

**ÇİMENTO ÖĞÜTME DEVRELERİNDE FARKLI AKIŞ  
KOLLARINDA İNCE ÖĞÜTMENİN  
KULLANILABİLİRLİĞİNİN İNCELENMESİ**

**INVESTIGATING THE FINE GRINDING APPLICATIONS  
OF THE FLOWS AROUND THE CEMENT GRINDING  
CIRCUITS**

**CUMHUR ERDEM KARAHAN**

**DOÇ. DR OKAY ALTUN**

**Tez Danışmanı**

Hacettepe Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin

Maden Mühendisliği Anabilim Dalı için Öngördüğü

YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak hazırlanmıştır.

## ÖZET

# ÇİMENTO ÖĞÜTME DEVRELERİNDE FARKLI AKIŞ KOLLARINDA İNCE ÖĞÜTMENİN KULLANILABİLİRLİĞİNİN İNCELENMESİ

**Cumhur Erdem KARAHAN**

**Yüksek Lisans, Maden Mühendisliği**

**Tez Danışmanı: Doç. Dr. Okay ALTUN**

**Ocak 2022, 109 sayfa**

Tüm cevher hazırlama süreçleri içinde, öğütme işlemi enerjinin en yoğun harcandığı birim işlem olarak tanımlanmaktadır. Bu bağlamda, günümüze kadar geliştirilen öğütme ekipmanlarında temel olarak besleme malzemesi ve istenilen ürün tane boyu bazında harcanan enerji miktarının en uygun değere getirilmesi hedeflenmiştir. Benzer şekilde, çimento üretiminde de harcanılan enerji miktarını düşürmek amacıyla farklı öğütme teknolojileri ve akım şemalarından faydalanılmaktadır.

Bu tez çalışması kapsamında ince öğütme tekniğinin çimento öğütme devresindeki kullanım olanaklarının kalite ve enerji yönlerinden değerlendirilmesi ve yeni akım şemalarının geliştirilmesine yönelik farklı bir bakış açısının getirilmesi amaçlanmıştır. Bu tez kapsamında, geleneksel bir akım şemasına sahip çimento öğütme devresinden sınıflandırıcı beslemesi, geri dönüşü, filtre ürününden ve son ürününden numuneler toplanmış ve toplanan numunelerin öğütülmesi neticesinde çimento özelliklerinde meydana gelen

değişiklikler incelenmiştir. Ayrıca öğütülen sınıflandırıcı besleme ve geri dönüş numunelerinin farklı oranlarda çimento son ürünü ile karıştırılması ve çimento özelliği yönünden (kalite) etkilerinin incelenmesi sağlanmıştır. Böylelikle ince öğütme teknolojisinin bu akış kollarında uygulanması neticesinde ne gibi etkiler olacağı değerlendirilmeye çalışılmıştır.

Bursa Çimento 1 No'lu öğütme devresi için, laboratuvar ortamında öğütülen sınıflandırıcı geri dönüş malzemesinin, çimento son ürünü ile (%15 geri dönüş-%85 son ürün) karıştırılması neticesinde 28 günlük dayanım değerinde 54,7 MPa'dan 55,5 MPa'ya çıktığı belirlenmiştir. Bu devrede ince öğütme tekniğinin sınıflandırıcı beslemesi ve geri dönüşü akışlarında kullanılması durumunda, devrenin rutin çalışma koşullarına göre özgül enerji tüketiminde sırasıyla %12,93 ve %3,63'lük tasarruf olabileceği öngörülmüştür. Bursa Çimento 4 No'lu Çimento Öğütme Devresi'nde de benzer uygulama ile (%15 öğütülmüş geri dönüş %85 son ürün) 28 Günlük dayanım değerinin 51,4 MPa'dan 52,8 MPa değerine, sınıflandırıcı geri dönüşünün öğütülmesi ve karıştırılması ile dayanımın 51,7 MPa değerine çıktığı tespit edilmiştir. Devrede sağlanan enerji tasarrufunun geri dönüş uygulaması için %6,42 olduğu hesaplanmıştır. Çalışmalar neticesinde, ince öğütme teknolojisi kullanımının devre üzerinde olumlu etkilerinin olduğu saptanmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Çimento, Öğütme, İnce Öğütme, Enerji

## **ABSTRACT**

# **INVESTIGATING THE FINE GRINDING APPLICATIONS OF THE FLOWS AROUND THE CEMENT GRINDING CIRCUITS**

**Cumhur Erdem KARAHAN**

**Master of Science, Mining Engineering**

**Supervisor: Assoc. Prof. Okay ALTUN**

**January 2022, 109 pages**

When the whole mining operation is considered, the grinding process is known as the energy intense process. In this context, its optimization is of crucial importance for the economy of the plant and is undertaken by considering the fineness of the feed and the products together with the energy utilization. Until now, different grinding technologies and flowsheets have been developed that lead to improvement in the energy efficiency.

This study aimed at evaluating the possibilities of the use of fine grinding technique in cement grinding circuit by taking the quality issues and energy consumptions into account. Within the scope of this project, separator feed, separator reject, filter product and final product samples were collected from a cement grinding circuit having conventional flow sheets and their quality developments were investigated. In addition, the ground separator feed and reject samples were mixed with the cement final product at varied proportions and their effects on the quality of cement were examined. Thus, the effects of fine grinding technology on this stream were tried to be assessed.

Studies at Bursa Cement Mill 1 showed that mixing of ground separator reject and final product 28-day strength value from 54.7 MPa (reference) to 55.5 MPa hence grinding technology could be used in that stream. Simulations regarding to energy utilization proved that in case the fine grinding technique was used on separator feed and reject streams, energy consumption would decrease by 12.93% and 3.63% respectively. For Bursa Cement Mill 4, it was found that the 28-day strength was increased from 51.4 MPa to 52.8 MPa with similar application. The energy saving in this case was calculated as 6.42% for the separator reject application.

As a result of the studies, it was determined that the use of fine grinding technology had positive effects on the circuit.

**Keywords:** Cement, Grinding, Fine Grinding, Energy

## TEŞEKKÜR

Tezimi 216M394 kodlu proje kapsamında maddi olarak destekleyen Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumuna (TÜBİTAK),

Numunelerin temininde sağladıkları yardım ve laboratuvar çalışmalarında gösterdikleri destek dolayısıyla Bursa Çimento A.Ş'ye,

Çalışmalarım süresince bölüm imkanlarından yararlanmamı sağlayan Maden Mühendisliği Bölüm Başkanlığı'na,

Lisans ve Yüksek Lisans çalışmalarım boyunca bilgi birikimi ve fikirleri ile gösterdiği sonsuz destek ve sabır için tez danışmanım Sayın Doç. Dr. Okay ALTUN'a,

Deneysel çalışmalarımda desteklerini esirgemeyen saygıdeğer hocalarım Dr. Nurettin Alper TOPRAK ve Dr. Deniz ALTUN'a,

Çalışmalarım sırasında gösterdiği özen ve yardımlarından dolayı çalışma arkadaşlarım Ergin Sarp ZENCİRCİ, Tolga SERT ve Okan ŞAHİN'e,

Her konuda maddi ve manevi desteklerini eksik etmeyen babam Haluk Recep KARAHAN, 2003 senesinde kaybettiğim fakat hep benimle olduğunu hissettiğim annem Sacide KARAHAN ve ablam Ecem KARAHAN'a,

En içten duygularım ve minnettarlığım ile teşekkürlerimi sunarım.

# İÇİNDEKİLER

|                                                                          |      |
|--------------------------------------------------------------------------|------|
| ÖZET .....                                                               | i    |
| ABSTRACT .....                                                           | iii  |
| TEŞEKKÜR .....                                                           | v    |
| İÇİNDEKİLER .....                                                        | vi   |
| ŞEKİLLER DİZİNİ .....                                                    | ix   |
| TABLolar DİZİNİ .....                                                    | xiii |
| 1. GİRİŞ .....                                                           | 1    |
| 2. GENEL BİLGİLER.....                                                   | 3    |
| 2.1. Çimento Üretimi .....                                               | 3    |
| 2.1.1. Basınç Dayanımı .....                                             | 4    |
| 2.1.2. Priz Süresi.....                                                  | 5    |
| 2.1.3. Su İhtiyacı .....                                                 | 5    |
| 2.1.4. Kızdırma Kaybı.....                                               | 6    |
| 2.1.5. İncelik.....                                                      | 6    |
| 2.2. Çimento Öğütme Devreleri.....                                       | 8    |
| 2.2.1. Bilyalı Değirmenler .....                                         | 8    |
| 2.2.2. Valsli Dik Değirmenler .....                                      | 9    |
| 2.2.3. Yüksek Basıncılı Merdaneli Değirmenler .....                      | 9    |
| 2.2.4. Havalı Sınıflandırıcılar .....                                    | 10   |
| 2.3. İnce Öğütme Ekipmanları.....                                        | 10   |
| 2.3.1. Jet Değirmenler.....                                              | 11   |
| 2.3.2. Sınıflandırıcılı Değirmenler.....                                 | 12   |
| 2.3.3. Karıştırırmalı Değirmenler .....                                  | 13   |
| 3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR .....                                             | 18   |
| 3.1. Örnekleme Çalışmaları .....                                         | 18   |
| 3.2. Malzeme Karakterizasyonu .....                                      | 22   |
| 3.2.1. Tane Boyu Dağılımlarının Belirlenmesi .....                       | 22   |
| 3.2.2. Malzeme Yüzey Alanın Ölçümü .....                                 | 24   |
| 3.2.3. Öğütülebilirlik İş İndeksi Tayini .....                           | 25   |
| 3.2.4. Çimento Kalitesini Ölçmeye Yönelik Gerçekleştirilen Testler ..... | 25   |
| 3.3. Modelleme Metotları.....                                            | 26   |

|                                                                                          |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.3.1. Bilyalı Değirmen ve Karıştırmalı Değirmen Modellenmesi .....                      | 26 |
| 3.3.1.1. Kırılma Dağılımının Belirlenmesi .....                                          | 27 |
| 3.3.2. Havalı Sınıflandırıcı ve Değirmen Filtresi Ekipmanlarının Modellenmesi .....      | 30 |
| 4. SONUÇLAR ve TARTIŞMA.....                                                             | 32 |
| 4.1. Örneklemeye Çalışmaları .....                                                       | 32 |
| 4.1.1. Bursa Çimento 1 No'lu Çimento Öğütme Devresi.....                                 | 32 |
| 4.1.2. Bursa Çimento 4 No'lu Çimento Öğütme Devresi.....                                 | 34 |
| 4.2. Deneysel Çalışmalar ve Sonuçları.....                                               | 35 |
| 4.2.1. Tane Boyu Analizleri.....                                                         | 35 |
| 4.2.1.1. 1 No'lu Çimento Öğütme Devresi.....                                             | 35 |
| 4.2.1.2. 4 No'lu Çimento Öğütme Devresi.....                                             | 37 |
| 4.2.2. Öğütülebilirlik .....                                                             | 39 |
| 4.2.3. Kırılma Dağılım Fonksiyonu.....                                                   | 39 |
| 4.2.4. Değirmen İçi Bilya Doluluğu Ölçümleri.....                                        | 41 |
| 4.2.4.1. 1 No'lu Çimento Öğütme Devresi.....                                             | 41 |
| 4.2.4.2. 4 No'lu Çimento Öğütme Devresi.....                                             | 41 |
| 4.2.5. Farklı Akış Kollarında Yürütülen Çimento Kalite Çalışmaları .....                 | 42 |
| 4.2.5.1. 1 No'lu Çimento Öğütme Devresi'nde Yürütülen Kalite Çalışmaları.....            | 45 |
| 4.2.5.2. 4 No'lu Çimento Öğütme Devresi'nde Yürütülen Kalite Çalışmaları.....            | 55 |
| 4.2.5.2.1. Değirmen Filtre Akış Kolu Üzerinde Yapılan Kalite Çalışmaları.....            | 66 |
| 4.2.5.2.2. Sınıflandırıcı Besleme Akış Kolu Üzerinde Yapılan Çalışmalar.....             | 69 |
| 4.2.5.2.3. Sınıflandırıcı Geri Dönüş Akış Kolu Üzerinde Yapılan Karışım Çalışmaları..... | 71 |
| 4.3. Madde Denkliği, Modelleme ve Simülasyon Çalışmaları .....                           | 75 |
| 4.3.1. Madde Denkliği Çalışmaları .....                                                  | 75 |
| 4.3.1.1. 1 No'lu Çimento Öğütme Devresi.....                                             | 76 |
| 4.3.1.2. 4 No'lu Çimento Öğütme Devresi.....                                             | 77 |
| 4.3.2. Modelleme ve Simülasyon Çalışmaları.....                                          | 78 |

|                                                                                  |     |
|----------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 4.3.3. 1 No'lu Çimento Öğütme Devresi'nde Karıştırmalı Değirmen Uygulaması ..... | 82  |
| 4.3.3.1. Sınıflandırıcı Geri Dönüşü Uygulaması .....                             | 84  |
| 4.3.3.2. Sınıflandırıcı besleme akışı uygulaması .....                           | 86  |
| 4.3.4. 4 No'lu Çimento Öğütme Devresi'nde Karıştırmalı Değirmen Uygulaması ..... | 89  |
| 4.3.4.1. Sınıflandırıcı Geri Dönüşü Uygulaması .....                             | 91  |
| 4.3.4.2. Sınıflandırıcı Besleme Akışı Uygulaması .....                           | 94  |
| 5. YORUM.....                                                                    | 97  |
| KAYNAKLAR .....                                                                  | 104 |
| ÖZGEÇMİŞ.....                                                                    | 110 |



## ŞEKİLLER DİZİNİ

|                                                                                                                                          |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 1. Sınıflandırıcı değirmen görünümü .....                                                                                          | 13 |
| Şekil 2. Yatay karıştırmalı değirmen görünümü.....                                                                                       | 14 |
| Şekil 3. Farklı öğütme sistemlerinin enerji harcamalarının kıyaslanması (Sepulveda, 1981).....                                           | 14 |
| Şekil 4. Karıştırmalı değirmenler ve bilyalı değirmenlerde tane boyu dağılımı ve enerji tüketimi arasındaki ilişki (Jankovic, 2013)..... | 16 |
| Şekil 5. 1 No'lu Çimento Öğütme Devresi'ne ait basitleştirilmiş akım şeması ..                                                           | 19 |
| Şekil 6. 4 No'lu Çimento Öğütme Devresi' ne ait basitleştirilmiş akım şeması .                                                           | 21 |
| Şekil 7. Soldan sağa Lazerli tane boyu ölçüm cihazı, rotap elek sallayıcı, havalı alpine elek.....                                       | 24 |
| Şekil 8. Blaine test düzeneği .....                                                                                                      | 24 |
| Şekil 9. Bond bilyalı değirmen .....                                                                                                     | 25 |
| Şekil 10. Ağırlık düşürme test düzeneği .....                                                                                            | 28 |
| Şekil 11. Karıştırmalı değirmen modeli için kullanılan sıkıştırılmış yatağın fotoğrafı.....                                              | 28 |
| Şekil 12. 1 No'lu Çimento Öğütme Devresi numune alma noktaları.....                                                                      | 33 |
| Şekil 13. 1 No'lu Çimento Öğütme Devresi değirmen içi numune alma noktaları .....                                                        | 34 |
| Şekil 14. 4 No'lu Çimento Öğütme Devresi numune alma noktaları.....                                                                      | 34 |
| Şekil 15. 1 No'lu Çimento Öğütme Devresi'ne ait devre etrafı ölçülen tane boyu dağılımları .....                                         | 36 |
| Şekil 16. 1 No'lu Çimento Öğütme Devresi'ne ait değirmen içi boyut dağılımları .....                                                     | 36 |
| Şekil 17. 4 No'lu Çimento Öğütme Devresi'ne ait devre etrafı ölçülen tane boyu dağılımları .....                                         | 37 |
| Şekil 18. Filtre ürün, sınıflandırıcı ince ve çimento son ürün kolları boyut dağılımları .....                                           | 38 |
| Şekil 19. 4 No'lu Çimento Öğütme Devresi'ne 2. kamara boyut dağılımları ....                                                             | 38 |
| Şekil 20. Bilyalı değirmen için hesaplanan tek tane kırılma fonksiyonu.....                                                              | 40 |

|                                                                                                      |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 21. Karıştırmalı değirmen için hesaplanan yatak testi kırılma fonksiyonu                       | 40 |
| Şekil 22. Değirmen kesiti .....                                                                      | 41 |
| Şekil 23. İnce öğütme teknolojisinin geri dönüş akışında kullanıldığı devre şeması .....             | 43 |
| Şekil 24. İnce öğütme teknolojisinin sınıflandırıcı besleme akışında kullanıldığı devre şeması ..... | 44 |
| Şekil 25. Laboratuvar ölçekli bilyalı değirmen (Bond değirmeni) .....                                | 44 |
| Şekil 26. 1 No'lu Çimento Öğütme Devresi kalite numuneleri boyut dağılımları                         | 46 |
| Şekil 27. 1 No'lu Çimento Öğütme Devresi, sınıflandırıcı besleme numuneleri boyut dağılımları .....  | 47 |
| Şekil 28. 1 No'lu Çimento Öğütme Devresi, sınıflandırıcı geri dönüşü boyut dağılımları .....         | 47 |
| Şekil 29. 1 No'lu Çimento Öğütme Devresi, çimento son ürün boyut dağılımları .....                   | 48 |
| Şekil 30. 1 No'lu Çimento Öğütme Devresi kalite dayanım sonuçları. ....                              | 50 |
| Şekil 31. 1 No'lu Çimento Öğütme Devresi'ne ait kalite ürünleri priz süreleri ...                    | 51 |
| Şekil 32. 1 No'lu Çimento Öğütme Devresi için hazırlanan karışımların tane boyu dağılımları .....    | 53 |
| Şekil 33. 1 No'lu Çimento Öğütme Devresi hazırlanan karışımların dayanım değerleri.....              | 53 |
| Şekil 34. 1 No'lu Çimento Öğütme Devresi hazırlanan karışımların priz süreleri .....                 | 54 |
| Şekil 35. 4 No'lu Çimento Öğütme Devresi kalite numuneleri boyut dağılımları. ....                   | 56 |
| Şekil 36. 4 No'lu Çimento Öğütme Devresi, sınıflandırıcı geri dönüşü boyut dağılımları.....          | 57 |
| Şekil 37. 4 No'lu Çimento Öğütme Devresi, sınıflandırıcı beslemesi boyut dağılımları.....            | 58 |
| Şekil 38. 4 No'lu Çimento Öğütme Devresi, çimento son ürünü boyut dağılımları .....                  | 58 |
| Şekil 39. 4 No'lu Çimento Öğütme Devresi, değirmen filtresi boyut dağılımları                        | 59 |
| Şekil 40. 4 No'lu Çimento Öğütme Devresi, çimento son ürün dayanım değerleri .....                   | 61 |

|                                                                                                                                                    |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 41. 4 No'lu Çimento Öğütme Devresi, sınıflandırıcı geri dönüş dayanım değerleri .....                                                        | 61 |
| Şekil 42. 4 No'lu Çimento Öğütme Devresi, filtre dayanım değerleri.....                                                                            | 62 |
| Şekil 43. 4 No'lu Çimento Öğütme Devresi, sınıflandırıcı besleme dayanım değerleri .....                                                           | 62 |
| Şekil 44. 4 No'lu Çimento Öğütme Devresi, çimento son ürün priz süreleri .....                                                                     | 63 |
| Şekil 45. 4 No'lu Çimento Öğütme Devresi, sınıflandırıcı geri dönüş priz süreleri .....                                                            | 63 |
| Şekil 46. 4 No'lu Çimento Öğütme Devresi, filtre numunesi priz süreleri .....                                                                      | 64 |
| Şekil 47. 4 No'lu Çimento Öğütme Devresi, sınıflandırıcı besleme priz süreleri.....                                                                | 64 |
| Şekil 48. 4 No'lu Çimento Öğütme Devresi'ne ait hazırlanan karışımların tane boyu dağılımları (filtre ve sınıflandırıcı ince).....                 | 67 |
| Şekil 49. 4 No'lu Çimento Öğütme Devresi'ne ait hazırlanan karışımların dayanım değerleri (filtre ve sınıflandırıcı incesi).....                   | 68 |
| Şekil 50. 4 No'lu Çimento Öğütme Devresi'ne ait hazırlanan karışımların priz süreleri (filtre ve sınıflandırıcı incesi).....                       | 68 |
| Şekil 51. 4 No'lu Çimento Öğütme Devresi'ne ait hazırlanan karışımların tane boyu dağılımları (sınıflandırıcı besleme ve çimento son ürün).....    | 69 |
| Şekil 52. Çimento son ürün – sınıflandırıcı besleme karışımı dayanım verileri                                                                      | 70 |
| Şekil 53. Çimento son ürün – sınıflandırıcı besleme karışım priz süreleri .....                                                                    | 70 |
| Şekil 54. 4 No'lu Çimento Öğütme Devresi'ne ait hazırlanan karışımların tane boyu dağılımları (sınıflandırıcı geri dönüş ve çimento son ürün)..... | 71 |
| Şekil 55. Çimento son ürün – 75 dk. öğütülmüş sınıflandırıcı geri dönüş karışımı dayanım sonuçları.....                                            | 72 |
| Şekil 56. Çimento son ürün – 75 dk. öğütülmüş sınıflandırıcı geri dönüş karışımı priz süreleri.....                                                | 72 |
| Şekil 57. Çimento son ürün – 120 dk. öğütülmüş sınıflandırıcı geri dönüş karışımı tane boyu dağılımı .....                                         | 73 |
| Şekil 58. Çimento son ürün – 120 dk. öğütülmüş sınıflandırıcı geri dönüş karışımı dayanım verileri .....                                           | 74 |
| Şekil 59. Çimento son ürün – 120 dk. öğütülmüş sınıflandırıcı geri dönüş karışımı priz süreleri.....                                               | 74 |
| Şekil 60. Madde denklığı sonucunda hesaplanan devre etrafı akış değerleri (t/sa).....                                                              | 76 |

|                                                                                                                                                |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Şekil 61. Madde denkliği sonucunda hesaplanan devre etrafı tane boyu dağılımları.....                                                          | 77  |
| Şekil 62. Madde denkliği sonucunda hesaplanan devre etrafı akış değerleri (t/sa) .....                                                         | 78  |
| Şekil 63. Madde denkliği sonucunda hesaplanan devre etrafı tane boyu dağılımları.....                                                          | 78  |
| Şekil 64. Karıştırmalı değirmen testi besleme ve ürün boyut dağılımları (Altun, 2013) .....                                                    | 79  |
| Şekil 65. Bursa Çimento 1 No'lu devre bilyalı değirmen model yapısı .....                                                                      | 80  |
| Şekil 66. Bursa Çimento 4 No'lu Devre bilyalı değirmen model yapısı .....                                                                      | 80  |
| Şekil 67. Karıştırmalı değirmene ait model yapısı.....                                                                                         | 81  |
| Şekil 68. 1 No'lu Çimento Değirmeni referans koşulu ölçülen ve hesaplanan boyut dağılımları .....                                              | 82  |
| Şekil 69. Bursa Çimento 1 No'lu değirmen referans koşulu simülasyon ekran görüntüsü.....                                                       | 83  |
| Şekil 70. 1 No'lu Çimento Öğütme Devresi sınıflandırıcı geri dönüşü karıştırmalı değirmen uygulaması. ....                                     | 85  |
| Şekil 71 1 No'lu Çimento Öğütme Devresi sınıflandırıcı beslemesi karıştırmalı değirmen uygulaması .....                                        | 87  |
| Şekil 72. Karıştırmalı değirmene ait boyut indirgeme değerleri.....                                                                            | 88  |
| Şekil 73. 4 No'lu Çimento Öğütme Devresi referans koşuluna ait ölçülen ve hesaplanan boyut dağılımları.....                                    | 89  |
| Şekil 74. 4 No'lu Çimento Öğütme Devresi'ne ait referans koşulu simülasyon ekran görüntüsü.....                                                | 90  |
| Şekil 75. 4 No'lu Çimento Öğütme Devresi sınıflandırıcı geri dönüşü karıştırmalı değirmen uygulaması. ....                                     | 91  |
| Şekil 76. Sınıflandırıcı geri dönüş malzemesi için karıştırmalı değirmene ait boyut küçültme ile özgül enerji tüketimi arasındaki ilişki ..... | 93  |
| Şekil 77. 4 No'lu Çimento Öğütme Devresi sınıflandırıcı beslemesinde karıştırmalı değirmen uygulaması.....                                     | 94  |
| Şekil 78. Aynı boyut indirgemesi değeri için, karıştırmalı değirmen besleme boyu ile özgül enerji tüketimi ilişkisi .....                      | 95  |
| Şekil 79. İnce öğütme teknolojilerinin çimento öğütme devrelerindeki kullanımı .....                                                           | 101 |

