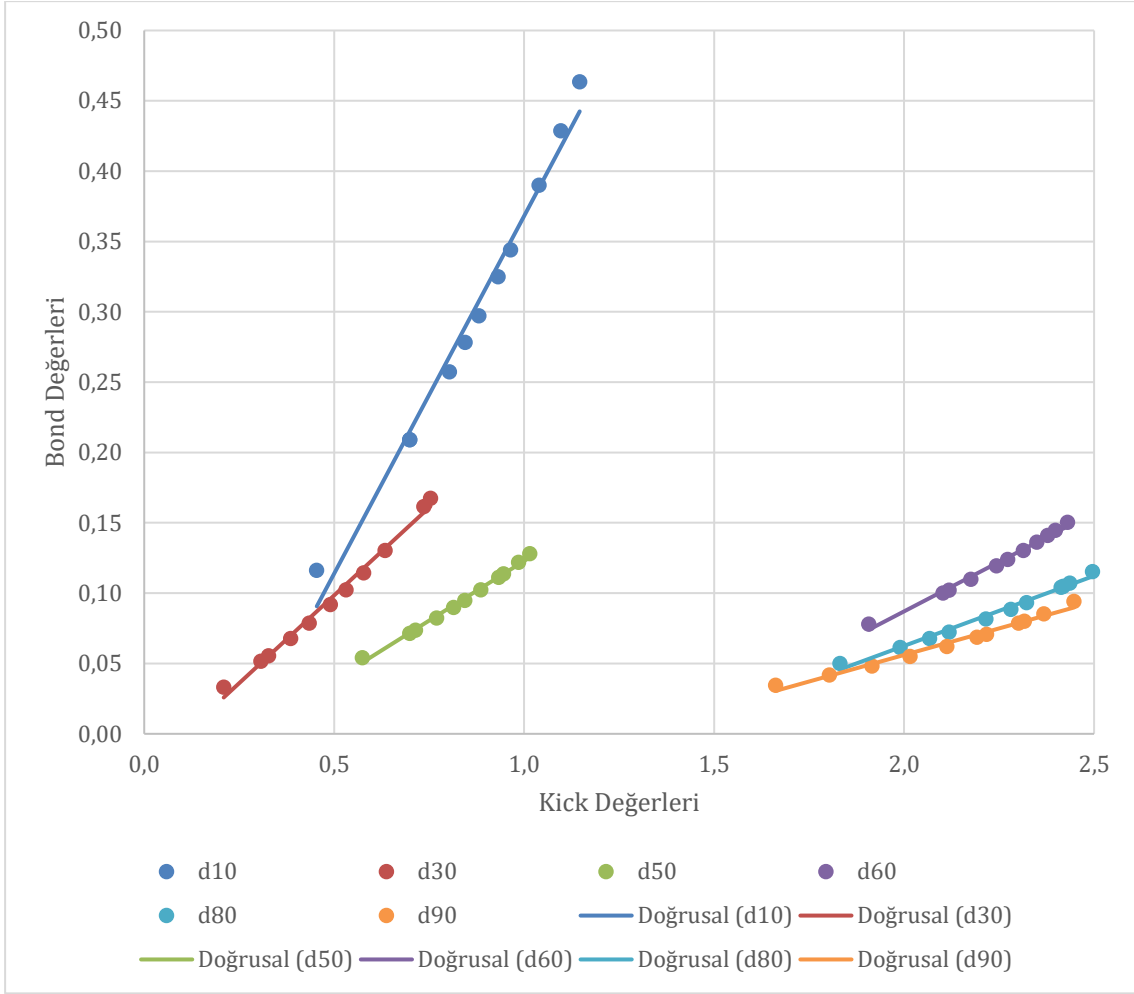
Şekil 80. Kick yasasına göre farklı incelik indeksleri kullanılarak hesaplanan öğütme enerjisinin 2. kamara boyunca değişimi (Tesis-4)