## TABLolar DİZİNİ

|                                                                                                        |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tablo 1. Çimentonun Standart Özellikleri .....                                                         | 4  |
| Tablo 2.1 No'lu Çimento Öğütme Devresi'nde yer alan değirmene ait teknik özellikler. ....              | 20 |
| Tablo 3. 1 No'lu Çimento Öğütme Devresi'nde yer alan havalı sınıflandırıcıya ait teknik bilgiler. .... | 20 |
| Tablo 4 .4 No'lu Çimento Öğütme Devresi'nde yer alan değirmene ait teknik özellikler. ....             | 21 |
| Tablo 5. 4 No'lu Çimento Öğütme Devresi'nde yer alan havalı sınıflandırıcıya ait teknik bilgiler. .... | 22 |
| Tablo 6. Boyut analizleri sırasında kullanılan tane boyları. ....                                      | 23 |
| Tablo 7. Ağırlık düşürme test düzeneğine ait teknik bilgiler .....                                     | 28 |
| Tablo 8. Sıkıştırılmış yatağın geometrisi .....                                                        | 28 |
| Tablo 9. Ağırlık düşürme düzeni ile gerçekleştirilen tek tane kırma test matrisi                       | 29 |
| Tablo 10. Ağırlık düşürme düzeni ile gerçekleştirilen yatak kırma test matrisi .                       | 29 |
| Tablo 11. 1 No'lu Çimento Öğütme Devresi örnekleme dönemi ortalama kontrol odası verileri.....         | 32 |
| Tablo 12. 4 No'lu Çimento Öğütme Devresi örnekleme dönemi ortalama kontrol odası verileri.....         | 35 |
| Tablo 13. Hammaddelere ait iş indeksi değerleri .....                                                  | 39 |
| Tablo 14 1. ve 2. kamara doluluk oranları .....                                                        | 41 |
| Tablo 15. 1. ve 2. kamara doluluk oranları .....                                                       | 41 |
| Tablo 16. Bilyalı Değirmen şarjına ait dağılım .....                                                   | 44 |
| Tablo 17. Numunelere ait kimyasal kompozisyonlar .....                                                 | 45 |
| Tablo 18. 1 No'lu Çimento Öğütme Devresi kalite test planı .....                                       | 46 |
| Tablo 19. 1 No'lu Çimento Öğütme Devresi numunelerine ait ürün özellikleri..                           | 49 |
| Tablo 20. 1 No'lu çimento öğütme devresi numunelerine ait su ihtiyacı verileri                         | 51 |
| Tablo 21.1 No'lu Çimento Öğütme Devresi karışım numuneleri reçeteleri .....                            | 52 |
| Tablo 22.Çalışmada kullanılan numunelere ait kimyasal kompozisyonlar.....                              | 55 |
| Tablo 23. 4 No'lu çimento öğütme devresi kalite test planı .....                                       | 56 |

|                                                                                                                                                    |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tablo 24. 4 No'lu Çimento Öğütme devresi kalite test planı .....                                                                                   | 59 |
| Tablo 25. 4 No'lu Çimento Öğütme Devresi numunelerine ait ürün özellikleri ..                                                                      | 60 |
| Tablo 26. 4 No'lu Çimento Öğütme Devresi'ne ait numunelerin incelik değerleri ve su ihtiyaçları .....                                              | 65 |
| Tablo 27. 4 No'lu Çimento Öğütme Devresi karışım numuneleri reçeteleri .....                                                                       | 66 |
| Tablo 28. Karıştırmalı değirmen testi deneysel koşulları .....                                                                                     | 79 |
| Tablo 29. Bursa Çimento 1 No'lu devre Değirmen filtresi ve havalı sınıflandırıcı model yapıları .....                                              | 80 |
| Tablo 30. Bursa Çimento 1 No'lu Devre Değirmen filtresi ve havalı sınıflandırıcı model yapıları .....                                              | 81 |
| Tablo 31. 1 No'lu Çimento Öğütme Devresi'ne ait referans koşulu güç tüketimleri ve özgül enerji değeri .....                                       | 84 |
| Tablo 32. Bursa Çimento 1 No'lu Çimento Öğütme Devresi'nde sınıflandırıcı geri dönüş uygulamasına ait güç tüketimleri ve özgül enerji değeri ..... | 86 |
| Tablo 33. 1 No'lu Çimento Öğütme Devresi'ne ait sınıflandırıcı besleme koşulu güç tüketimleri ve özgül enerji değeri .....                         | 88 |
| Tablo 34. 4 No'lu Çimento Öğütme Devresi'ne ait referans koşulu güç tüketimleri ve özgül enerji değeri .....                                       | 90 |
| Tablo 35. Bursa Çimento 4 No'lu devreye ait sınıflandırıcı geri dönüş akışı uygulaması güç tüketimleri ve özgül enerji değeri .....                | 93 |
| Tablo 36 Karıştırmalı değirmen testleri, Altun (2013) .....                                                                                        | 95 |
| Tablo 37. 4 No'lu Çimento Devresi'ne ait sınıflandırıcı besleme akışı uygulaması güç tüketimleri ve özgül enerji değeri .....                      | 96 |
| Tablo 38. 1 No'lu Çimento Öğütme Devresi'nden alınan numunelerle gerçekleştirilen test sonuçları .....                                             | 98 |
| Tablo 39. 4 No'lu Çimento Öğütme Devresi'nden alınan numunelerle gerçekleştirilen test sonuçları .....                                             | 98 |
| Tablo 40. 1 No'lu Çimento Öğütme Devresi üzerinde gerçekleştirilen simülasyon sonuçları .....                                                      | 99 |
| Tablo 41. 4 No'lu Çimento Öğütme Devresi üzerinde gerçekleştirilen simülasyon sonuçları .....                                                      | 99 |

## 1. GİRİŞ

Tüm cevher hazırlama süreçleri içerisinde, öğütme işlemi enerjinin en yoğun harcandığı birim işlem olarak tanımlanmaktadır. Bu bağlamda, bugüne kadar geliştirilen öğütme ekipmanlarında temel olarak, beslenen malzemenin istenilen ürün tane boyutuna indirilebilmesi için harcanan enerji miktarının en uygun değere getirilmesi hedeflenmiştir. Benzer şekilde, çimento üretiminde de harcanan enerji miktarını düşürmek amacıyla farklı öğütme teknolojileri ve akım şemalarından faydalanılmaktadır.

Çimento öğütme devrelerinde, her öğütme sürecinde olduğu gibi, enerji değerlerinin yanı sıra son ürünün kalite değerlerinin de belirli bir standarda sahip olması gerekmektedir. Genelde bu devreler, son ürünün incelik ve dolayısıyla kalite değerlerinin sağlanabilmesi amacıyla havalı sınıflandırıcı ile kapalı devre çalıştırılmaktadır. İstenen boya indirgenebilmiş taneler sınıflandırıcılar tarafından ürün silosuna gönderilirken, uygun boyut değerine sahip olmayan taneler tekrar öğütülmek amacıyla bilyalı değirmenlere geri döndürülmektedir. Ancak geri döndürülen tanelerin boyutunun, taze beslemeye kıyasla çok daha ince olduğu; bu nedenle 2 kamaralı bir bilyalı değirmen için, tanelerin ilk kamarada öğütülmeden yol alıp 2. kamaradan itibaren öğütülmeye başladığı düşünülmektedir. Bu duruma bir çözüm olarak, geri döndürülen malzeme öğütülerek, yeterli incelik ve kalite değerlerine ulaştırılabilirse devrenin üretim miktarında artış sağlanabileceği düşünülmektedir.

Ayrıca, çimento devresinde sadece geri dönüş malzemesi değil, farklı akış kollarından da belirli incelikte malzemenin bir kısmının öğütülerek son ürüne katılması mümkün olabilir. Bu akış kollarına örnek olarak, sınıflandırıcı beslemesi ve değirmen filtre çıkışı verilebilir. Belirtilen akış kollarından elde edilebilecek faydaların toplam devre performansında iyileşme sağlayacağı düşünülmektedir.

Tez çalışması kapsamında ince öğütme tekniğinin çimento öğütme devresindeki kullanım olanaklarının kalite ve enerji yönlerinden değerlendirilmesi ve belirtilen akış kollarının öğütülmesi sonrasında son ürüne katılması hipotezinin test

edilmesi ve yeni akım şemalarının geliştirilmesine yönelik farklı bir bakış açısının getirilmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla, Bursa Çimento Fabrikası'nda bulunan 1 ve 4 No'lu çimento öğütme devrelerinde bulunan farklı akış kollarından örnekler toplanmış ve toplanan bu numuneler farklı inceliklere öğütülerek, çimento kalite verileri üzerindeki etkiler değerlendirilmiştir. Akış kollarından toplanan numuneler hem kendi kalite gelişimlerinin hem de gerek görüldüğü durumlarda çimento son ürün akışıyla da karıştırılması neticesindeki kalite gelişiminin ne oranda değiştiğine dair veri setlerinin üretilmesi hedeflenmiştir. Bu kapsamda, laboratuvar ölçekli bilyalı değirmen (Bond değirmeni) ile öğütülen sınıflandırıcı besleme ve geri dönüş numunelerinin farklı oranlarda çimento son ürünü ile karıştırılması ve çimento özelliği yönünden (kalite) etkilerinin incelenmesi sağlanmıştır. Böylelikle ince öğütme teknolojisinin bu akış kollarında uygulanması neticesinde ne gibi etkiler olacağı değerlendirilmeye çalışılmıştır.

Çalışmanın son aşamasında ise, kalite değerlerinin izin verdiği ölçüde, ince öğütmenin sağladığı faydalar ortaya konulmuş ve sonrasında da uygulaması muhtemel devre şemaları değerlendirilerek enerjiyi daha verimli kullanabilen devreler oluşturulabileceği gösterilmeye çalışılmıştır. Akım şeması değerlendirme sürecinde bilgisayar yazılımından faydalanılmış ve ince öğütme tekniklerinden biri olan kuru karıştırmalı değirmen için pilot ölçekteki deneme sonuçları kullanılmıştır.

## 2. GENEL BİLGİLER

### 2.1. Çimento Üretimi

Klinker, en önemli yapı malzemelerinden biri sayılan çimentonun üretimindeki ara üründür. Bu ara ürün %3-6 oranında alçı taşı ve/veya uygun oran ve özellikte katkı maddeleri ile belirli bir inceliğe ulaşana kadar öğütülmektedir (Duda, 1976). Bu öğütme işleminden elde edilen ürün su ile temas ettiğinde sertleşebilen bir yapı oluşturmaktadır. Çimento üretimi için öncelikle ara ürün olan klinkerin üretilmesi gerekmektedir.

Klinker, istenilen reçeteye bağlı olarak farklı oranlarda kireçtaşı, kil ve demir cevherinin karıştırılıp öğütülmesi sonrasında, yüksek sıcaklıkta işletilen fırınlarda pişirilmesi ve soğutulması sonucunda elde edilmektedir (Duda, 1976). Çimento hammaddeleri boyut küçültme işleminden sonra belirli oranlarda karıştırılır ve farin değirmenlerinde öğütülür. Farin daha sonra kalsinasyon işlemi için döner fırınlara yönlendirilmektedir. Seri haldeki siklonlardan oluşan ön ısıtma kulelerinden geçiş yapan farin, döner fırından gelen sıcak hava sayesinde kısmen kalsine olmaktadır. Daha sonra farin, uzunluğu 50 ile 75 metre arasında, çapı ise 3 ila 7 metre arasında değişen, içi refrakter tuğla ile astarlanmış, dakikada 1,5 ila 4 devir yapan döner fırına beslenmektedir (Labahn, 1971). Döner fırından çıkan ürüne klinker adı verilmektedir. Basınçlı hava yardımıyla klinker soğutularak yaklaşık 80 °C'ye kadar düşürülmektedir.

Çimento üretimi prosesindeki son aşama, klinkerin bir miktar alçı taşı ile öğütülmesi işlemidir (Popovics, 1992). Çimentolara %5'in üzerinde mineral katkı katılması sonucu elde edilen katkılı Portland Çimentoları, katkı türleri ve miktarına bağlı olarak çok çeşitlidir. TS EN 197-1 standardı, CEM çimentoları 5 ana tip içerisinde toplanmaktadır.

- CEM I Portland çimentosu,
- CEM II Portland kompoze çimento,
- CEM III Portland yüksek fırın cürüflu çimento,
- CEM IV puzolonik çimento,
- CEM V kompoze çimento,

Yukarıda maddeler halinde verilen çimento çeşitleri kendi altlarında toplamda 27 farklı çimento tipini içermektedir (TS EN 197-1, 2012).

Çimentonun kimyasal, mineralojik ve fiziksel özellikleri, çimento hidratasyon hızını ve hidrolik aktivitesini etkilemektedir. Bunlara bağlı olarak değişen çimento kalitesini ölçebilmek için bir takım test yöntemleri uygulanmaktadır. TS EN 197-1 standardında test yöntemleri, basınç dayanımı, priz süresi, hacimsel sabitlik, su ihtiyacı, incelik, hidratasyon ısı ve kızdırma kaybını ölçmeye yönelik şekilde tanımlanmıştır.

### 2.1.1. Basınç Dayanımı

Standart basınç dayanımı TS EN 196-1’de belirtilen yöntem ile belirlenmektedir. Bu standart, çimento harcının basınç ve eğilme dayanımı tayini metodunu kapsamaktadır. Erken dayanım için 2 veya 7 günlük yaşlarda, standart dayanım için 28 günlük yaşta elde edilen değerler Tablo 1’de belirtilen standart değerlerden daha az olmamalıdır.

Tablo 1. Çimentonun Standart Özellikleri

| Dayanım Sınıfı | Basınç Dayanımı (MPa) |           |                         |
|----------------|-----------------------|-----------|-------------------------|
|                | Erken Dayanım         |           | Standart Dayanım        |
|                | 2 günlük              | 7 günlük  | 28 günlük               |
| 32,5 N         | -                     | $\geq 16$ | $\geq 32,5$ $\leq 52,5$ |
| 32,5 R         | $\geq 10$             | -         |                         |
| 42,5 N         | $\geq 10$             | -         | $\geq 42,5$ $\leq 62,5$ |
| 42,5 R         | $\geq 20$             | -         |                         |
| 52,5 N         | $\geq 20$             | -         | $\geq 52,5$ -           |
| 52,5 R         | $\geq 30$             | -         |                         |

Çimento dayanımı, 32,5, 42,5 ve 52,5 olmak üzere üç sınıfa ayrılmaktadır. Bu dayanım sınıfları TS EN 196-1 (2016)'ye göre belirlenen ve MPa olarak ifade edilen minimum 28 günlük basınç dayanım değerleridir. Ayrıca her standart dayanım sınıfı için iki erken dayanım sınıfı tanımlanmıştır. Bu amaçla N ve R sembolleri kullanılmakta; N, normal erken dayanım sınıfını, R ise yüksek erken dayanım sınıfını ifade etmektedir (TS EN 197-1, 2012).

### **2.1.2. Priz Süresi**

Çimentonun suyla birleştirildiği zaman ile, çimento hamurunun plastikliğini kaybederek katılaşmaya başladığı zaman arasında geçen süre “prizin başlama süresi” olarak tanımlanmaktadır. Priz alma aşağıda belirtilen iki temel adımda açıklanabilir:

1. İlk aşama, su ile çimentonun karıştırılmasını takiben ilk birkaç dakika içinde çimento tanelerinin fiziksel kuvvetlerin etkisi ile birleşmesi ve bu yapının eşzamanlı gelişen hidrat oluşumuyla sertleşmesidir.
2. İkinci aşama olan sertleşme, tanelerin birbirlerine değdikleri temas bölgelerinde hidratların oluşmasıyla meydana gelmektedir. Bu aşamada çimento hamurunun kohezyonundaki artış, oluşan hidrat jellerinin miktarı ile doğru orantılıdır.

Prizin başlama ve sona erme sürelerinin belirlenmesi amacıyla “Vicat” düzeneği kullanılmaktadır.

### **2.1.3. Su İhtiyacı**

Standart kıvamdaki çimento pastası, standart sondanın içine girmesine karşı belirli bir direnç gösterir. Böyle bir pasta için gereken su miktarı, farklı su miktarları ile hazırlanan pastaların içine sondanın girmesi denemeleri ile tayin edilir. Değişik miktarlarda su içeren pastalarla, sonda ve kalıbın altındaki taban plakası arasındaki mesafe ( $6\pm 1$ ) mm oluncaya kadar tekrar edilir. Standart kıvama gelen pastanın su miktarı normal kıvam için gerekli su miktarı olarak kaydedilir (TS EN 196-3, 2010).

#### 2.1.4. Kızdırma Kaybı

Uzun süre depolanmış, rutubete ve havaya maruz kalmış çimento başta içindeki serbest CaO ve MgO olmak üzere kısmen hidrate olur, daha sonra havanın etkisiyle karbonat formuna gelir. Çimentonun bayatlamaya başladığını gösteren bu tepkimelerin ne ölçüde yer aldığını anlamak için çimento 950-1000°C arasında ısıtılır ve ağırlık kaybı yüzde olarak belirlenir. Bu değer TS EN 197-1 (2012) standardında belirtilen %5'ten fazla olmamalıdır.

#### 2.1.5. İncelik

İncelik değeri, çimentonun hidratasyon hızını etkileyen en önemli faktörlerden biridir. Çimento inceliği arttıkça hidratasyon tepkimelerinin hızı artar, dolayısıyla dayanım daha hızlı gelişir. İnceliğin artması özellikle 2. ve 7. günlerdeki erken dayanımı etkilemektedir (Kosmatka, 1995).

İncelik; yüzey alanı ya da tane boyu dağılımı terimleriyle ifade edilmektedir. Dayanım sınıfı, 42.5 R olarak belirtilen bir Portland çimentosunun yüzey alanı genellikle 3300-3800 cm<sup>2</sup>/g değerleri arasındadır. Yüzey alanı, hava geçirgenliği prensibine dayanan Blaine yöntemi aracılığıyla belirlenmektedir. İnceliğin tane boyu olarak ifadesinde ise ya elek bakiyesi ya da tane boyu dağılımı kullanılır. Elek bakiyesinin tayininde farklı elek boyları kullanılmakla birlikte genel uygulamada 45 µm'luk test eleğinin kullanıldığı gözlemlenmektedir. Tane boyu dağılımı sedimentasyon, Coulter Counter, gibi yöntemlerle belirlenebilse de elek analizi ve ince tane boyları için lazer kırınımı yöntemi daha çok tercih edilmektedir (Bye, 1999). Çimentonun tane boyu dağılımı yaygın olarak Rosin Rammler ve Gates-Gaudin-Schuhmann eşitlikleriyle ifade edilmektedir.

Çimentonun hidratasyon hızını, su ihtiyacını, priz süresini, erken ve geç dayanımını etkileyen en önemli parametre tane boyu dağılımıdır. En iyi sonuçların 3-30 µm tane boyu dağılımına sahip örneklerde alındığı, özellikle 60 µm'dan iri tanelerin dayanıma herhangi bir katkıda bulunmayıp sadece "dolgu etkisi" yarattıkları bildirilmektedir (Škvára ve ark., 1981). Tsivilis ve ark. (1990), istenen ürün kalitesine ulaşabilmek için çimentonun dik tane boyu dağılım

eğimine sahip olması ve bu dağılımda 3-32  $\mu\text{m}$  fraksiyonunun %65'ten fazla, 3  $\mu\text{m}$ 'dan ince tanelerin yaklaşık %10'dan az ve özgül yüzey alanının 2500-3000  $\text{cm}^2/\text{g}$  Blaine değeriine sahip olması gerektiğini bildirmekte, hatta en etkili fraksiyonun 16-24  $\mu\text{m}$  olduğunu iddia etmektedirler. Tane boyu dağılımındaki 3-5  $\mu\text{m}$ 'dan ince tanelerin miktarındaki artış, erken dayanımda etkin olsa da prizlenme, istenmeyen hacimsel değişiklikler, reolojik özelliklerde bozukluklar gibi problemleri de beraberinde getirmekte ve üstelik bu ince fraksiyonun geç dayanıma bir katkısı olmamaktadır (Škvára ve ark., 1981). Tane boyu dağılımının dar ya da geniş olması da imento özelliklerini etkilemektedir. Geniş tane boyu dağılımı, su ihtiyacının az ve paketleme yoğunluğunun yüksek olması ile avantajlı olurken, dar tane boyu dağılımında hidratasyon hızı daha yüksektir. RRSB (Rosin-Rammler-Sperling-Bennett) dağılım eğrisi eğiminin, n, 1'e eđit olduğu durumdaki tane boyu dağılımının en uygun dağılım olduğu şeklinde açıklamalar mevcuttur (Aiqin ve ark., 1999). Tane boyu dağılımının eğimi, n, arttıkça dayanımın azaldığı görölmüştür. Bu durum malzemenin dar bir tane boyu dağılımına sahip olması ve artan su ihtiyacından kaynaklanmaktadır. (Kuhlmann ve ark., 1985).

Sun ve ark. (2013) ince öğütmenin dayanım üzerine etkilerini, uçucu kül ve kalkerin farklı oranlarda katıldığı ve öğütöldöğü reçeteye bağlı olarak incelemiştir. Bu bağlamda, aynı reçete için ince öğütmenin özellikle ilk dayanım üzerine etkisinin daha belirgin olduğu, son dayanımlar için ise benzerlik gösterdiği anlaşılmıştır. Katkılardan traslı çimentoda, öğütme işleminin daha ince tane boyu üretimine bağlı olarak ürün özelliklerini iyileştirdiği belirlenmiştir. Bu etkinin %35 tras içerikli imento için daha belirgin olduğu anlaşılmıştır (Ghiasvand, 2014). Çimento üretiminde kullanılan bir diğer katkı da uçucu küldür. Zhao ve ark. (2015) araştırmalarında öğütölmüş uçucu külün çimentoya katılması ile dayanım değeriinde %10'a kadar artışın sağlanabildiğini tespit etmiş ve bu yolla kalitenin iyileştirilebileceğini belirtmişlerdir.

## 2.2. Çimento Öğütme Devreleri

Boyut küçültme işlemi tanelerin kırılmasına dayanmaktadır. Kırıcılar, bilyalı değirmenler gibi değişik ekipmanlarda malzemeye farklı şekilde yükleme yapıldığı için, taneciklere farklı sayılarda ve farklı yönlerde kuvvetler etki etmektedir; dolayısıyla deformasyon hızları da farklı olmaktadır (Schönert, 1986).

Bilindiği gibi tüketilen enerjinin çok küçük bir kısmı boyut küçültme için harcanmaktadır. Enerjinin bir kısmı elastik ve plastik deformasyona, kristal yapının yeniden düzenlenmesine, fiziko-kimyasal reaksiyonlara ve yeni yüzey oluşumuna harcanmaktadır (Shall, 1980). Bunların dışında, enerji fiziksel olarak, sürtünmelere, ses, ısı ve kinetik enerjiye, öğütme ortamında meydana gelen aşınmalara ve deformasyonlara dönüşmektedir (Austin, 1984).

Tanelerin kırılması belli bir olasılık dâhilinde gerçekleşmektedir. Tanelerin kırılması, tanelerin kırılma bölgesine taşınmaları ile mümkündür. Tanelerin kırılma bölgesine taşınma olasılıkları, tane büyüklüğüne, öğütücü ortamın büyüklüğüne, iç sürtünmelere, değirmen içindeki akışkanlığa, tanelerin taşınma hızına ve topaklanmasına bağlıdır (Toprak, 2015).

Çimento endüstrisinde klinker öğütmek için yaygın olarak iki kamaralı bilyalı değirmenler kullanılmaktadır. Son yıllarda farklı öğütme ekipmanları, yüksek basınçlı merdaneli değirmenler, dik değirmenler çimento endüstrisinde öğütme işleminde yer almaya başlamıştır.

### 2.2.1. Bilyalı Değirmenler

Bilyalı değirmenler uzun yıllardır öğütme işlemlerinde kullanılmaktadır. Bu tip değirmenler uzunluk/çap ( $L/D$ ) oranlarına göre karakterize edilmişlerdir ve enerjinin en verimli kullanılabileceği uzunluk çap oranı üç ( $L/D=3$ ) olarak belirlenmiştir (Schnatz, 2000). Yüksek düzeyde operasyonel güvenilirlik ve kullanılabilirliği sebebiyle, çimento fabrikalarında en sık kullanılan öğütme ekipmanıdır.

Çimento üretiminde genellikle iki kamaralı bilyalı değirmenler kullanılmaktadır. Kamaralar aradaki sınıflandırıcı diyaframla birbirinden ayrılmaktadır. Diyaframın tasarımı öğütülen malzemenin inceliğini etkilemektedir (Duda, 1976). Çimento değirmenleri için farklı şekillerde değirmen astarları geliştirilmiştir. Kaldırma plakaları; bilyaları belirli bir yüksekliğe kaldırarak, bilyaların serbest düşme hareketiyle tanelere çarparak tanelerin kırmasını sağlamaktadır. Sınıflandırıcı plakalar ise, bilyaları değirmen girişinden çıkışına doğru, iriden inceye doğru sınıflamaktadır.

### **2.2.2. Valsli Dik Değirmenler**

Valsli dik değirmenler düşük enerji tüketimleri ve işletim kolaylıkları nedeniyle uzun yıllardır çimento endüstrisinde öğütülmesinde kullanılmaktadır. Bu tip değirmenler, klinker öğütülmesinde ön öğütme veya son öğütme ekipmanı olarak da kullanılmaktadırlar (Shimoide, 1996).

Valsli dik değirmenlerin kullanımı çeşitli dezavantajları nedeniyle sınırlı kalmıştır. Bu tip değirmenlerin öğütme enerjisinden sağladığı tasarruf, fanlar tarafından harcanan enerji ile dengelenmiştir. Valsli dik değirmenlere dair diğer bir sorun ise, valslerin aşınma hızıdır. Öğütülen malzeme tipine ve miktarına bağlı olarak valsler çok çabuk aşınabilmektedir (Nobis, 2001).

### **2.2.3. Yüksek Basıncılı Merdaneli Değirmenler**

Yüksek basınçlı merdaneli değirmenlerde, malzeme birbirine ters yönde dönen iki merdane arasında sıkıştırılarak öğütülmektedir. Besleme merdaneler boyunca eşit dağıtılır. Bu değirmenler çok ince olmayan düşük nem içeriğine uygun sahip malzemeler için uygundur. Bu tip değirmenlerin ön ezici olarak kullanılmalarıyla toplam öğütme enerjisinde %20'lik bir azalma sağladığı belirtilmiştir (Kellerwessel, 1996). Yüksek basınçlı merdaneli değirmenlerin havalı sınıflandırıcı ile kapalı devre çalıştırılarak nihai ürün elde edilmesi, %50'ye varan enerji tasarrufları sağlamaktadır (Kellerwessel, 1996). Fakat yüksek basınçlı merdaneli değirmenlerle nihai çimento üretildiğinde, elde edilen ürünün dar tane boyu dağılımına sahip olması nedeniyle, harç yaparken su ihtiyacının arttığı gözlemlenmiştir (Odler, 1995).

#### **2.2.4. Havalı Sınıflandırıcılar**

Havalı sınıflandırıcılar çimento öğütme devrelerinde kapalı devre verimliliği için önemli bir bileşendir. Dinamik ve statik olmak üzere iki tip havalı sınıflandırıcı vardır. Statik sınıflandırıcılarda dinamik sınıflandırıcılardan farklı olarak hiçbir hareketli parça bulunmamaktadır. Sınıflandırma işlemi havanın şiddetinin ve yönünün değiştirilmesi ile yapılmaktadır. Statik sınıflandırıcıların verimlilikleri, dinamik sınıflandırıcılara göre daha düşüktür (Benzer, 2006).

Dinamik sınıflandırıcıların ise hem hareketli hem de hareketsiz parçaları mevcuttur. Sınıflandırma bölgesinden beslenen taneler temel olarak, dağıtma tablasının hareketinden kaynaklanan merkezci kuvvetin, yukarı yönlü hava akışının ve yer çekimi kuvvetinin etkisinde kalmaktadırlar. Dinamik sınıflandırıcılar temelde birinci, ikinci ve üçüncü nesil olmak üzere üç ana grup altında toplanmaktadır. Birinci nesil dinamik sınıflandırıcıların düşük maliyetli olmaları bir avantaj olsa da, kaçak miktarlarının yüksek olması düşük verimliliğe neden olmaktadır.

İkinci nesil havalı sınıflandırıcıların çalışma ilkeleri de birinci nesil dinamik sınıflandırıcılarla aynıdır; fakat sınıflandırıcı içinde hava akışını sağlamak için harici bir fan ve ince taneleri çıkarmak için ayrıca bir siklon kullanılmaktadır. Hava ve rotor hızları ayrı ayarlanabildiği için ürün inceliğini kontrol etmek daha kolaydır.

Üçüncü sınıf dinamik sınıflandırıcılar yüksek verimli ekipmanlardır. Bu tip sınıflandırıcılar ile birlikte, ekipmana beslenen taneler çok daha iyi dağıtılabilmektedir. Bu sayede bağlı olan tanelerin tek bir ağır kütle gibi davranıp kaçağa sebep olmasının önüne geçilmiştir.

#### **2.3. İnce Öğütme Ekipmanları**

Çimento üretimi yoğun bir enerji kullanım sürecine sahiptir. Günümüzde çimento üreticileri, yüksek kaliteli ürün ve yüksek üretim kapasitelerine olan talep gittikçe arttıkça mevcut çimento öğütme devrelerinin operasyonel

sınırlarını zorlamaktadır. Bu koşullar, zaten verimsiz öğütme devrelerinin daha da verimsiz çalışmasına neden olmaktadır. Bu durumun yenilikçi çözümler getirilerek aşılacağı düşünülmektedir.

Tesislerde kullanılan mevcut ekipmanlarla (bilyalı değirmenler) malzemeleri ekonomik olarak çok ince boyutlara öğütmenin fiziksel olarak mümkün olmaması nedeniyle ince öğütme ekipmanlarına olan ilgi artmaktadır. Literatürde ince öğütme 100  $\mu\text{m}$  ile sınırlandırılmışken (Jankovic, 2003) çok ince öğütme 40  $\mu\text{m}$  altı olarak belirtilmekte (Beke, 1981) ve bu değer kimi uygulamalar için 3 $\mu\text{m}$  altına kadar inebilmektedir. İnce ve çok ince öğütme farklı endüstriler tarafından tercih edilmektedir. İlaç, gıda, boya, plastik ve kablo bu endüstriler arasında sayılmaktadır. Birçok tesisin akım şeması incelendiğinde, öğütme işleminin verimsiz olan bilyalı değirmenlerde gerçekleştirildiği ve yeni teknolojilerin uygulama alanı bulmasının oldukça güç olduğu anlaşılmaktadır. Literatürde, bilyalı değirmene verilen toplam enerjinin sadece %2'sinin öğütmede kullanıldığı, kalan miktarın ise ses, ısı ve titreşim olarak kaybolduğu belirtilmektedir (Austin, 1984). Bilyalı değirmenler, 3500  $\text{cm}^2/\text{g}$  Blaine değerine sahip çimento için, malzemenin sertliğine göre 32 – 37  $\text{kWsa/t}$  arasında enerji tüketmektedir (Seebach ve ark., 1996). Verimsizliklerinin yanı sıra, ince tane üretimi de bilya boyunun belirli bir boyutun altına inememesi nedeniyle (19 mm), sınırlı olmaktadır. Bu nedenle, bilyalı değirmenlerin belirli bir boyun altında verimsizliğinin arttığı noktada farklı teknolojiler uygulamaya konulmuştur.

### **2.3.1. Jet Değirmenler**

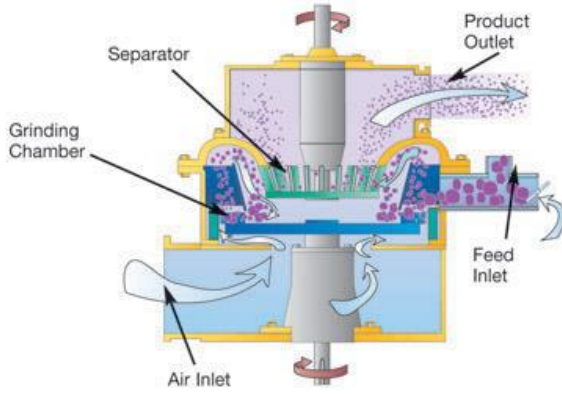
İnce öğütme alanında kullanılan bir diğer ekipman, jet değirmenler ya da akışkan enerjili değirmenlerdir. Bu değirmenlerde öğütücü ortam bulunmamaktadır. Öğütülecek olan taneler değirmende bulunan uçlardan (nozzle), basınçlı gaz ya da buhar yardımıyla yüksek hızlarda hazneye beslenmektedir. Öğütme işlemi de enerji kazanan tanelerin birbirleriyle ve değirmen astarı ile çarpışması sonucunda gerçekleşmektedir. Öğütme işleminde bilya kullanılmaması, öğütülen malzemenin demir kirlenmesini minimize etmekte bu nedenle de ilaç, boya ve kâğıt endüstrilerinde tercih edilmektedir. Jet değirmenlerin ürünlerinin inceliği, değirmen içerisinde bulunan

sınıflandırıcı yardımı ile ayarlanabilmektedir. Sınıflandırıcının bulunması bazı avantajları da beraberinde getirmektedir. Bunlardan en önemlisi, ince taneler sistemden hemen uzaklaştırıldığından dolayı, ürün boyut dağılımının dar olmasıdır. Bu özellik birçok uygulamada ekipman kullanımını avantajlı kılmaktadır. Bir diğer avantajı da ürün boyunun kontrolünün yapılabilmesidir. Sınıflandırıcı rotor hızı ve kullanılan hava ile maksimum ürün boyu rahatlıkla kontrol edilebilmektedir. Bu değirmenlerde 5-10 µm tane boyunun altına malzemelerin indirilebildiği belirtilmektedir (Müller ve ark. 1996).

Değirmenin en büyük dezavantajı ise kapasitelerinin düşük olması, bir diğer değişle yüksek birim enerji tüketimidir. Ancak bu tür bir yorum, kendisinden sonra gelen prosese olan katkısıyla ölçülmelidir. Kalite ya da zenginleştirme işlemlerinde kayda değer bir iyileştirme, enerji harcamasını ikinci plana atacaktır.

### **2.3.2. Sınıflandırıcılı Değirmenler**

Sınıflandırıcılı değirmenler (Şekil 1), çalışma prensibi olarak, akışkan enerjili değirmenlerden farklı olsa da öğütme ve sınıflama işlemlerini tek bir ekipmanda birleştirmesinden dolayı bu teknolojiyle benzerlik göstermektedir. Bu değirmenlere besleme, boru aracılığıyla yerçekimi ile ya da hava ile taşınarak yapılmaktadır. Öğütülecek malzeme öncelikle döner kılavuz halkaya beslenmektedir. Buraya gelmeden önce ise sınıflandırıcıda ön bir sınıflama işlemine tabi tutulmaktadır. Böylelikle yeterli incelikteki tanelerin değirmen haznesinden uzaklaştırılması sağlanmış olur. İri taneler ise, döner halka üzerine gelmekte ve kenarlara doğru hızlandırılmaktadır. Öğütme işlemi, hızlandırılan tanelerin halka etrafında bulunan çarptırıcı kanatlara hızla vurdurulması işlemleri gerçekleştirilmektedir. Çarptırılan taneler, hava yardımıyla sınıflandırıcı bölgesine taşınmakta ve taneler tekrar sınıflandırmaya maruz kalmaktadırlar. Değirmenden çıkan ince taneler sistem filtresinde toplanmakta ve burada hava ile ayırımı gerçekleştirilmektedir. Sınıflandırıcıdan dönen iri taneler değirmene tekrar öğütme için geri beslenmektedir. Bu öğütme sisteminde taneler hemen sınıflandırıldığı için ince tane birikmesi olmamakta ve dar bir boyut dağılımına sahip ürün elde edilmektedir.



Şekil 1. Sınıflandırıcılı değirmen görünümü

Literatürde, bu öğütme sisteminde 9-200  $\mu\text{m}$  aralığında malzeme üretebildiği belirtilmektedir. Bu sistemin birçok avantajının olduğu anlaşılmıştır. Bunlar;

- Aşınan ya da performans kaybı oluşan malzemelerin kolay değişimi
- Yeterli incelikte malzeme üretecek seviyede sınıflandırıcı performansı
- Sistemin az yer kaplaması
- Kolay temizlenebilme

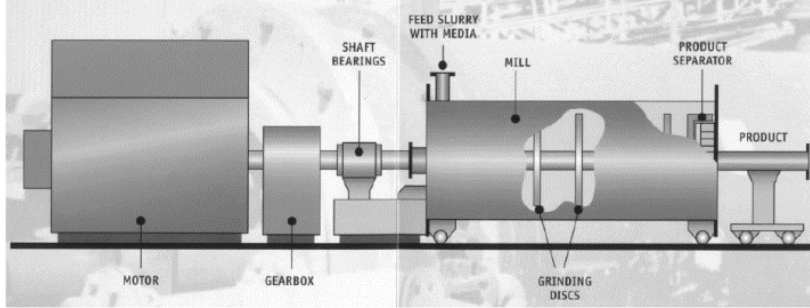
olarak sıralanmaktadır.

### 2.3.3. Karıştırmalı Değirmenler

Karıştırmalı bilyalı değirmenler birim zaman ve hacimde açığa çıkan enerji miktarının çok yüksek olması nedeniyle, bu tip ekipmanlarda özgül enerji tüketimi geleneksel bilyalı değirmenlerle kıyaslandığında oldukça düşük seviyededir. Karıştırmalı bilyalı değirmenler, ince öğütmede etkili öğütücüler olmakla birlikte konvansiyonel değirmenlere ve diğer ince öğütme ekipmanlarına göre sadece düşük enerji sarfiyatı açısından avantajlı olmayıp, kolay işletim, basit kurulum ve malzemenin öğütme ortamı tarafından az kirlenmesi sebebiyle büyük önem kazanmıştır. Yapılan bazı çalışmalarda çimentonun, bakırın, kömürün, albitin, kalsitin öğütülmesinde karıştırmalı değirmenlerin öğütme performansı üzerindeki etkileri araştırma konusu olmuştur. (Pilevneli, 2003; Dikmen, 2008; Gökçen, 2010; Altun, 2013).

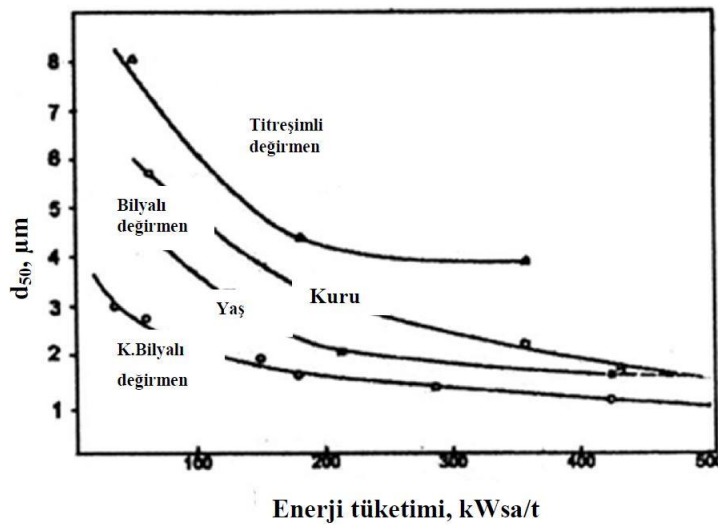
Karıştırmalı değirmenlerde öğütme işlemi, şaftın üzerine monte edilmiş karıştırıcıların, değirmen haznesinde bulunan ince boydaki bilyaları karıştırması

ve bu hazneden geçen malzemelerin karıştırılan bilyalar tarafından öğütülmesi ile gerçekleşmektedir (Şekil 2).