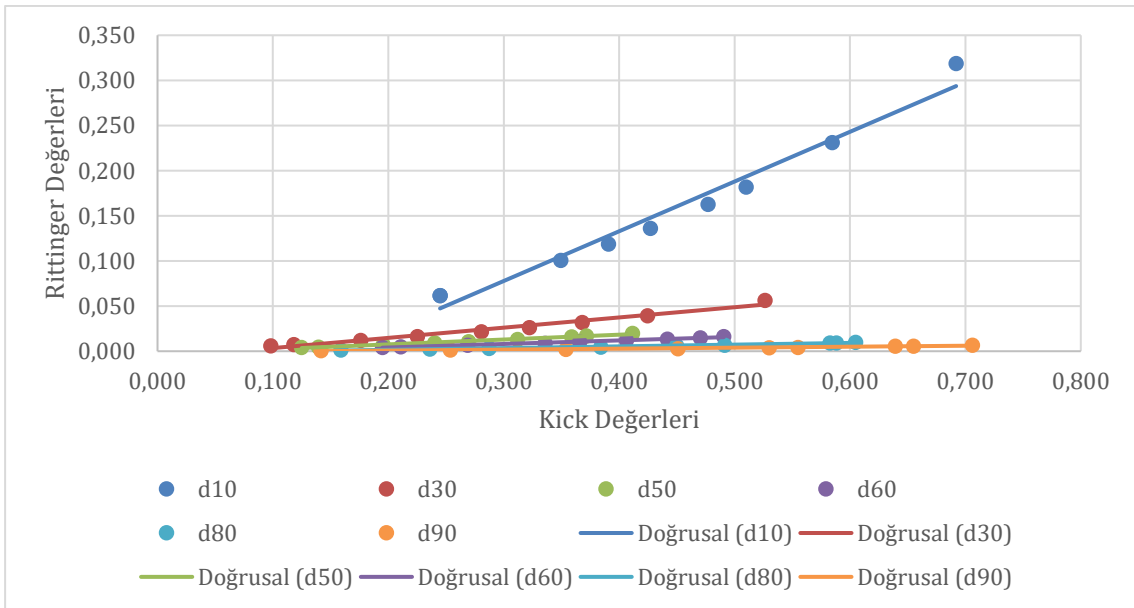
Şekil 81. Bond yasasına göre farklı incelik indeksleri kullanılarak hesaplanan öğütme enerjisinin 2. kamara boyunca değişimi (Tesis-4)



Şekil 82. Kick ve Bond enerji değerlerinin karşılaştırılması (Tesis-4)



Şekil 83. Kick Bond ilişkisi (Devre etrafı akışlar dahil) (Tesis-4)



Şekil 84. Kick ve Rittinger enerji değerlerinin karşılaştırılması (Tesis-4)

Tesis-4 verilerinde yapılan analizlerde aşağıdaki değerlendirmeler yapılabilir;

- Bu alışma kapsamında örnek mesafesi ile tek parametrelili incelik indeksleri arasındaki ilişki çıkarılarak öğütmenin kinetiği ortaya konulmuştur. Bu kinetiğe bakıldığında 0-6 metre arasında öğütmede artış gözlemlense de değirmen 6. metreden sonra durağan hale gelerek boyut küçültmenin neredeyse durduğu gözlemlenmiştir.
- Malzemenin %50 'sinin geçtiği elek boyu ( $d_{50}$ ) değerleri ile  $d_{10}$ ,  $d_{30}$ ,  $d_{60}$ ,  $d_{80}$  ve  $d_{90}$  değerleri arasındaki ilişkinin doğrusal olduğu tespit edilmiştir. Dolayısıyla ğtme kinetiği değerlendirmesi yapılırken her hangi bir incelik indeksi temel alınarak değerlendirmeler yapılabilir.
- 10, 30, 45, 50, 60, 80 ve 90  $\mu\text{m}$  boyutunun altına geçen malzeme yüzdesi ile örnek mesafesi değerlendirilmiştir.
- Birikimli elek altı eğrisi altında kalan alan ile istatistiksel entropi değerlerinin örnekleme mesafesi ile ilişkileri değerlendirilmiş olup, alan ve entropi değerlerinin birbiriyle ilişkisinin doğrusal olduğu gözlemlenmiştir.
- Kick ve Bond değerleri ile mesafe ilişkisine bakıldığında ince indekslerde ( $d_{10}$ ,  $d_{30}$ ) değerlerinin ara ara normların dışında ani hareketlikler gözlenmiş olup, bu durum daha çok birikmeler ve tane boyu ölüm yöntemlerinden kaynaklı olduğu düşünülmektedir.
- Kick ve Bond yasaları ile incelik indeksi değerleri karşılaştırıldığında incelik indekslerinin tümünün enerji ilişkilerinde kullanılabileceği anlaşılmaktadır. Kick ve Bond enerji ilişkilerinde değirmen içi verilerine ek olarak devre etrafı (toplam besleme ve sınıflandırıcı besleme) akışları eklendiğinde de doğrusallığın korunduğu gözlenmiştir.



## 5.5 Genel Değerlendirme

Bu alışma kapsamında yapılan analizlerde beslemenin karakteristiğini belirleyen tek parametrelili incelik indekslerinin yerine birikimli elek altı eğrisi altında kalan alan ve istatistiksel entropi değerlerinin kullanılabilirliği değerlendirilmiştir. Endüstriyel ölçekli yapılan bu analizlerde görölmektedir ki hem birikimli elek altı eğrisi altında kalan alan hem de istatistiksel entropi değeri malzemenin karakteristiğini temsil açısından kullanılabilir.

Endüstriyel ölçekli alınan örneklerle yapılan bu çalışmada incelik indekslerinin birbirleriyle olan ilişkilerinde doğrusal ilişkilerin varlığı gözlemlenmiştir. Dolayısıyla enerji hesaplamalarında herhangi bir incelik indeksinin kullanılabilirliğinin uygun olduğu yorumlanabilir.