Şekil 2. Yatay karıştırılmalı değirmen görünümü

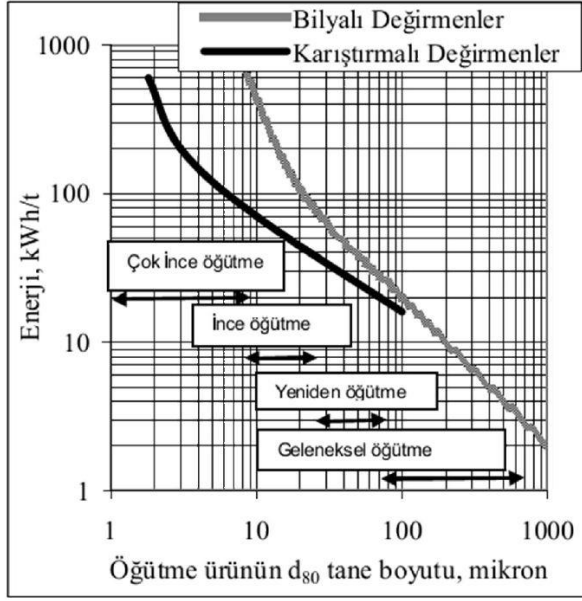
Değirmen çıkışında, bilyaların değirmen haznesinde kalmasını sağlayan, ürün ayırıcı adı verilen bir yapı bulunmaktadır. Bu kafesli bir rotor olup, yüksek hızda dönmesi neticesinde bilyaları kenara savurmakta ve hazne içerisinde tutmakta iken, sadece malzeme çıkışına izin vermektedir. Değirmen dizaynı incelenecek olursa hem yatay hem de dikey örnekleri bulunmaktadır (Jankovic, 1999). Bu öğütme sisteminin diğer sistemlerle karşılaştırılması birçok çalışmaya konu olmuştur. Diğer öğütme yapan cihazlara göre işletimi daha kolay, öğütme süresi ve enerji tüketimi daha azdır. Şekil 3'te Sepulveda (1981) tarafından yapılan incelik-özellik enerji grafiği verilmektedir.



Şekil 3. Farklı öğütme sistemlerinin enerji harcamalarının kıyaslanması (Sepulveda, 1981)

Karıştırmalı bilyalı değirmenler çok ince taneleri üretmek için zaman ve hacim başına düşen stres sayısının çokluğu ve uygun stres yoğunluğunu, aktarılan ortam ve titreşimli değirmenlere göre daha az enerji tüketimiyle sağlarlar. İnce ve çok ince tanelere ihtiyacın artmasıyla, karıştırmalı bilyalı değirmenlerin diğer değirmenlere göre avantajlı olması, önemini hızla arttırmaktadır (Kwade, 1999). Çalışma prensibinden dolayı karıştırmalı bilyalı değirmenlerde etkin olan kuvvetler, bilyalı ve çubuklu gibi aktarılan ortamlarla çalışan değirmenlerden farklıdır. Aktarılan ortamlarla çalışan değirmenlerde öğütme büyük ölçüde çarpma ve basınçla, kısmen de aşındırma kuvvetleri ile olurken; karıştırmalı bilyalı değirmenlerde aşındırma ve makaslama kuvvetleri, çarpmayla birlikte ağırlıklı olarak yer almaktadır (Gao and Forssberg, 1995). Bilyalı değirmenlerde tambur hareket ettirilirken, karıştırmalı bilyalı değirmenlerde yalnızca bir karıştırıcı yardımı ile ortam hareket ettirilmektedir. Bu sayede değirmen içerisinde birim zaman ve hacimde açığa çıkan enerji miktarı tamburlu değirmenlerle karşılaştırıldığında oldukça yüksek olmaktadır. Çünkü tamburlu değirmenlerde enerjinin büyük bir bölümü tamburu hareket ettirmek için kullanılmaktadır. Genellikle 100  $\mu\text{m}$ 'nin altındaki öğütmelerde enerji tüketiminin geleneksel değirmenlere göre daha az olduğu belirtilmektedir (Pilevneli, 2003; Hacıfazlıoğlu, 2009).

Karıştırmalı bilyalı değirmenlerde ve bilyalı değirmenlerde tane boyutu ile enerji tüketimi arasındaki ilişki Şekil 4'te verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi, geleneksel bilyalı değirmenler kullanılarak malzemeleri ince boyutlara (-75  $\mu\text{m}$ ) ekonomik olarak (enerji açısından) öğütme mümkün iken; çok ince boyutlara (-30  $\mu\text{m}$ ) ekonomik olarak öğütmek mümkün değildir (Jankovic, 2003).



Şekil 4. Karıştırmalı değirmenler ve bilyalı değirmenlerde tane boyu dağılımı ve enerji tüketimi arasındaki ilişki (Jankovic, 2013)

Yukarıda adı geçen öğütme teknolojileri ince öğütmenin istendiği uygulamalarda tercih edilmektedir. Çimento öğütme devresinde de ince öğütmenin faydalarının tespitinin ardından bu teknolojilerin kullanım olanakları değerlendirilebilecek ve enerji veriminin iyileştirilebileceği devre alternatifleri geliştirilebilecektir. Pilevneli (2003) ve Altun (2013) ince öğütmenin çimento devresindeki muhtemel kullanımı ve devre uygulamaları üzerine çalışmış ancak kalite yönünden değerlendirmelerde bulunmamışlardır. Bu tez çalışması ile bu eksikliğin kapatılması planlanmıştır.

Literatür incelendiğinde, çimentonun ince öğütülmesinin kalite verileri üzerindeki etkilerinin tartışıldığı ancak farkı devre tiplerinde, enerji harcaması ve üretim tonajı değerleri yönlerinden ne gibi etkilerinin olacağının araştırılmadığı anlaşılmaktadır. Bu tez çalışması kapsamında, ilk olarak, çimento devresinde bulunan sınıflandırıcının geri dönüş akışı, değirmen çıkışında bulunan filtrenin ürünü ve son ürün kollarından numuneler alınarak öğütülmüş ve öğütülme işlemi sonucunda da kalite üzerinde ne gibi etkilerinin olduğunun belirlenmesi amaçlanmıştır. Böylelikle, çimento öğütme işleminde harcanan enerjinin azaltılıp azaltılamayacağı incelenerek literatürdeki bu eksikliğin giderilmesi hedeflenmiştir. Ayrıca, ince öğütme teknolojisinin kullanılmasının hedeflendiği

sınıflandırıcı besleme ve geri dönüş akışlarının laboratuvar ortamında öğütüldükten sonra farklı oranlarda çimento son ürünü ile karıştırılması ve ince öğütme uygulamasının kalite yönünden değerlendirilmesi de hedeflenmiştir. Kalite yönünden herhangi bir olumsuzluğun olmadığına anlaşıldığının ardından Altun (2013) tarafından yürütülen doktora tezi çalışmasının neticesinde ortaya çıkan kuru ince karıştırmalı değirmen verileri kullanılarak belirlenmiş hedef incelikler bazında hesaplamalar yapılarak ince öğütme teknolojisinin belirlenen noktalardaki kullanımının etkileri tespit edilmiştir.



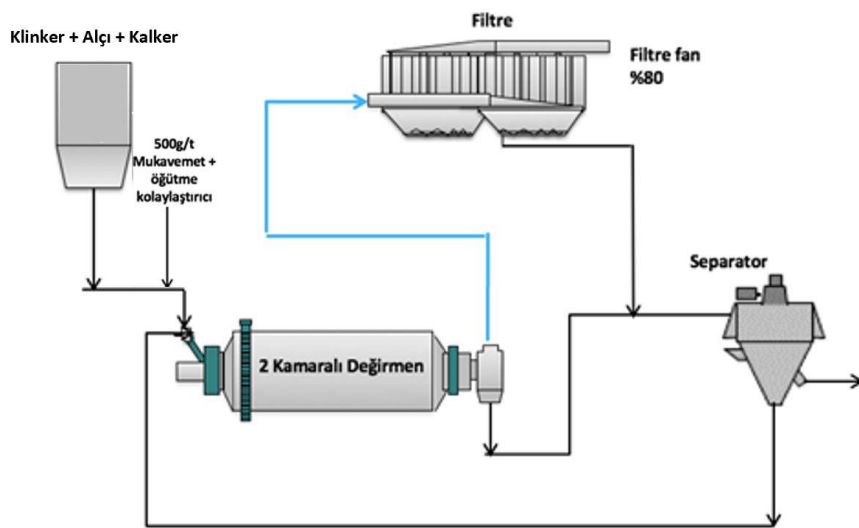
### 3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu çalışma kapsamında, Bursa Çimento Fabrikası'na ait 1 No'lu ve 4 No'lu öğütme devrelerinde CEM I 42.5R tipi çimento üretiminde birtakım çalışmalar yürütülmüştür. İlk olarak, devreler kararlı durumda çalışırken numune toplama işlemleri gerçekleştirilmiştir. Sistem çalışırken devre etrafından ve ani duruş sonrasında da değirmen içerisinden numuneler alınmıştır. Sonrasında malzeme karakterizasyonu işlemlerine geçilmiştir. Bu kapsamda, alınan numunelerin boyut dağılımları, elek analizi ve lazerli boyut analizi yöntemleri kullanılarak en üst boylarından 1,8 µm mertebesine kadar belirlenmiştir. Bir diğer karakterizasyon tekniği de çimento hammaddelerinin iş indeksi değerlerinin tespit edilmesidir. Bu bağlamda, besleme hammaddelerine standart Bond testi yapılmıştır. Karakterizasyon çalışmalarının ardından boyut dağılımları ve kontrol odası tonaj değerleri kullanılarak madde denklığı yapılmış ve devredeki tüm kolların akış değerleri hesaplanmıştır. Öğütme devreleri üzerinde bu denli detaylı çalışmaların yürütülmesindeki amaç, toplam değerlendirme sırasında simülasyon tekniği ile ince öğütme teknolojisi kullanımının faydalarının tam anlamıyla tanımlanabilmesini sağlamaktır.

#### 3.1. Örneklem Çalışmaları

Kapalı devre çimento öğütme devreleri düşünüldüğünde, sınıflandırıcıların oldukça yüklü bir şekilde çalıştıkları, bunun neticesinde de devreden yük miktarının arttığı anlaşılmaktadır. Çalışmanın önemli hedeflerinden biri de sınıflandırıcıdan geri dönen malzemenin öğütülüp çimento son ürününe karıştırılması ve bunun neticesinde de devrede hem enerji hem de üretim miktarı anlamında iyileşme sağlanmasıdır. Çalışma kapsamında, sınıflandırıcıdan geri dönen malzemenin yanı sıra, sınıflandırıcı besleme, değirmen filtre malzemesi ve son ürün üzerinde de çalışmalar yürütülmüştür. Son ürün dışında yürütülen test çalışmalarında, devre akım şemasına uygun olacak şekilde çimento denemeleri planlanmış ve yapılmıştır. Çimento öğütme devresinde ince öğütme tekniğinin sınıflandırıcıdan geri dönen ya da sınıflandırıcıya beslenen malzeme için kullanılması durumunda, buradan elde

Örnekleme çalışmaları Bursa Çimentosu Fabrikası'nda halihazırda çalışan iki farklı öğütme devresinde (1 ve 4 No'lu Çimento Öğütme Devresi) CEM I 42.5 R tipi çimento üretimi sırasında gerçekleştirilmiştir. 1 ve 4 No'lu Çimento Öğütme Devrelerine ait basitleştirilmiş akım şemaları Şekil 5 ve Şekil 6'da verilmektedir.



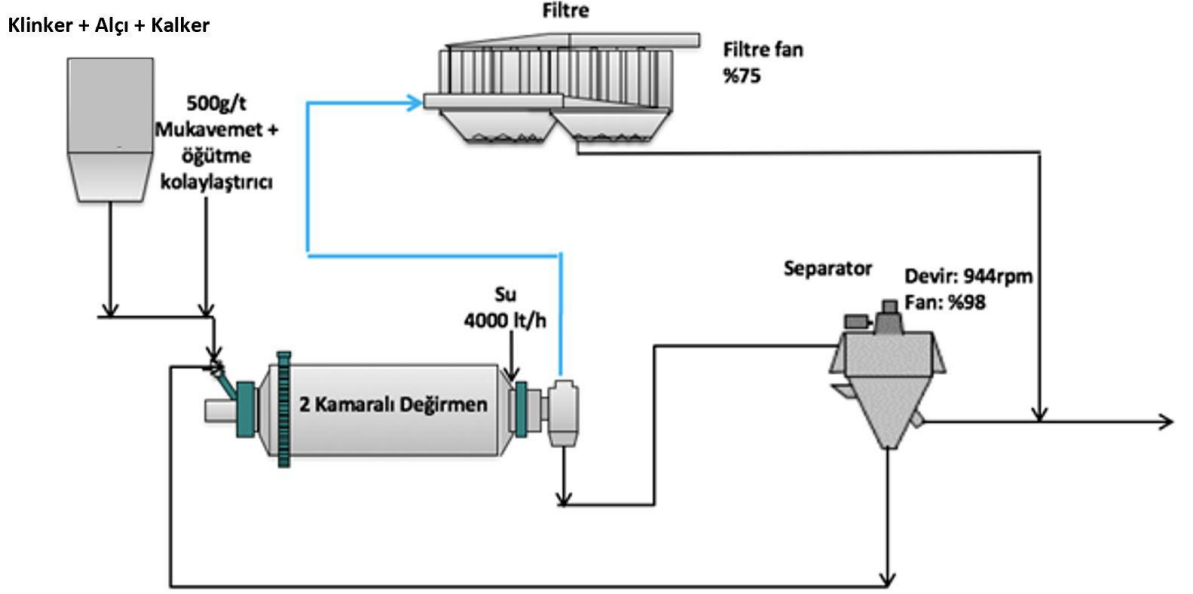
Şekil 5'teki 1 No'lu Çimento Öğütme Devresi'ne ait basitleştirilmiş akım şemasından da görüleceği üzere değirmenden çıkan malzemenin bir kısmı (ilerleyen bölümlerde yapılan hesaplamalar sonucu miktarı belirlenmiştir) filtre tarafından tutulmaktadır. Filtre tarafından tutulan malzeme daha sonra değirmenden taşan malzeme ile birleşmekte ve değirmen çıkışında bulunan kovalı elevatör aracılığı ile havalı sınıflandırıcıya beslenmektedir. Sınıflandırıcıya gelen malzeme son ürün ve iri ürün olarak sınıflandırılmakta olup, iri ürün değirmene geri döndürülmektedir. İnce ürün ise çimento silosuna sevk edilmektedir. 1 No'lu Çimento Öğütme Devresi'nde yer alan değirmen ve havalı sınıflandırıcıya ait teknik özellikler Tablo 2 ve Tablo 3'te verilmektedir.

Tablo 2.1 No'lu Çimento Öğütme Devresi'nde yer alan değirmene ait teknik özellikler.

| Değirmen           |             |           |
|--------------------|-------------|-----------|
| Üretici Firma      | F.L. SMIDTH |           |
| Devir Sayısı (rpm) | 17.34       |           |
| Motor Gücü (kW)    | 1455        |           |
|                    | 1.Kamara    | 2. Kamara |
| Çap (m)            | 3.07        | 3.16      |
| Uzunluk (m)        | 3.60        | 5.90      |

Tablo 3. 1 No'lu Çimento Öğütme Devresi'nde yer alan havalı sınıflandırıcıya ait teknik bilgiler.

| Havalı Sınıflandırıcı                           |             |
|-------------------------------------------------|-------------|
| Üretici firma                                   | F.L. SMIDTH |
| Siklon sayısı                                   | 4           |
| Maksimum rotor devri (d/dk)                     | 200         |
| Rotor gücü (kW)                                 | 45          |
| Sınıflandırıcı hava debisi (m <sup>3</sup> /sa) | 69,180      |
| Fan gücü (kW)                                   | 145         |



Şekil 6. 4 No'lu Çimento Öğütme Devresi' ne ait basitleştirilmiş akım şeması

Şekil 6'da gösterilen 4 No'lu Öğütme Devresi'nde ise, 1 No'lu Öğütme Devresi akım şemasından farklı olarak, değirmen çıkışında bulunan filtrede toplanan ürün, havalı sınıflandırıcı ince ürünü ile birleştirilerek son ürün silosuna sevk edilmektedir.

Devrede yer alan değirmene ve havalı sınıflandırıcıya ait teknik özellikler Tablo 4 ve Tablo 5' te verilmektedir.

Tablo 4 .4 No'lu Çimento Öğütme Devresi'nde yer alan değirmene ait teknik özellikler.

| Değirmen           |             |          |
|--------------------|-------------|----------|
| Üretici Firma      | F.L. SMIDTH |          |
| Devir Sayısı (rpm) | 14.87       |          |
| Motor Gücü (kW)    | 5200        |          |
|                    | 1.Kamara    | 2.Kamara |
| Çap (m)            | 4.80        | 4.80     |
| Uzunluk (m)        | 4.25        | 10.00    |

Tablo 5. 4 No'lu Çimento Öğütme Devresi'nde yer alan havalı sınıflandırıcıya ait teknik bilgiler.

| Havalı sınıflandırıcı                           |          |
|-------------------------------------------------|----------|
| Üretici firma                                   | Polysius |
| Siklon sayısı                                   | 4        |
| Maksimum rotor devri (d/dk)                     | 185      |
| Rotor gücü (kW)                                 | 290      |
| Sınıflandırıcı hava debisi (m <sup>3</sup> /sa) | 254,107  |
| Fan gücü (kW)                                   | 416      |

### 3.2. Malzeme Karakterizasyonu

Örnekleme çalışmaları tamamlandıktan sonra, devre etrafından ve değirmen içerisinden alınan numunelerin karakterizasyonunun yapılmasına yönelik test çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, devre etrafından toplanan bazı numuneler farklı incelik değerlerine öğütülmüş ve öğütülen bu numuneler de laboratuvarda testlere tabi tutulmuştur. Karakterizasyon çalışmaları besleme ve ürün numunelerinin, boyut ve kimyasal analizinin yapılması, yüzey alanlarının belirlenmesi, çimento için dayanım ölçümü, ayrıca besleme malzemesinin iş indeksinin belirlenmesini kapsamaktadır. Önemle belirtmek gerekir ki, çimento özellikleri Bursa Çimento Laboratuvarlarında standart yöntemlerle belirlenmiştir. Bu kapsamda, çimento dayanım ve yüzey alanı değerlerinin belirlenmesine yönelik çalışmalar ve kimyasal analizler Bursa Çimento Fabrika'sının laboratuvarlarında tamamlanmıştır.

#### 3.2.1. Tane Boyu Dağılımlarının Belirlenmesi

Herhangi bir öğütme ve sınıflama devresinde yer alan ekipmanların verimliliği, o ekipmanlar etrafındaki mevcut akışların tane boyu dağılımları izlenerek değerlendirilebilmektedir. Bu nedenle; numune alma işlemi sırasında dikkatli olunması, istatistiksel olarak yeterli miktarda numune alınması ve mümkün olan en küçük tane boyutuna kadar analizlerin yapılması gerekmektedir. Çalışma

kapsamında alınan numunelerin boyut dağılımları en üst boydan başlanarak 1,8  $\mu\text{m}$ ' ye kadar belirlenmiştir.

Analizler iki aşamada tamamlanmıştır. Analizin ilk aşamasında numunedeki en iri boy belirlenerek, bu boydan itibaren 150  $\mu\text{m}$ ' ye kadar  $\sqrt{2}$  elek serisi kullanılarak elek analizi yapılmıştır. İkinci aşamada ise 150  $\mu\text{m}$ 'lik eleğin altına geçen malzeme Sympatec marka lazerli tane boyu ölçüm cihazı (Şekil 7) ile analiz edilerek numunenin boyut dağılımının 1,8  $\mu\text{m}$ ' ye kadar belirlenmesi sağlanmıştır. Aynı ayrı tamamlanmış olan elek analizi ve lazerli tane boyu ölçümleri, tek bir tane boyu dağılımı elde edebilmek için aşağıda bahsedilen yöntem kullanılarak birleştirilmiştir.

Lazerli tane boyu ölçüm sonuçları değerlendirilirken 150  $\mu\text{m}$ 'den büyük veriler dikkate alınmamış ve %100'ü 150  $\mu\text{m}$ 'den daha ince olacak şekilde ölçeklendirilmiştir. Daha sonra elek analizi sonucu tespit edilen 150  $\mu\text{m}$ 'den daha ince olan tane oranı, lazerli tane boyu ölçüm cihazından elde edilen 150  $\mu\text{m}$ 'den daha ince tanelerin birikimli % değeri olarak kabul edilmiştir. Yani elek analizi ile tespit edilen 150  $\mu\text{m}$ 'den daha ince tanelerin ağırlıkça oranı, lazerli tane boyu ölçüm cihazı ile belirlenen birikimli yüzde ağırlık değerleri ile çarpılmıştır. Daha sonra elek analizi ve lazerli ölçüm cihazı ile tespit edilen iki farklı boyut dağılımı bu şekilde birleştirilerek  $\sqrt{2}$  boyut aralıklarıyla tek bir boyut dağılımı elde edilmiştir. Bazı lazer boyutlandırma aletleri, kullanıcıların lazer verilerine elek verileri eklemesini ve birleştirmesini sağlayan modelleme yazılımına sahiptir. Ancak, bu modelleme yazılımı, verileri farklı şekilde birleştirebileceği ve verilere tutarsızlıklar getirebileceği için kullanılmamıştır.

Tablo 6'da kullanılan boyutlar listelenmektedir.

Tablo 6. Boyut analizleri sırasında kullanılan tane boyları.

| Tane Boyu (mm) |      |       |       |        |
|----------------|------|-------|-------|--------|
| 75             | 6,70 | 0,850 | 0,102 | 0,012  |
| 38             | 4,75 | 0,600 | 0,072 | 0,0086 |

|      |      |       |       |        |
|------|------|-------|-------|--------|
| 25   | 3,35 | 0,425 | 0,050 | 0,0062 |
| 19   | 2,36 | 0,300 | 0,036 | 0,0044 |
| 13,2 | 1,70 | 0,212 | 0,025 | 0,0030 |
| 9,5  | 1,18 | 0,150 | 0,018 | 0,0018 |



Şekil 7. Soldan sağa Lazerli tane boyu ölçüm cihazı, rotap elek sallayıcı, havalı alpine elek

### 3.2.2. Malzeme Yüzey Alanın Ölçümü

Besleme ve ürün malzemelerinin yüzey alanları TS EN 196-6 standardında belirtilen Blaine ölçüm yöntemi kullanılarak belirlenmiştir (Şekil 8). Bu yöntemde, belirli gözenekliliğe sahip çimento malzemesi hazneye yerleştirilmekte ve sabit hava miktarının geçtiği sürenin tespit edilmesiyle özgül yüzey alanı hesaplanmaktadır. Blaine tekniği mukayese metodudur ve özgül yüzeyi bilinen referans bir numune ile cihazın kalibrasyonunun yapılması gereklidir.



Şekil 8. Blaine test düzeneği

### 3.2.3. Öğütülebilirlik İş İndeksi Tayini

Besleme malzemesi için iş indeksi tayininde TS 7700 standardında belirtilen Bond iş indeksi testi yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntem, malzemenin öğünmeye karşı direncini standartlarda belirtilen özelliklere sahip değirmen kullanılarak ölçmektedir (Şekil 9). Her ne kadar yöntem darbe ile öğütme mekanizması ile çalışan bilyalı değirmenler için geliştirildiyse de çalışma kapsamında kullanılacak malzemelerin öğünme karakteristiklerinin karşılaştırılması amacıyla da kullanılmıştır.



Şekil 9. Bond bilyalı değirmen

### 3.2.4. Çimento Kalitesini Ölçmeye Yönelik Gerçekleştirilen Testler

Çimento öğütme devreleri için üretilen çimentonun boyut dağılımı, kalite unsuru açısından da önem arz etmektedir. Çalışma kapsamında, çimento öğütme devrelerinde ince öğütme teknolojilerinin kullanımının uygunluğunun test edilmesinin amaçlanmış olması nedeniyle, bazı testler sonucu elde edilen çimentoların kalite değerleri de ölçülmüştür. Ayrıca, ince öğütme teknolojisi kullanımı ile farklı akış kollarının doğrudan ürün silosuna katılıp katılamayacağının kararı çimento kalite verileri incelenerek yorumlanmıştır. Bu kapsamda, çimento numunelerinin priz süreleri ve dayanım gelişimleri değerlendirmeye alınmıştır. Çimentonun dayanım testleri ve kimyasal analizleri TS EN 196-1 ve TS EN 196-2 standardına uygun olarak, Bursa Çimento Fabrikası laboratuvarlarında gerçekleştirilmiştir.

### 3.3. Modelleme Metotları

#### 3.3.1. Bilyalı Değirmen ve Karıştırmalı Değirmen Modellenmesi

Bilyalı ve karıştırmalı değirmenler için matematiksel model yapısının geliştirilmesinde mükemmel karışım model yaklaşımı kullanılabilmektedir. Napier Munn ve ark. (1996) bu yaklaşım ile hem tane boyu dağılımlarını hem de akış hızlarını doğru bir şekilde tahmin edilebileceğini belirtmişlerdir. Bwalya ve Moys (2013), boyut kütle denkliği modelini kullanarak tüp değirmenler için bir model yapısı geliştirmiş ve bu model sonuçlarının deneysel verilerle oldukça uyumlu olduğunu göstermiştir. Benzer ve ark. (2001) ise boyut kütle denkliği modeli ile çimento endüstrisinde kullanılan kapalı devre öğütme devrelerinin enerji optimizasyonunu gerçekleştirmek için simülasyonlar gerçekleştirmişlerdir. Eşitlik 1'de Epstein (1947) tarafından geliştirilmiş olan boyut kütle denkliği modeli sunulmaktadır.

$$p_i = f_i + \sum_{j=1}^i a_{ij}r_js_j - r_is_i \quad (1)$$

burada;

$f_i$ :  $i$  fraksiyonundaki tanelerin besleme akışındaki miktarı (t/sa);

$p_i$ :  $i$  fraksiyonundaki tanelerin ürün akışındaki miktarı (t/sa);

$a_{ij}$ : birincil kırılma sonucunda  $j$  boyundan  $i$  boyutuna kırılan tanelerin kütlece oranı

$r_i$ :  $i$  fraksiyonundaki tanelerin kırılma hızı;

$s_i$ :  $i$  fraksiyonundaki tanelerin değirmen içindeki miktarı (ton).

Değirmen içerisindeki malzeme miktarı ( $s_i$ ) ile ilgili bilgi eksik olduğunda, Eşitlik 2'den yararlanılarak değirmen içerisindeki malzeme miktarı hesaplanabilir. Eşitlik 2'de, ürünün tane boyu dağılımının değirmen içeriğinin ( $s_i$ ) ve taşınma hızının ( $d_i$ ) bir fonksiyonu olduğu varsayılmaktadır. Eşitlik 2'den hesaplanan değirmen içeriği ( $s_i$ ), Eşitlik 1'de yerine yazıldığında, mükemmel karışım yaklaşımı olarak adlandırılan Eşitlik 3 elde edilmektedir.

$$p_i = d_is_i \quad (2)$$

$$f_i + \sum_{j=1}^i a_{ij} p_j \frac{r_j}{d_j} - p_i \frac{r_i}{d_i} - p_i = 0 \quad (3)$$

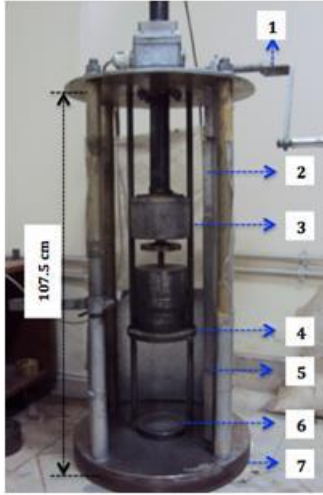
Eşitlik 3'teki mükemmel karışım yaklaşımında, öğütme işlemi, kırılma dağılımı fonksiyonu ( $a_{ij}$ ) ve işletme koşullara bağlı olarak değişen kırılma hızı ( $r$  veya  $r/d$ ) ile tanımlanır. Değirmen model yapısının geliştirilebilmesi için öncelikle kırılma dağılımı fonksiyonunun belirlenmesi daha sonra da kırılma hızı fonksiyonu ( $r/d$ ) işletme değişkenleri ile olan ilişkisi tespit edilmelidir.

### 3.3.1.1. Kırılma Dağılımının Belirlenmesi

Daha önce yapılmış çalışmalarda kırılma dağılımının belirlenmesinde farklı yöntemler kullanılmıştır, bunlar;

- Deneysel çalışmalar (Shi ve ark., 2009; Barrios ve ark., 2011; Xie ve ark., 2015; Ekşi ve ark., 2011)
- Model yapılarının kurulmasıyla ve geri hesaplama (Vogel ve ark., 2003; Mirtic ve ark., 2016; Zolghadri ve ark., 2018) veya
- Bilgisayar ortamında yapılan DEM (ayrık elemanlar metodu) yöntemi (Delaney ve ark., 2013; Cleary ve ark., 2011) olarak sıralanabilmektedir.

Bu çalışma kapsamında, kırılma dağılımı deneysel yöntemler kullanılarak belirlenmiştir. Kırılma dağılımı tek tane (bilyalı değirmen) ve yatak kırılma (karıştırmalı değirmen) testleri yapılarak belirlenmiştir. Şekil 10'da hem tek tane hem de yatak ile kırma testlerinde kırılma dağılımını belirlemek için laboratuvarında kullanılan ağırlık düşürme test düzeneği görülmektedir. Tablo 7'de ise bu ekipmanın teknik özellikleri verilmiştir. Yatak testlerini yapmak üzere hazırlanan numunelerin fotoğrafı Şekil 11'de, oluşturulan yatağın geometrik özellikleri ise Tablo 8'de sunulmaktadır.



- 1- Mekanik Kol
- 2- Ağırlık düşürme rayı
- 3- Elektromanyetik başlık
- 4- 5.87 kg ağırlığındaki kurşun sabitleme kafası
- 5- Yükseklik ölçümü için cetvel
- 6- Çelik örs (15.5 cm)
- 7- Çelik taban

Şekil 10. Ağırlık düşürme test düzeneği

Tablo 7. Ağırlık düşürme test düzeneğine ait teknik bilgiler

|                                        |      |
|----------------------------------------|------|
| Kafa ağırlığı (kg)                     | 5.87 |
| Kullanılabilecek en büyük ağırlık (kg) | 50   |
| En yüksek düşürme yüksekliği (cm)      | 51.5 |
| Kafa çapı(cm)                          | 15.5 |



Şekil 11. Karıştırılmalı değirmen modeli için kullanılan sıkıştırılmış yatağın fotoğrafı

Tablo 8. Sıkıştırılmış yatağın geometrisi

|                       |     |
|-----------------------|-----|
| Yatak çapı (cm)       | 3.5 |
| Yatak yüksekliği (cm) | 1   |

Ağırlık düşürme test cihazı, çelik bir örs, kafa ve ağırlığı belirli bir yükseklikten düşürmek için kullanılan elektromıknatıstan oluşur. Kırılacak olan malzeme çelik örsün merkezi üzerine yerleştirilir ve enerji seviyesine bağlı olarak yükseklik ve ağırlık ayarlaması yapıldıktan sonra malzeme üzerine serbest olarak düşürülür. Malzeme yatağına uygulanan enerji Eşitlik 4 ve 5 kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$E_i = m_d g (h_i - h_f) \quad (4)$$

Bu eşitlikte,

$E_i$  : Darbe ile kırılma enerjisi ( $m^2 \text{ kg/s}^2$ )

$m_d$  : Ağırlık düşürme kafasının ağırlığı (kg)

$h_i$  : Ağırlığın örsün üstündeki ilk yüksekliği (m)

$h_f$  : Ağırlığın örsün üstündeki son yüksekliği (m)

$$E_{CS} = E_i / m_p \quad (5)$$

Bu eşitlikte,

$E_{CS}$  : özgül ufalama enerjisi, kWsa/t

$m_p$  : ortalama tane kütlesi, g

Çalışmalar sırasında klinker numunesi kullanılmış olup, dar tane boyu aralıklarında klinker taneleri hazırlanarak üç farklı enerji seviyesinden kırılmıştır (Tablo 9 ve Tablo 10).

Tablo 9. Ağırlık düşürme düzeni ile gerçekleştirilen tek tane kırma test matrisi

| Boyut aralığı (mm)         | (-16+13.2)       | (-13.2+11.2)  | (-11.2+9.5) |
|----------------------------|------------------|---------------|-------------|
| Enerji seviyeleri (kWsa/t) | 0,25; 0,75;<br>1 | 1,25; 1,75; 2 | 2,5; 3; 4,5 |

Tablo 10. Ağırlık düşürme düzeni ile gerçekleştirilen yatak kırma test matrisi

| Boyut aralığı (mm)         | (-1,18+0,85) | (-0,6+0,425) | (-0,3+0,212) |
|----------------------------|--------------|--------------|--------------|
| Enerji seviyeleri (kWsa/t) | 1; 1,5; 2    | 2,5; 3; 3,5  | 4; 4,5; 5    |

Kırma testlerini takiben, ince malzeme oluşum hızındaki değişimi ( $t_n$ ) tanımlamak ve sonuçları özgül ufalama enerjisi ile ilişkilendirmek amacıyla her bir numunenin tane boyu dağılımları belirlenmiştir. Uzun zamandır kullanılmakta olan bu yaklaşım (Napier-Munn ve ark.,1996) özellikle besleme boyunun 1/10'u boyutundaki tanelerin yüzdesi ( $t_{10}$ ) kullanılarak kırılma dağılımı fonksiyonun hesaplanmasında kullanılmaktadır (Eşitlik 6).

$$t_{10} = A * (1 - e^{-b.E_{CS}}) \quad (6)$$

Bu eşitlikte,

A, b : Model parametreleri

$t_n$  : 4, 10 ve 25

### 3.3.2. Havalı Sınıflandırıcı ve Değirmen Filtresi Ekipmanlarının Modellenmesi

Filtre, ara diyafram ve dinamik havalı sınıflandırıcı modellemesinde verimlilik eğrisi yaklaşımı uygulanmıştır. Kısacası, bu yaklaşım girdi olarak sınıflandırıcının gerçek verimlilik eğrisini kullanmaktadır (Napier-Munn ve ark.,1996; Altun ve ark.,2014; Onuma ve ark.,1994; Altun ve ark.,2016). Eğrinin şeklini tanımlayan matematiksel fonksiyona dayanarak, deneysel verilere en yakın sonuçlar elde edilecek şekilde parametreler geri hesaplanır. Altun (2007) verimlilik eğrisini tanımlamak için şimdiye kadar türetilmiş matematiksel fonksiyonların (Ito ve ark.,1996; Plitt ve ark.,1976; Lynch,1977; Lippek ve ark.,1978; Finch,1983; Zhang ve ark.,1988) tahmin yeteneklerini karşılaştırmış ve Whiten (Napier-Munn ve ark.,1996) tarafından önerilen yaklaşımın deneysel verileri, özellikle ince boylarda, en doğru biçimde tahmin edilebileceğini göstermiştir. Eşitlik 7’de verimlilik eğrisinin Whiten tarafından geliştirilen matematiksel fonksiyonu verilmektedir (Napier-Munn ve ark.,1996).

$$E_{oa} = C * \left[ \frac{\left( 1 + \beta * \beta^* * \frac{d}{d_{50c}} \right) * (\exp(\alpha) - 1)}{\exp\left( \alpha * \beta^* * \frac{d}{d_{50c}} \right) + \exp(\alpha) - 2} \right] \quad (7)$$

Bu eşitlikte;

- $E_{0a}$  : Üst akıma göre hesaplanmış gerçek verimlilik eğrisi  
 $C$  : Gerçek sınıflandırma işlemine maruz kalan fraksiyon; (1-kaçak)  
 $\beta$  : İnce boyutlarda eğrinin başlangıçtaki yükselişini kontrol eden parametre (olta etkisi)  
 $\beta^*$  :  $d_{50c}$ 'nin tanımından gelen bir değişken;  $E=(1/2)C$  iken  $d=d_{50c}$   
 $\alpha$  : Ayrım keskinliğini ifade eden değişken  
 $d$  : Boyut  
 $d_{50c}$  : Düzeltilmiş kesme boyu

Değirmen filtresi havalandırmaya ve malzemenin taşınmasına yardımcı olmakta ve özellikle değirmen 2. kamarasındaki taneleri toplamaktadır. Hava akışının hızına ve tanelerin büyüklüğüne bağlı olarak malzemenin bir kısmı filtrede tutulurken bir kısmı da değirmenin sonundaki diyaframdan geçerek havalı sınıflandırıcıya gitmektedir. Bu açıdan bakıldığında, filtre sanki statik tip bir havalı sınıflandırıcıymış gibi düşünülebilir ve dolayısıyla verimlilik eğrisi yaklaşımı filtrenin modellenmesi işleminde de kullanılabilir. Bu durumda filtre ünitesinin beslemesi, filtrede tutulan ve değirmenden taşan malzemenin toplamı kadardır.

## 4. SONUÇLAR ve TARTIŞMA

### 4.1. Örnekleme Çalışmaları

İnce öğütme teknolojisi kullanımının faydalarının devreler üzerinde tanımlanması, kullanım olanağının tespiti açısından önem arz etmektedir. Bu nedenle de seçilen öğütme devreleri üzerinde öncelikli olarak numune toplama işlemi ardından da madde denkliği çalışmaları yürütülmüştür. Bu tür çalışmalar, çalışmanın sonuçlandırılması sırasında yapılacak olan simülasyon çalışmalarına temel oluşturmaktadır.

Sonraki bölümlerde belirtilen örnekleme çalışmaları CEM I 42,5R tipi çimento üretiminde gerçekleştirilmiştir.

#### 4.1.1. Bursa Çimento 1 No'lu Çimento Öğütme Devresi

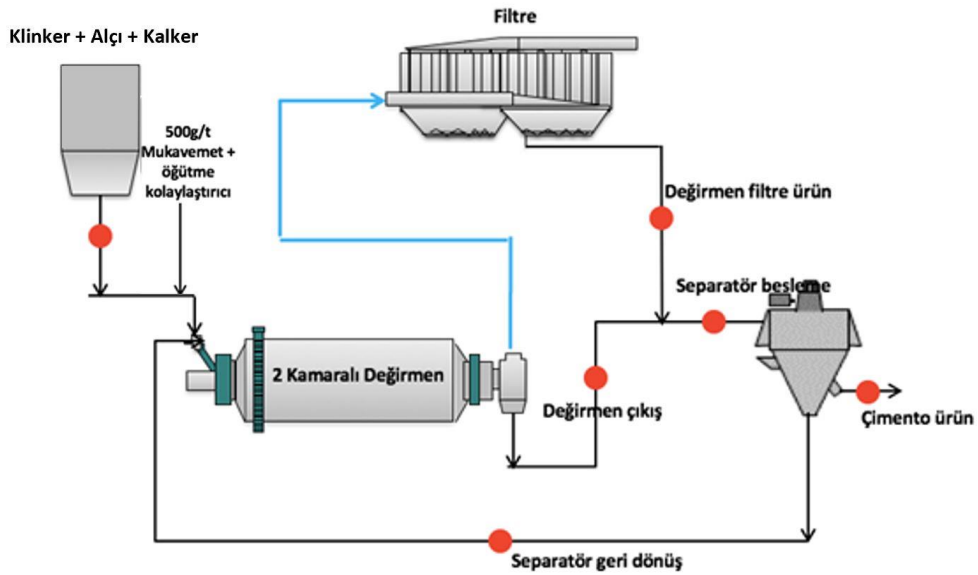
Örnekleme çalışmalarına geçilmeden önce, öğütme devresinin kararlı durumda olduğunu teyit etmek için kontrol odasındaki değişkenlerin zaman bazlı değişimleri değerlendirilmiştir. Bu bağlamda, Tablo 11'de belirtilen değişkenler 2 saat boyunca izlenmiş, salınımın düşük olmasının tespiti le örnekleme çalışmalarına geçilmiş ve ortalama değerler de kaydedilmiştir. Tablo 11'de kaydedilen kontrol odası değerleri sunulmaktadır.

Tablo 11. 1 No'lu Çimento Öğütme Devresi örnekleme dönemi ortalama kontrol odası verileri

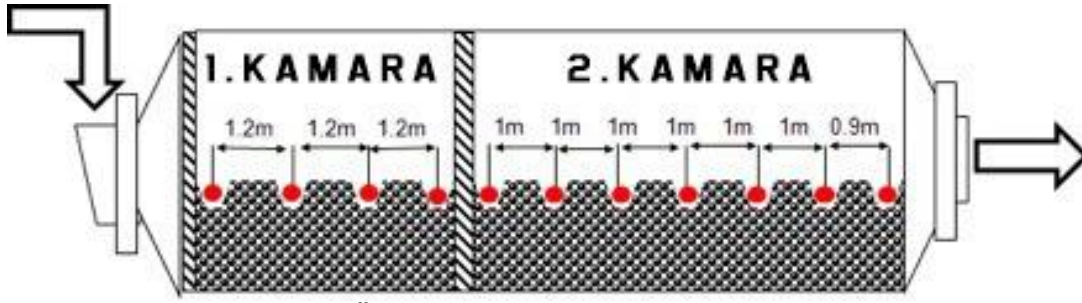
|                                   |      |
|-----------------------------------|------|
| Öğütme yardımcısı (g/t)           | -    |
| Alçı (t/sa)                       | 4.8  |
| Klinker (t/sa)                    | 45,2 |
| Toplam taze besleme (t/sa)        | 50   |
| Sınıflandırıcı geri dönüşü (t/sa) | 23   |
| Değirmen motor gücü(kW)           | 1384 |
| Değirmen elevatör gücü (kW)       | 9    |
| Sınıflandırıcı motor hızı(rpm)    | 88   |
| Sınıflandırıcı hava hızı (%)      | 100  |

Devrenin kararlı durumda çalıştığının tespitinin ardından, öğütme devresi çalışmakta iken devre etrafındaki tüm akış kollarından (sınıflandırıcı geri dönüş, değirmen çıkışı, sınıflandırıcı besleme, değirmen filtre çıkışı, son ürün) istatistiksel olarak temsil edecek miktarlarda numuneler alınmıştır (Şekil 12).

Devre etrafındaki havalı bantlardan numune alma işlemi bittikten hemen sonra “acil stop” ile ani duruş verilerek devredeki tüm ekipmanların eş zamanlı durdurulması sağlanmıştır. Ani duruş sonrasında hammadde tartım bantları üzerinde kalan malzemelerin, malzeme yüksekliğine ve iriliğine bağlı olarak, 1-2 metrelik kısmının sıyrılarak alınması ile devreye beslenen hammaddeler örneklenmiştir. Numune alma işleminin son kısmında ise değirmen içi örnekleme gerçekleştirilmiştir. Ani duruş sonrasında, değirmen eksenini boyunca belirlenen noktalardan numuneler alınmıştır. Bu numuneler alınırken, ani duruş sonucu yığılan üst tabakadaki bilya ve malzeme sıyrılarak, yüzeyden 20-25 cm daha derindeki malzeme toplanmıştır. Değirmen içi örnekleme noktaları Şekil 13’te verilmektedir.