Ayrıca, boyut küçültme ile enerji ilişkilerinde sıklıkla kullanılan Rittinger, Kick ve Bond yasaları ile yapılan analizlerde Rittinger, Kick ve Bond değerlerinin tüm incelik indekslerinde doğrusal olduğu gözlemlenmiştir. Dolayısıyla enerji değerlerinin belirlenmesinde malzemenin sadece %80'inin geçtiği  $d_{80}$  indeksinin kullanımının dışında diğer indekslerinde kullanılabileceği değerlendirilmektedir.

## 6. KAYNAKLAR

- [1] F. K. K. N. J. Z. Z. Škvára, The effect of cement particle size distribution upon properties of pastes and mortars with low water-to cement ratio, *Cement and Concrete Research*, 247-255, **1981**.
- [2] S. T. S. B. A. H. E. Tsvivilis, Study on the contribution of the fineness on cement strength, *ZKG*, 26-29, **1990**.
- [3] R. Hogg, Issues in Particle Size Analysis, *KONA Powder and Particle Journal*, 81-93, **2008**.
- [4] S. H. P. W. C. & K. B. Kosmatka, Design and control of concrete mixtures, Canadian Portland Cement Association, **1995**.
- [5] G. Bye, Portland Cement composition, production and properties, London: Thomas Telford 2nd Edition, **1999**.
- [6] M. Á. M. Y. P. Carlos García-Gutiérrez, On the Information Content of Coarse Data with Respect to the Particle Size Distribution of Complex Granular Media: Rationale Approach and Testing, *Entropy*, 1-10, **2019**.
- [7] J. Lőrincz, Relationship Between Grading Entropy and Dry Bulk Density Of Granular Soils, *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 255-263, **1990**.
- [8] Hogg, Characterization Problems in Comminution, *Intl. J. Miner. Process*, 25-40, **1988**.
- [9] GMG Group, Methods to survey and sample grinding circuits for determining energy efficiency, Global Mining Standards and Guidelines (GMSG) Group, **2015**.
- [10] D. Bela Beke, The Process of Fine Grinding (Vol. 1), Londra: Springer Science & Business Media., **2012**.
- [11] M. L. Essick, Literature Search on Methods of Particle Size Measurement, Rohm and Haas Company Redstone Research Laboratories, Huntsville, **1966**.

- [12] L. K. R. Austin, The Theory of Grinding Operations, *Industrial and Engineering Chemistry*, 19-29, **1964**.
- [13] F. Kick, Das Gesetz des proportionalen Widerstandes und Anwendung, Leipzig, **1885**.
- [14] H. Otwinowski, Energy and population balances in comminution process modelling based on the informational entropy, *Powder Technology*, 33-44, **2006**.
- [15] F. C. Bond, The Third Theory of Comminution, *Min. Eng. Trans. AIME*, 484-494, **1952**.
- [16] R. J. Charles, Energy-Size Reduction Relationships in Comminution, *Transactions on AIME Mining Engineering*, 80-88, **1957**.
- [17] J. Lőrincz, E. Imre, M. Gálos, Q. P. Trang, K. Rajkai, S. Fityus ve G. Telekes, Grading Entropy Variation Due to Soil Crushing, *International Journal of Geomechanics*, 311-319, **2005**.
- [18] F. Bulut, Bilgi Kuramındaki Entropi Kavramıyla İlgili Farklı Matematiksel Modeller, *Bilge International Journal of Science and Technology Research*, 167-174, **2017**.
- [19] R. F. a. C. Werndl, Entropy – A Guide for the Perplexed, 2010.
- [20] C. Shannon, A mathematical theory of communication, *The Bell System Technical Journal*, 379-423, **1948**.
- [21] M. R. F. J. T. Miguel Ángel Martín, An entropy-like parameter of particle size distributions as packing density index in complex granular media, *Granular Matter*, p. 9, **2017**.
- [22] J. Uffink, Can the maximum entropy principle be explained as a consistency requirement?, *Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, 223-261, **1995**.
- [23] L. Boltzmann, Lectures on Gas Theory, University of California, **1964**.
- [24] K. J. C. P. S. H. T. G. M. Ole A. Mikkelsen, Entropy analysis of in situ particle size spectra, *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 615-625, **2007**.

- [25] H. Heywood, Measurement of the Fineness of Powdered Materials, *A.M.I.Mech.E.*, 257-347, **1938**.
- [26] V. M. P. F. S. B. V. Zhukov, The Modelling Of Grinding Processes By Means Of The Principle Of Maximum Entropy, *Powder Technology*, 248-253, **1998**.
- [27] Y. d. A. M. A. Jorge Navarro, Some new results on the cumulative residual entropy, *Journal of Statistical Planning and Inference*, 310-322, **2010**.
- [28] A. R. A. R. E. Ghiasvand, Effect of grinding method and particle size distribution on the properties of Portland-pozzolan cement, *Construction and Building Materials*, 547-554, **2014**.