Şekil 12. 1 No’lu Çimento Öğütme Devresi numune alma noktaları

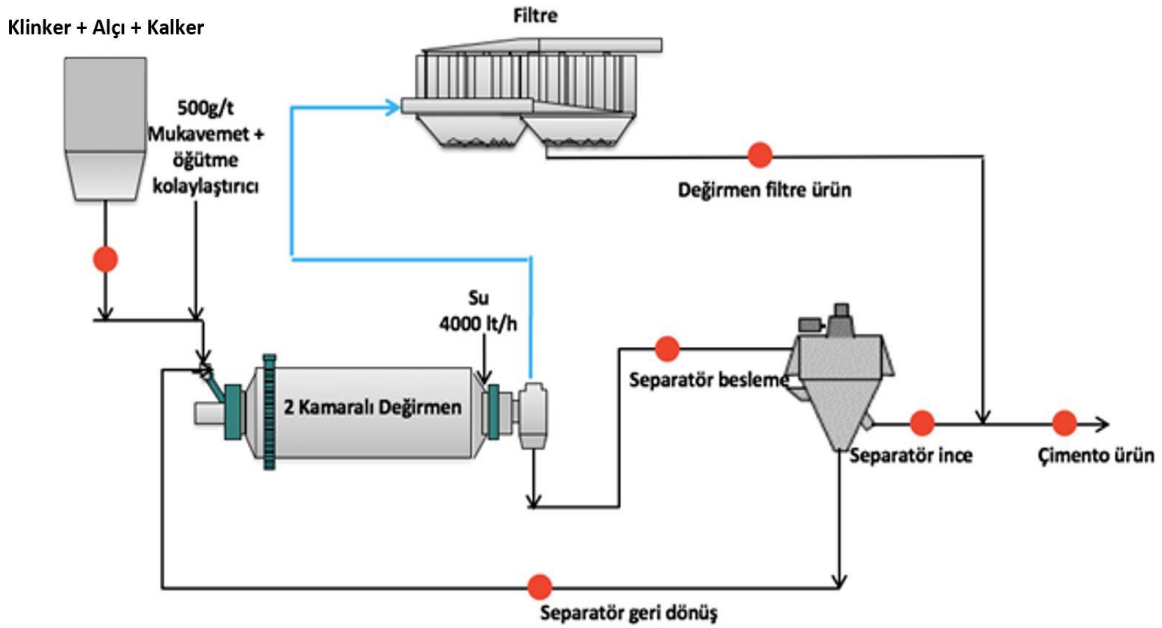


Şekil 13. 1 No'lu Çimento Öğütme Devresi değirmen içi numune alma noktaları

Şekil 13'ten görüleceği üzere 1. kamaranın giriş ucundan çıkış ucuna doğru 1,2 metre aralıklarla numuneler alınmıştır. İkinci kamarada ise bu örnekleme işlemi her 1 metre için tamamlanmıştır. Değirmen içi örnekleme sırasında, değirmen içerisindeki doluluğun hesaplanmasına yönelik ölçümler de alınmıştır.

#### 4.1.2. Bursa Çimento 4 No'lu Çimento Öğütme Devresi

Bir diğer devre olan 4 No'lu Çimento Öğütme Devresi'nde de örnekleme işlemleri gerçekleştirilmiştir. Benzer sistematığın izlendiği bu örnekleme çalışmasına ait devre etrafı Şekil 14'te gösterilmektedir.



Şekil 14. 4 No'lu Çimento Öğütme Devresi numune alma noktaları

Örnekleme dönemine ait ortalama kontrol odası verileri Tablo 12’de sunulmaktadır.

Tablo 12. 4 No’lu Çimento Öğütme Devresi örnekleme dönemi ortalama kontrol odası verileri

|                                                         |      |
|---------------------------------------------------------|------|
| Kimyasal (Dayanım arttırıcı ve öğütme yardımcısı) (g/t) | 500  |
| Klinker (t/sa)                                          | 141  |
| Alçı (t/sa)                                             | 24   |
| Toplam Besleme (t/sa)                                   | 165  |
| Sınıflandırıcı Geri Dönüşü(t/sa)                        | 135  |
| Değirmen Motor Gücü(kW)                                 | 4577 |
| Değirmen Elevatör Gücü (kW)                             | 56   |
| Sınıflandırıcı Motor Hızı (rpm)                         | 944  |
| Sınıflandırıcı Hava Hızı (%)                            | 98   |

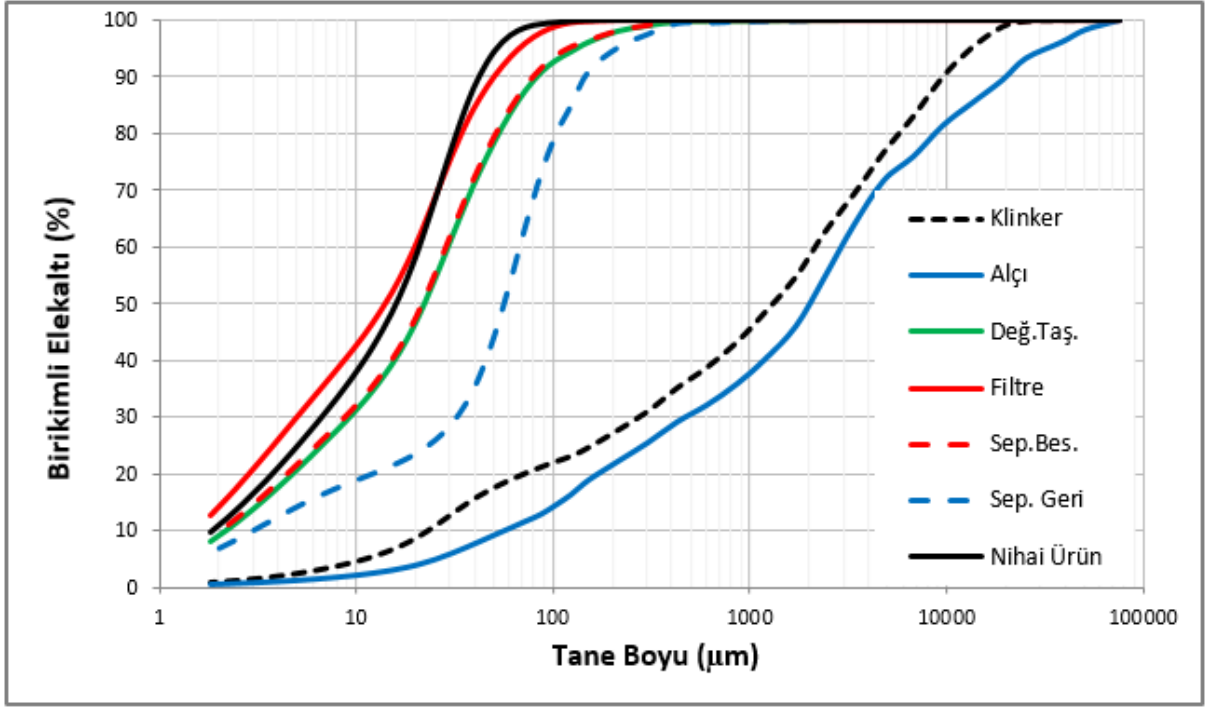
#### 4.2. Deneysel Çalışmalar ve Sonuçları

Önemle belirtmek gerekir ki, toplanan numunelerin boyut dağılımları, kırılma dağılım fonksiyonu ve iş indeksi değerleri Hacettepe Üniversitesi Maden Mühendisliği laboratuvarında belirlenirken, çimentolara ait dayanım, Blaine, kimyasal içerik gibi analizler Bursa Çimento Fabrikası tarafından yapılmıştır. Deneysel çalışmalar kapsamında, boyut dağılımı, iş indeksi testleri, tesis örnekleme çalışmalarının detayları sunulmaktadır.

##### 4.2.1. Tane Boyu Analizleri

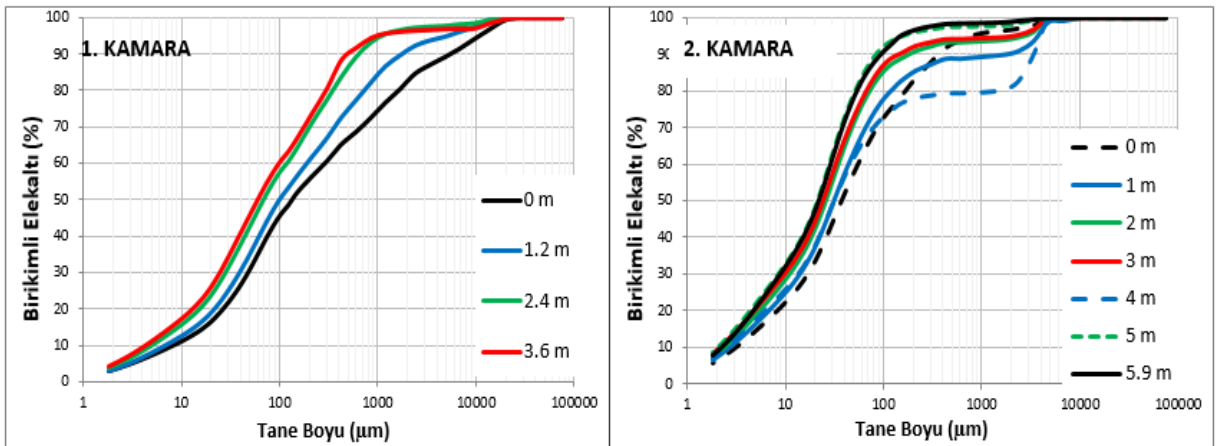
###### 4.2.1.1. 1 No’lu Çimento Öğütme Devresi

Devre etrafından alınan numunelerin ölçülen tane boyu dağılımları Şekil 15’da verilmektedir.



Şekil 15. 1 No'lu Çimento Öğütme Devresi'ne ait devre etrafı ölçülen tane boyu dağılımları

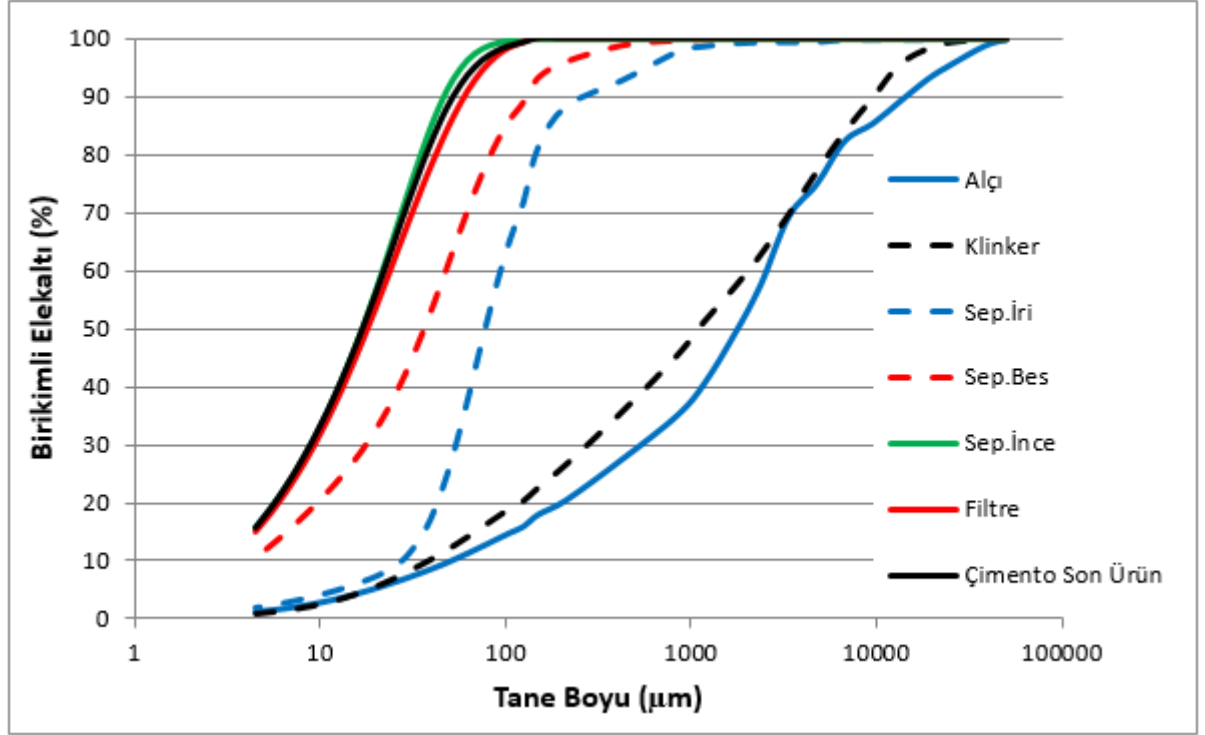
Tane boyu dağılımları incelendiğinde değirmen filtre çıkış numunesinin dağılımının, sınıflandırıcı incesinden daha ince olduğu anlaşılmaktadır. Örnekleme işlemi sırasında değirmen içi numuneleri de toplanmış olup boyut dağılımları Şekil 16'de gösterilmektedir.



Şekil 16. 1 No'lu Çimento Öğütme Devresi'ne ait değirmen içi boyut dağılımları

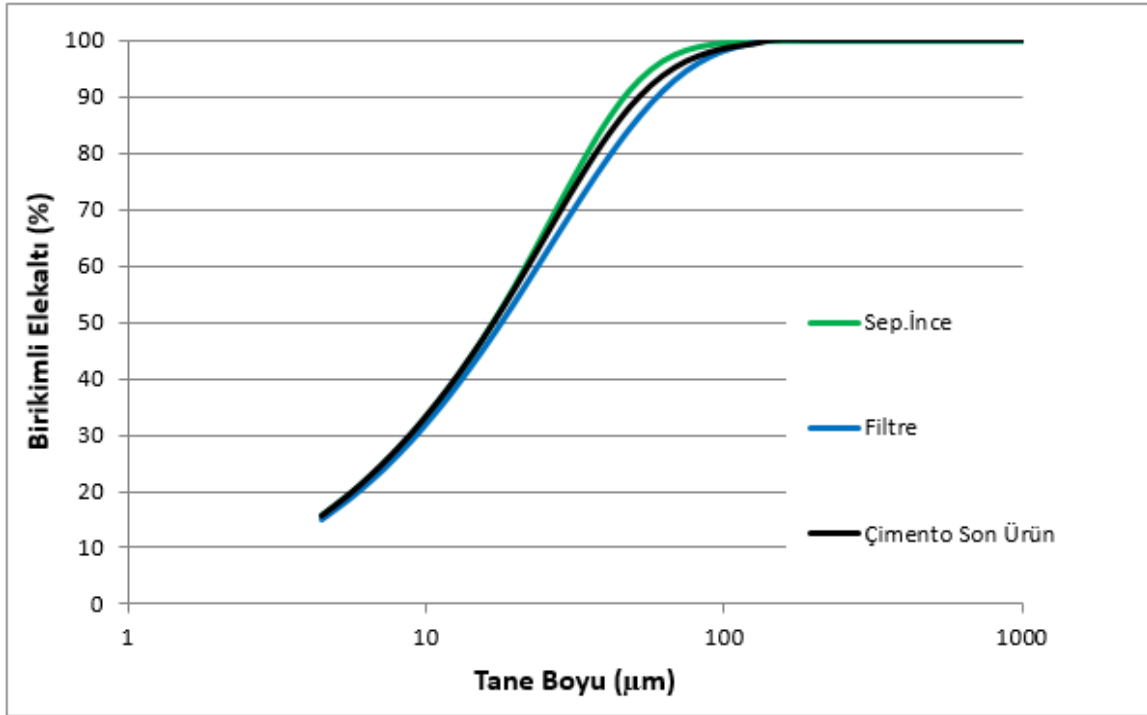
#### 4.2.1.2. 4 No'lu Çimento Öğütme Devresi

Devre etrafından alınan numunelerin ölçülen tane boyu dağılımları Şekil 17'de verilmektedir.



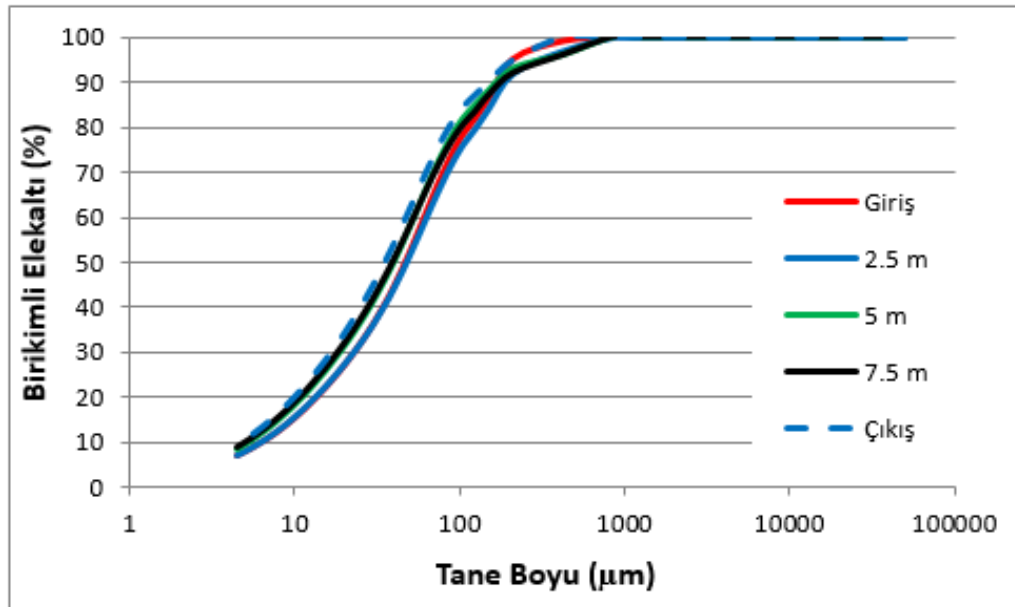
Şekil 17. 4 No'lu Çimento Öğütme Devresi'ne ait devre etrafı ölçülen tane boyu dağılımları

Şekil 18'da belirtilen akış kolları içerisinde, sınıflandırıcı ince akışı en ince dağılıma sahip iken, değirmen filtresi en iri malzeme konumunda bulunmaktadır.



Şekil 18. Filtre ürün, sınıflandırıcı ince ve çimento son ürün kolları boyut dağılımları

Değirmen örnekleme sırasında, yalnızca değirmenin 2. kamarasında numuneler alınmıştır. Alınan bu numunelere ait tane boyu dağılımları Şekil 19'de sunulmaktadır.



Şekil 19. 4 No'lu Çimento Öğütme Devresi'ne 2. kamara boyut dağılımları

#### 4.2.2. Öğütülebilirlik

Literatürde sonsuz büyüklükteki bir malzemenin %80' inin 100 mikronun altına geçmesi için gerekli enerji olarak tanımlanan Bond iş indeksi, aynı zamanda malzemenin öğütülmeye karşı olan direncini göstermektedir. Bond iş indeksi değerinin yüksek olması, malzemenin öğütülmeye karşı direncinin yüksek olduğu anlamına gelmektedir.

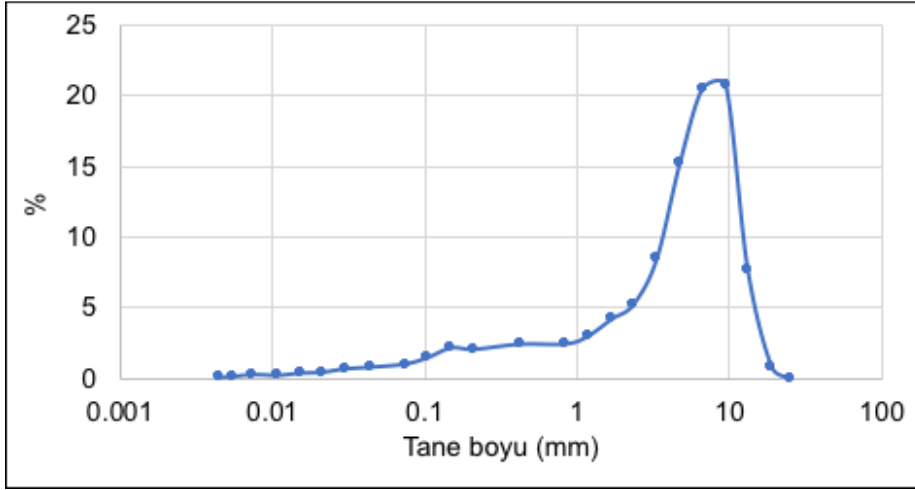
Tablo 13. Hammaddelere ait iş indeksi değerleri

|               | 1 No'lu Öğütme<br>Devresi | 4 No'lu Öğütme<br>Devresi |
|---------------|---------------------------|---------------------------|
| Numune Adı    | İş İndeksi                | İş İndeksi                |
| Klinker       | 13,5                      | 13,95                     |
| Alçı + Kalker | 11,16                     |                           |

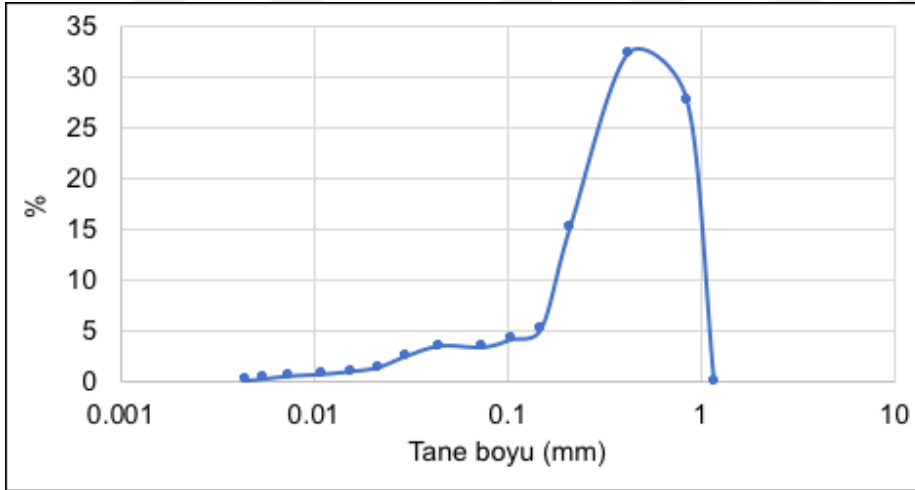
Standart Bond iş indeksi testi ile devreye beslenen hammaddeler; klinker, kalker ve alçının öğütülebilirlik değerleri ölçülmüştür. Standart Bond iş indeksi testi (TS 7700) sonucunda elde edilen değerler Tablo 13'te verilmektedir. Her iki devre için de aynı kalker ve alçı malzemesi kullanıldığından ve de kalker ve alçı birbiri ile karıştırılarak değirmene beslendiğinden, aynı lastik bant üzerinde bulunan kalker-alçı karışımından alınan numuneye öğütülebilirlik testi yapılmıştır.

#### 4.2.3. Kırılma Dağılım Fonksiyonu

Kırılma dağılım fonksiyonu, belirli boyut aralığında hazırlanan tanelerin, belirli enerji seviyesinden kırılmaları sonucu kendi boyundan alt boylara hangi oranda dağıldığını gösteren bir fonksiyondur. Öğütücü sistemlerde de benzer durum söz konusu olmaktadır. Öğütücü makinaların çalışma prensiplerine bağlı olarak kullanılan fonksiyon farklılık gösterebilmektedir. Çalışma kapsamında belirlenen tek tane ve yatak kırma dağılım fonksiyonları Şekil 20 ve Şekil 21'de sunulmaktadır. Buradan elde edilen veriler bilyalı değirmen ve karıştırmalı değirmen model yapısının geliştirilmesinde kullanılmıştır.



Şekil 20. Bilyalı değirmen için hesaplanan tek tane kırılma fonksiyonu

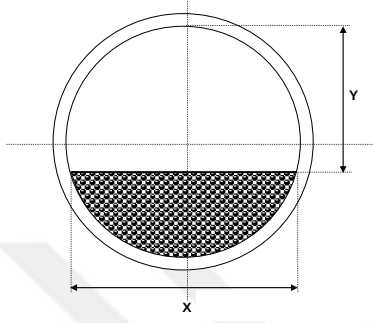


Şekil 21. Karıştırmalı değirmen için hesaplanan yatak testi kırılma fonksiyonu

#### 4.2.4. Değirmen İçi Bilya Doluluğu Ölçümleri

##### 4.2.4.1. 1 No'lu Çimento Öğütme Devresi

Değirmen içi örnekleme sırasında yatayda ve düşeyde yapılan ölçümler (Şekil 22) ile bu ölçümler kullanılarak “efektif kamara çapları bazında” yapılan hesaplamalar sonucunda elde edilen değirmen doluluk oranları Tablo 14’te verilmektedir.



Şekil 22. Değirmen kesiti

Tablo 14 1. ve 2. kamara doluluk oranları

|             | 1.Kamara | 2.Kamara |
|-------------|----------|----------|
| X (mm)      | 3000     | 3100     |
| Y (mm)      | 2000     | 1900     |
| İç çap (mm) | 3070     | 3160     |
| Doluluk %   | 31,01    | 37,20    |

##### 4.2.4.2. 4 No'lu Çimento Öğütme Devresi

Benzer hesaplamalar ve ölçümler 4 No'lu devre için de gerçekleştirilmiş olup sonuçlar Tablo 15’te verilmektedir.

Tablo 15. 1. ve 2. kamara doluluk oranları

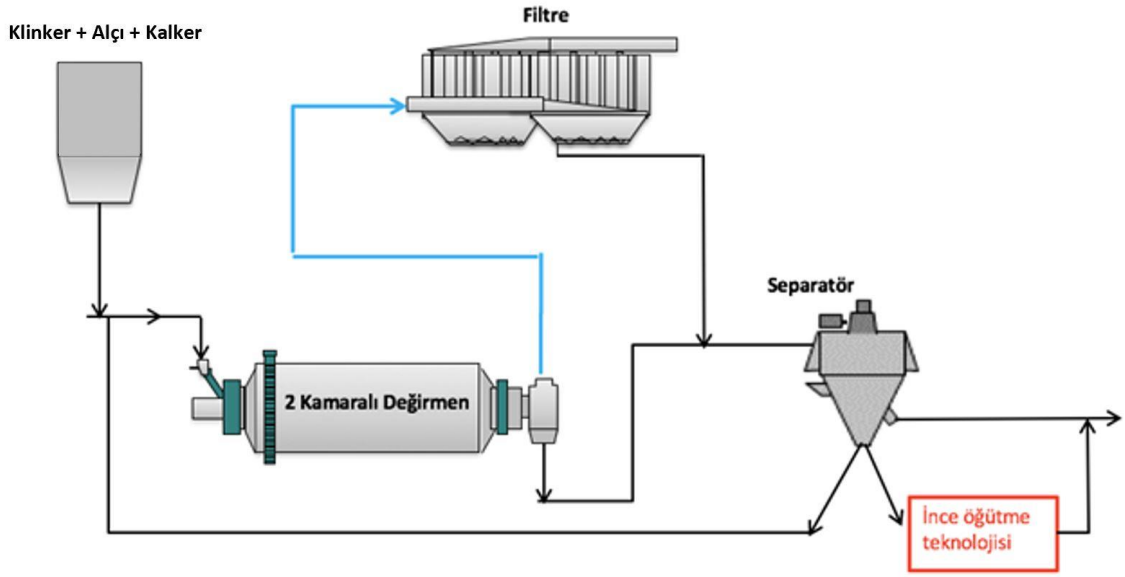
|           | 1.Kamara | 2. Kamara |
|-----------|----------|-----------|
| X (mm)    | 4634     | 4620      |
| Y (mm)    | 3025     | 3050      |
| Çap (mm)  | 4800     | 4800      |
| Doluluk % | 31,09    | 30,03     |

#### **4.2.5. Farklı Akış Kollarında Yürütülen Çimento Kalite Çalışmaları**

Devreler üzerinde yürütülen çimento kalite çalışmaları çalışmanın önemli bir aşamasını oluşturmaktadır. Bir öğütme teknolojisi, besleme malzemesi grubunu boyut dağılımı anlamında hedeflenen bir noktaya getirse dahi, satılabilir olan ürünün standartlar doğrultusunda belirli kalite değerlerine sahip olması beklenmektedir. Çimento özelinde değerlendirme yapılacak olunursa bunlar, dayanım, prizlenme süresi, su ihtiyacı vs. gibi değişkenlerdir.

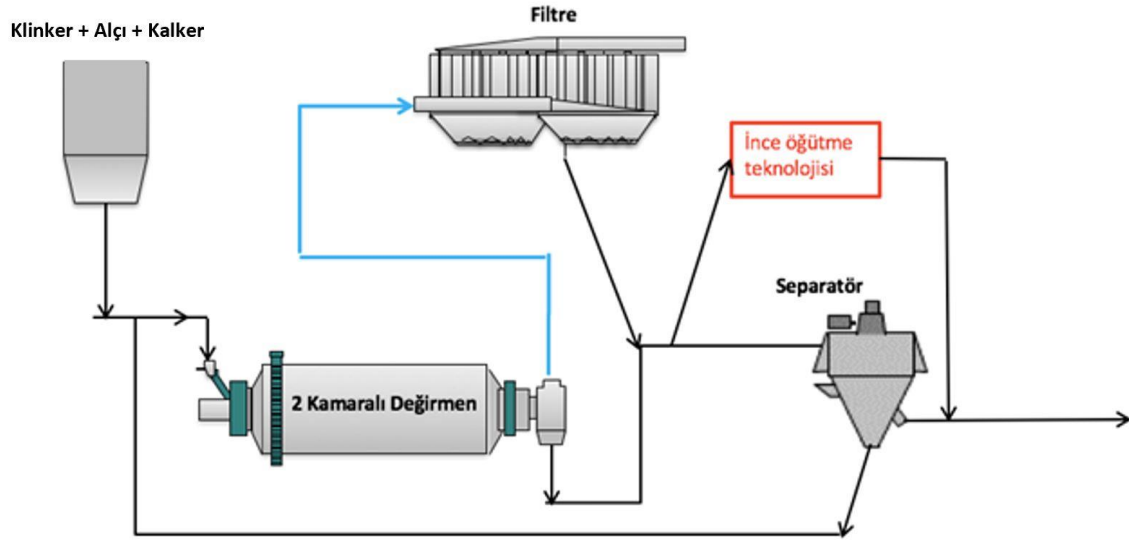
Kalite testleri kapsamında 1 No'lu ve 4 No'lu çimento öğütme devreleri etrafında belirlenen akış kollarında, öğütme öncesi ve sonrası olmak üzere çimento testleri tamamlanmıştır. Kalite testleri yapılırken, farklı akış kollarının tek başlarına öğütülmesi ve belirlenen kollar için öğütülen numunelerin çimento son ürünü ile belirli oranda karıştırılması ihtimali göz önünde bulundurulmuştur.

İnce öğütme teknolojisinin devrede farklı noktalarda kullanılabileceği düşünülmektedir. Şekil 23 ve Şekil 24'te ince öğütme teknolojisinin sınıflandırıcı geri dönüş ve sınıflandırıcı beslemesi akış kollarındaki kullanımına dair örnek akım şemaları gösterilmektedir. Kalite testleri kapsamında, öğütülen malzemelerin çimento son ürünü ile karıştırılmasının sebebi de belirtilen bu akım şemalarının ön bir testinin yapılmak istenmesidir.

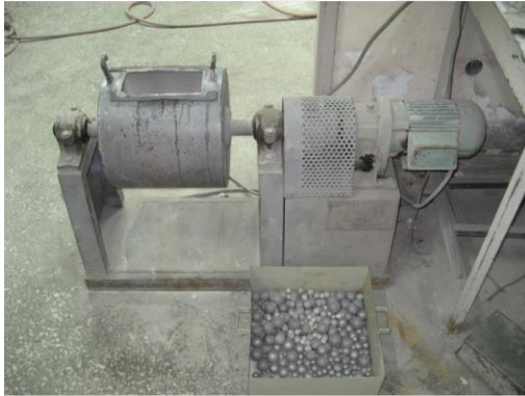


Şekil 23. İnce öğütme teknolojinin geri dönüş akışında kullanıldığı devre şeması

Sınıflandırıcı geri dönüş, değirmen filtre çıkış, sınıflandırıcı besleme gibi tek akış kollarının değerlendirildiği kalite testleri farklı incelik değerleri için yapılmıştır. Bu kapsamda, öğütme testlerinde 30,5 cm uzunluğa ve 30,5 cm çapa sahip laboratuvar ölçekli Bond değirmeni kullanılmıştır (Şekil 25). Bond değirmeninde kullanılan bilya boyu dağılımı Tablo 16'da sunulmaktadır. Tüm öğütme testlerinde değirmene beslenen numune miktarı sabit tutulmuştur (2,5 kg).



Şekil 24. İnce öğütme teknolojisinin sınıflandırıcı besleme akışında kullanıldığı devre şeması



Şekil 25. Laboratuvar ölçekli bilyalı değirmen (Bond değirmeni)

Tablo 16. Bilyalı Değirmen şarjına ait dağılım

| Bilya Çapı (mm) | Bilya Sayısı |
|-----------------|--------------|
| 38.1            | 43           |
| 31.75           | 67           |
| 25.4            | 10           |
| 19.05           | 71           |
| 15.87           | 94           |

#### 4.2.5.1. 1 No'lu Çimento Öğütme Devresi'nde Yürütülen Kalite Çalışmaları

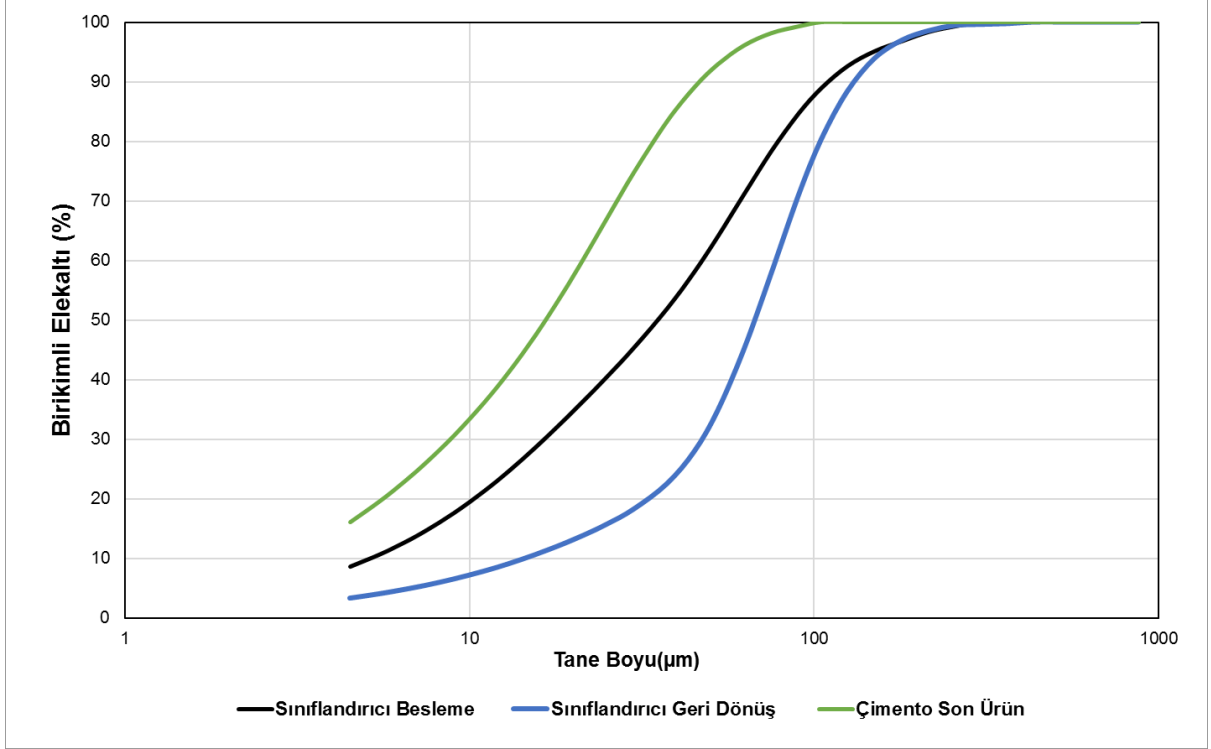
Şekil 12'de gösterilen numune alma noktalarından aşağıda belirtilenler kalite testlerine tabi tutulmuştur.

- Sınıflandırıcı geri dönüşü
- Sınıflandırıcı besleme
- Çimento son ürün (sınıflandırıcı incesi)

Özet olarak, sınıflandırıcı etrafından alınan numuneler üzerinde çalışmalar yürütülmüştür. Tablo 17'de numunelerin kimyasal içerikleri sunulurken, Şekil 26'de bu numunelere ait boyut dağılımları gösterilmektedir.

Tablo 17. Numunelere ait kimyasal kompozisyonlar

| Bileşen (%)                    | Sınıflandırıcı<br>Besleme | Sınıflandırıcı<br>Geri Dönüş | Çimento<br>Son Ürün |
|--------------------------------|---------------------------|------------------------------|---------------------|
| SiO <sub>2</sub>               | 18,91                     | 19,75                        | 18,73               |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 5,82                      | 5,81                         | 5,43                |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 3,21                      | 3,29                         | 2,94                |
| CaO                            | 63,65                     | 64,44                        | 62,47               |
| MgO                            | 1,45                      | 1,63                         | 1,49                |
| SO <sub>3</sub> (YAŞ)          | 1,92                      | 1,62                         | 3,14                |
| Na <sub>2</sub> O              | 0,40                      | 0,50                         | 0,54                |
| K <sub>2</sub> O               | 0,58                      | 0,57                         | 0,65                |
| Cl                             | 0,013                     | 0,011                        | 0,022               |
| Çözünmeyen kalıntı             | 0,37                      | 0,25                         | 0,45                |
| Kızdırma kaybı                 | 3,68                      | 2,13                         | 4,14                |



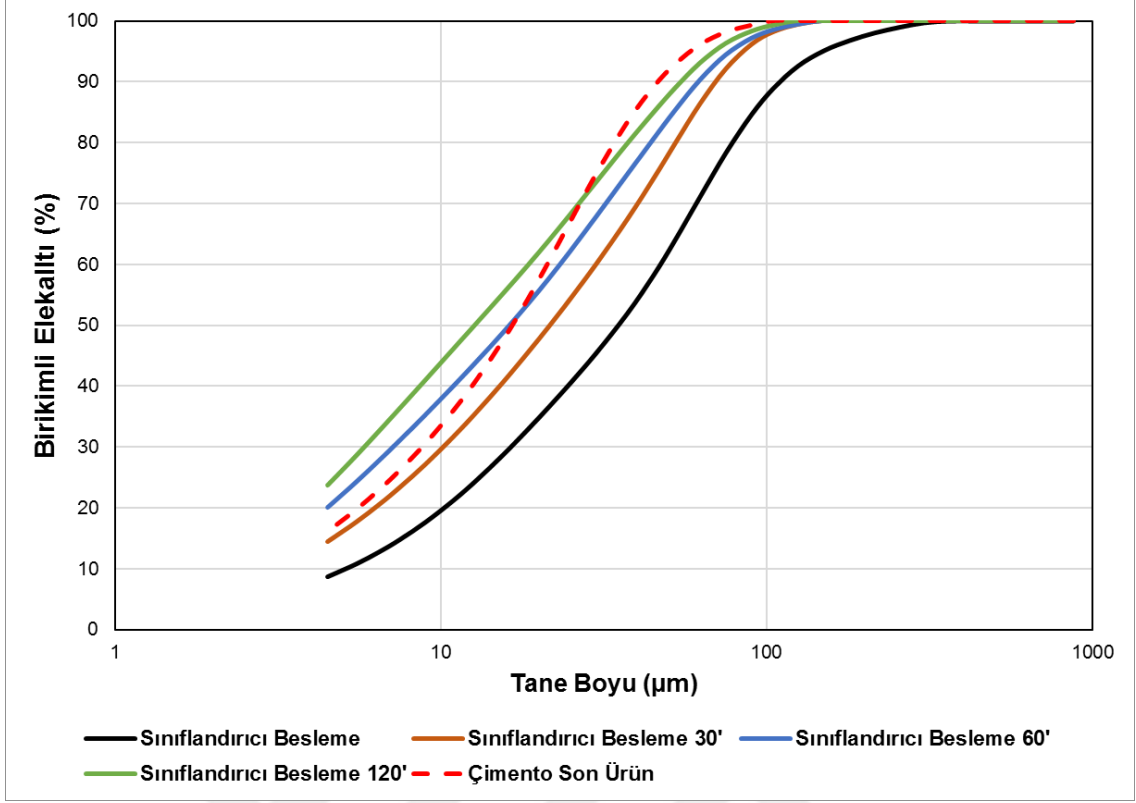
Şekil 26. 1 No'lu Çimento Öğütme Devresi kalite numuneleri boyut dağılımları

Kalite test çalışmalarına ait deneme planı Tablo 18'de sunulmaktadır. Kalite testlerinde, akış kolları için dayanım gelişiminin saptanması ve son ürün dayanım değerinin yakalanabileceği incelik değerinin belirlenmesi amaçlanmıştır.

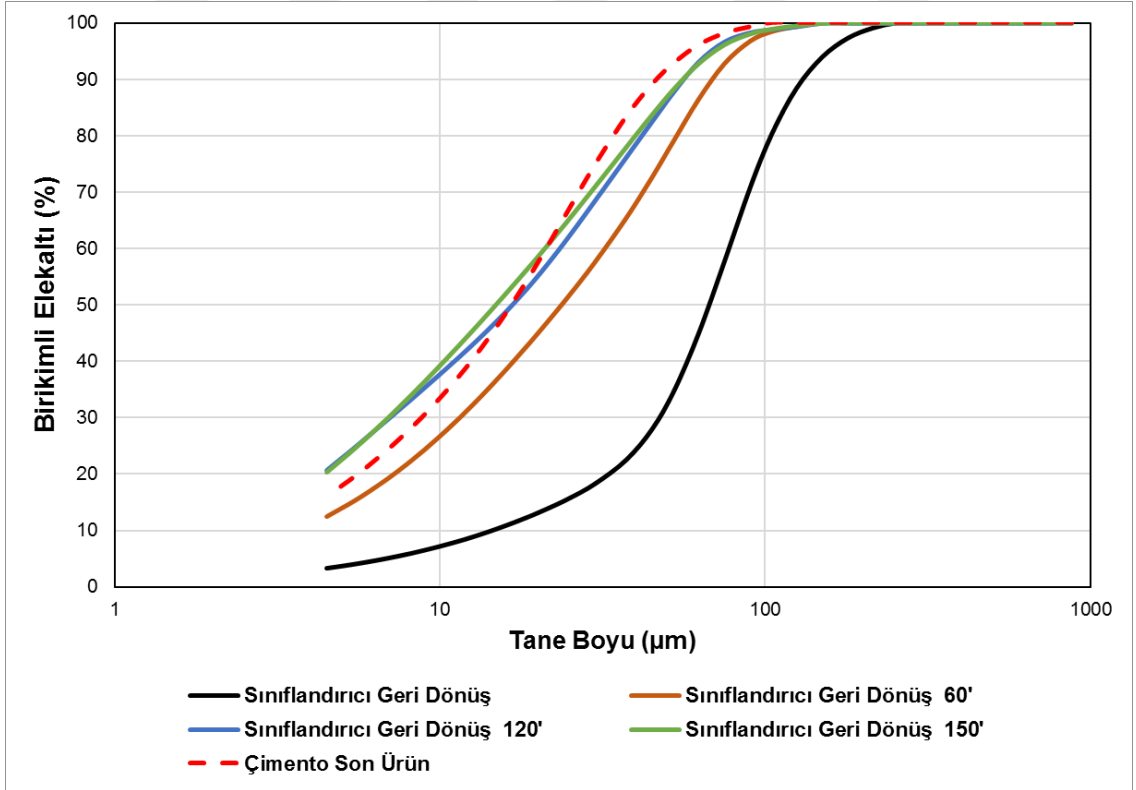
Tablo 18. 1 No'lu Çimento Öğütme Devresi kalite test planı

| Öğütme zamanları          |                    |
|---------------------------|--------------------|
| Sınıflandırıcı besleme    | 30dk, 60dk, 120dk  |
| Sınıflandırıcı geri dönüş | 60dk, 120dk, 150dk |
| Çimento son ürün          | 15dk, 30dk         |

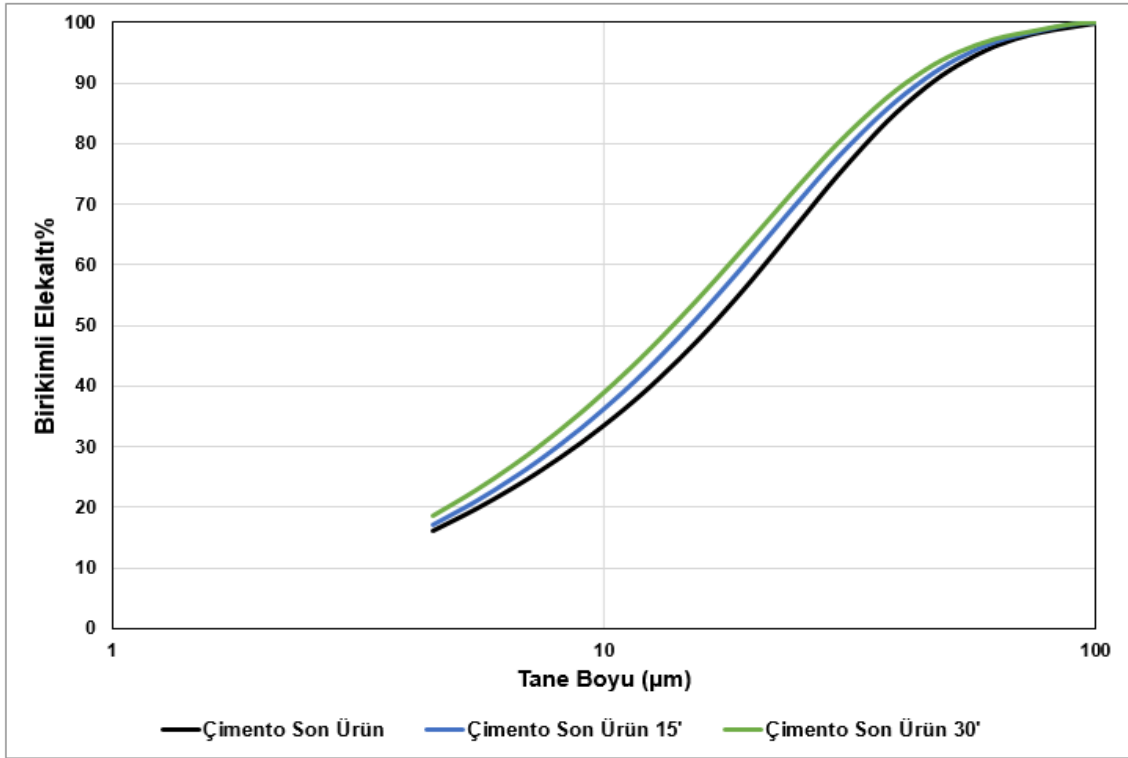
Öğütme denemeleri sonrasında numunelere ait tane boyu dağılımları ölçülmüştür. Sınıflandırıcı besleme ve sınıflandırıcı geri dönüş grafiklerine son ürün boyut dağılımı da eklenmiş olup, hangi öğütme süresinin gerektiği sonucuna varılması amaçlanmıştır (Şekil 27, Şekil 28 ve Şekil 29).



Şekil 27. 1 No'lu Çimento Öğütme Devresi, sınıflandırıcı besleme numuneleri boyut dağılımları



Şekil 28. 1 No'lu Çimento Öğütme Devresi, sınıflandırıcı geri dönüşü boyut dağılımları



Şekil 29. 1 No'lu Çimento Öğütme Devresi, çimento son ürün boyut dağılımları

Tane boyu dağılımları incelendiğinde, öğütme işlemi sonucu elde edilen boyut dağılımlarının öğütülmemiş çimento son ürününe göre daha yatık bir dağılıma sahip olduğu tespit edilmiştir. Tablo 19'da öğütme öncesi ve öğütme sonrası ortalama tane boyu dağılımı ( $D_{50}$ ), dağılımın %80'inin geçtiği tane boyu ( $D_{80}$ ), yüzey alanı değerleri ( $\text{cm}^2/\text{g}$ ) ve boyut dağılımının eğiminin sayısallaştırılması amacıyla Rosin Rammler Steve Bennett (RRSB) eşitliğindeki  $n$  değeri sunulmaktadır. Eğim hesaplanırken doğrusal olmayan regresyon yöntemi kullanılmıştır.

$$Y = 1 - \exp \left[ - \left( \frac{X}{d_0} \right)^n \right] \quad (8)$$

burada;

$Y$  : Birikimli elek altı (%)

$d_0$  : Pivot tane boyu değeri (%63,2 'den geçen boyut,  $\mu\text{m}$ )

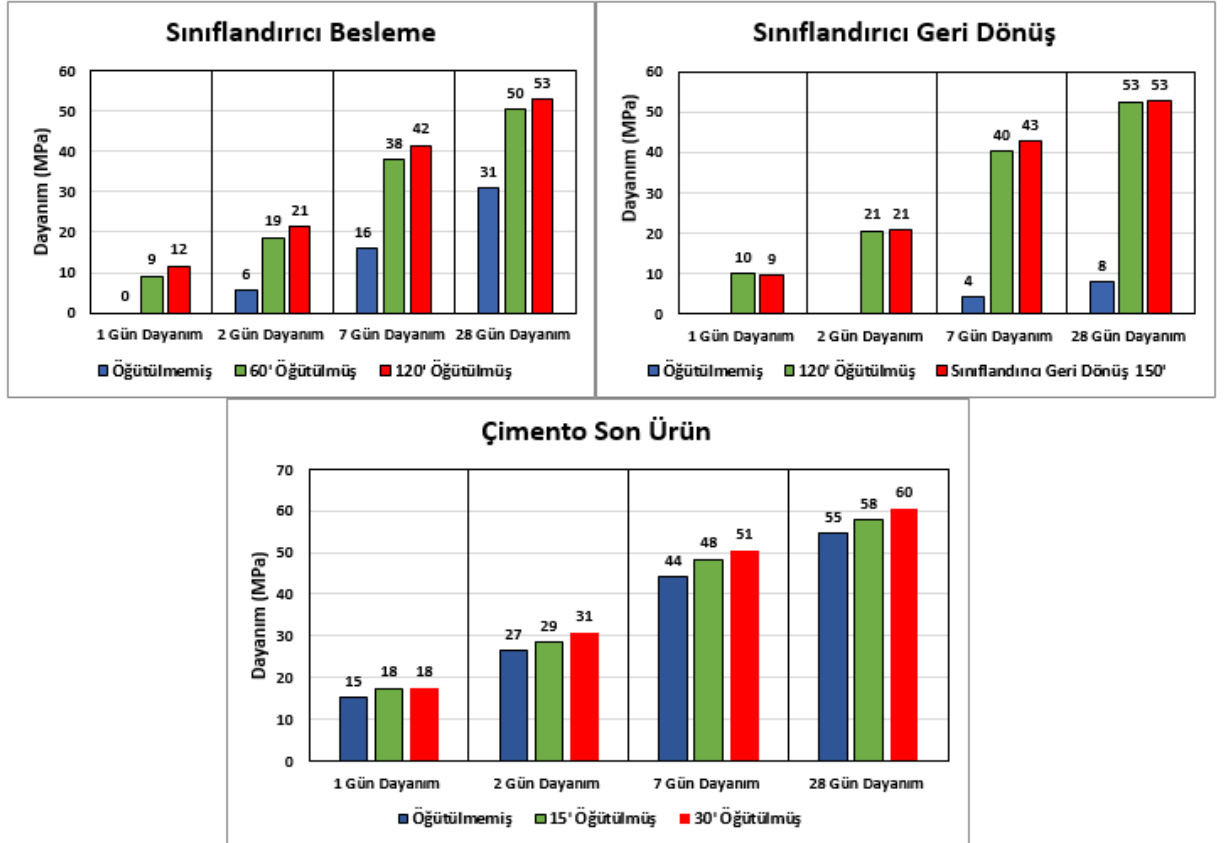
$n$  : Eğim

$X$  : Tane boyu ( $\mu\text{m}$ )

Tablo 19. 1 No'lu Çimento Öğütme Devresi numunelerine ait ürün özellikleri

|                                                | D <sub>50</sub><br>( $\mu\text{m}$ ) | D <sub>80</sub><br>( $\mu\text{m}$ ) | Blaine<br>( $\text{cm}^2/\text{g}$ ) | RRSB n değeri |
|------------------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|---------------|
| Çimento son ürün                               | 16,62                                | 34,49                                | 3660                                 | 1,1103        |
| Çimento son ürün 15 dakika öğütülmüş           | 14,99                                | 32,18                                | 3990                                 | 1,1007        |
| Çimento son ürün 30 dakika öğütülmüş           | 13,69                                | 29,96                                | 4280                                 | 1,0827        |
| Sınıflandırıcı geri dönüş                      | 67,47                                | 104,48                               | 970                                  | 1,5849        |
| Sınıflandırıcı geri dönüş 120 dakika öğütülmüş | 16,7                                 | 41,9                                 | 3950                                 | 0,8947        |
| Sınıflandırıcı geri dönüş 150 dakika öğütülmüş | 14,9                                 | 40                                   | 4260                                 | 0,8926        |
| Sınıflandırıcı besleme                         | 35,22                                | 79                                   | 1940                                 | 0,9748        |
| Sınıflandırıcı besleme 60 dakika öğütülmüş     | 16,3                                 | 44,2                                 | 4320                                 | 0,8613        |
| Sınıflandırıcı besleme 120 dakika öğütülmüş    | 12,7                                 | 37,6                                 | 5110                                 | 0,8269        |

Tablo 19'da verilen ürün özellikleri incelendiğinde, sınıflandırıcı geri dönüş akışının 120 dakika sonunda çimento son ürün d<sub>50</sub> ( $\mu\text{m}$ ) değerine gelebildiği, ancak boyut dağılımının şekil açısından eğiminin düşük olduğu anlaşılmaktadır. Sınıflandırıcı besleme malzemesi numunesinin ise 60 dakikalık bir öğütme işlemi sonunda çimento son ürün d<sub>50</sub> ( $\mu\text{m}$ ) değerine ulaştığı ve benzer şekilde eğim değerinin daha düşük olduğu tespit edilmiştir.

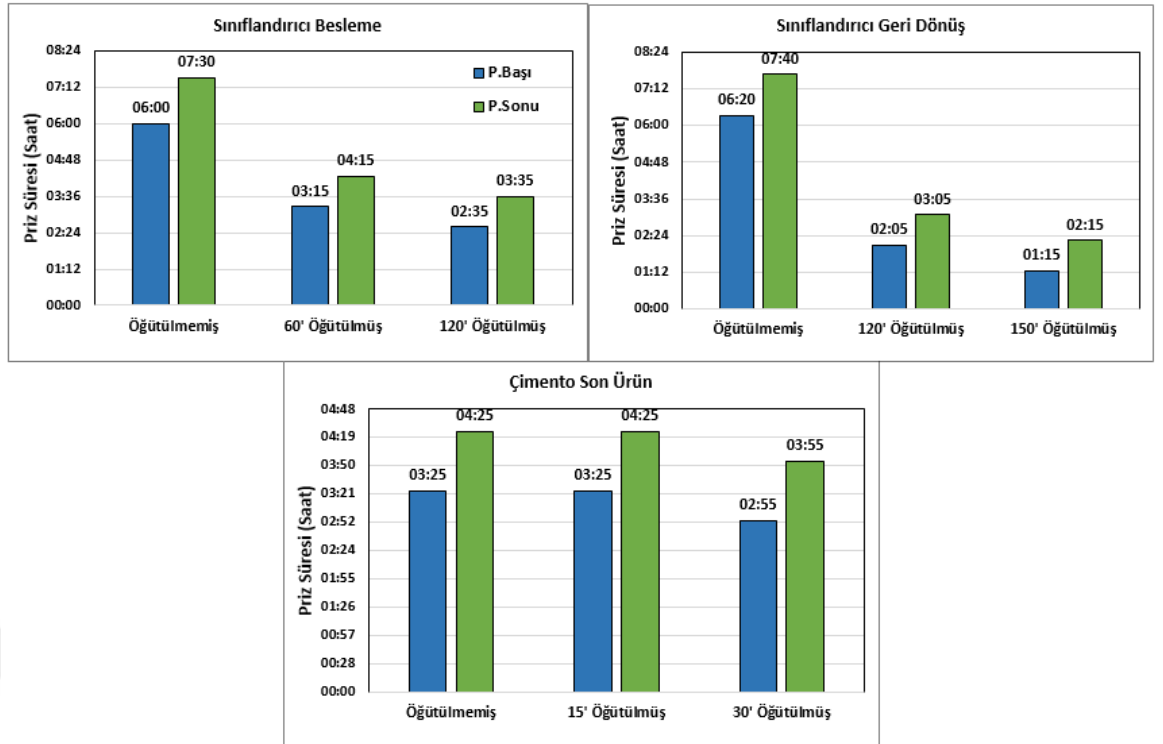


Şekil 30. 1 No'lu Çimento Öğütme Devresi kalite dayanım sonuçları.

Tablo 19'da belirtilen ürün numuneleri için çimento özellikleri belirlenmiştir. Bu bağlamda sırasıyla, çimentolara ait 1-2-7 ve 28 günlük basınç dayanımları, priz süreleri ve su ihtiyaçları göz önünde bulundurulmuştur. Dayanım değerlerinin sonuçları Şekil 30'de sunulmaktadır.

Dayanım sonuçları (Şekil 30) incelendiğinde, 1 ve 2 günlük dayanım değerlerinde sınıflandırıcı besleme ve sınıflandırıcı geri dönüş numunelerinin çimento son ürününe göre oldukça geride kaldıkları anlaşılmaktadır. Gözlemlenen bu farkın 7 ve 28 günlük dayanımlarda ise giderek kapanma eğiliminde olduğu anlaşılmaktadır. Bir başka deyişle, sınıflandırıcı geri dönüş ve sınıflandırıcı besleme numuneleri ince tane boylarına öğütüldükçe 28 günlük (son dayanım) dayanımda öğütülmemiş çimento son ürününü yakalayabilmektedir. Çimento son ürününe ait kalite gelişimi incelendiğinde, öğütme işlemine ve dolayısıyla boyut küçülmesine bağlı olarak dayanım değerlerinin de arttığı tespit edilmiştir.

Çimento numunelerine ait priz süreleri incelendiğinde (Şekil 31) çimento son ürününe ait değerlerin daha düşük olduğu, daha hızlı prizlendiği anlaşılmaktadır. Ayrıca, çimento son ürünü numunesinin öğütme işlemine bağlı olarak priz alma süresinin kısaldığı tespit edilmiştir.



Şekil 31. 1 No'lu Çimento Öğütme Devresi'ne ait kalite ürünleri priz süreleri

Değerlendirme altına alınan çimento özelliklerinden sonuncusu numunelere ait su ihtiyaçlarıdır. Tablo 20'de değerler sunulmaktadır.

Tablo 20. 1 No'lu çimento öğütme devresi numunelerine ait su ihtiyacı verileri

|                                | D <sub>50</sub> (µm) | Su ihtiyacı (%) |
|--------------------------------|----------------------|-----------------|
| Sınıflandırıcı geri dönüş      | 67.47                | 28,4            |
| Sınıflandırıcı geri dönüş 120' | 16.7                 | 24,2            |
| Sınıflandırıcı geri dönüş 150' | 14.9                 | 24,9            |
| Sınıflandırıcı besleme         | 35.22                | 29,95           |
| Sınıflandırıcı besleme 60'     | 16.3                 | 25,0            |
| Sınıflandırıcı besleme 120'    | 12.7                 | 25,5            |
| Çimento son ürün               | 16.62                | 29,7            |
| Çimento son ürün 15'           | 14.99                | 29,2            |
| Çimento son ürün 30'           | 13.69                | 29,4            |

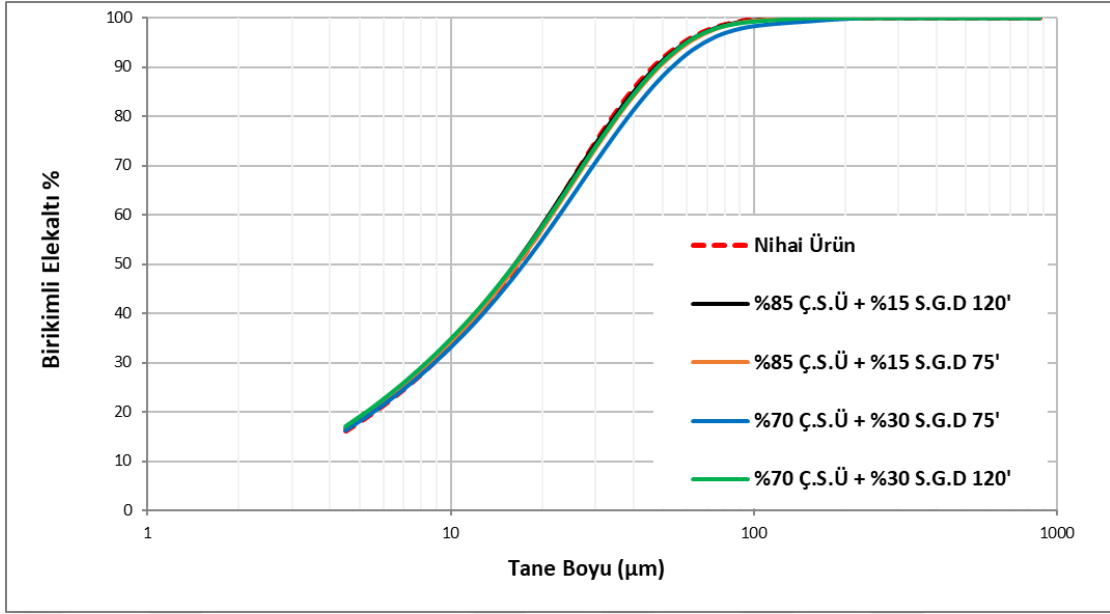
Tablo 20'den çimento son ürününe ait su ihtiyacının diğer numunelere nazaran daha yüksek olduğu anlaşılmaktadır. Aynı d<sub>50</sub> değerlerindeki ürünler arasında (öğütülmemiş son ürün ve 60 dk öğütülmüş sınıflandırıcı besleme) yapılan kıyasta farkın %5,5 puana kadar çıktığı görülmüştür. Çimento son ürün su ihtiyacının öğütülen sınıflandırıcı besleme ve geri dönüşüne göre daha yüksek olması boyut dağılımının şekli ile açıklanabilmektedir. Eğim değerinin daha

düşük olduğu öğütülmüş sınıflandırıcı besleme ve sınıflandırıcı geri dönüş numuneleri daha az suya ihtiyaç duymaktadır (Kuhlmann, 1985).

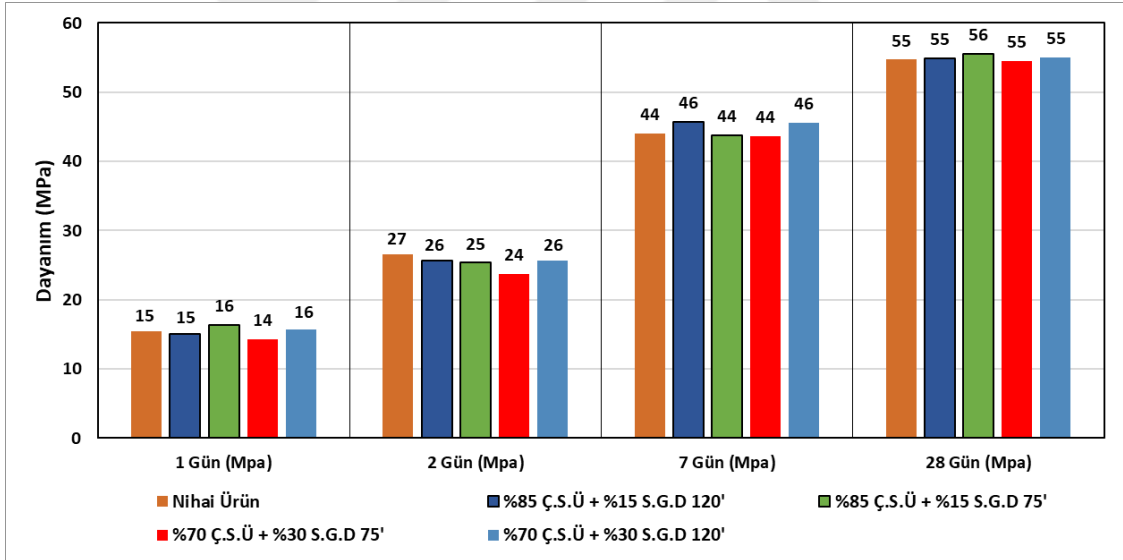
Tablo 21.1 No'lu Çimento Öğütme Devresi karışım numuneleri reçeteleri

|     |                                                                                   |
|-----|-----------------------------------------------------------------------------------|
| K 1 | Sınıflandırıcı geri dönüşü 120dk öğütülüp %15 oranında çimento son ürüne katıldı. |
| K 2 | Sınıflandırıcı geri dönüşü 75dk öğütülüp %15 oranında çimento son ürüne katıldı.  |
| K 3 | Sınıflandırıcı geri dönüşü 75dk öğütülüp %30 oranında çimento son ürüne katıldı.  |
| K 4 | Sınıflandırıcı geri dönüşü 120dk öğütülüp %30 oranında çimento son ürüne katıldı. |

Tek akış kolları üzerinde yürütülen çalışmaların sonrasında karışım numunelerine geçilmiştir. Buradaki amaç, ince öğütme teknolojisinin kullanıldığı akış kolunun son ürüne katıldığında ne gibi etkiler göstereceğinin tanımlanması ya da aradaki farklılığın tespit edilmesini sağlamaktır. Test çalışmaları sınıflandırıcı geri dönüş akışı için yapılmış olup planlanan test aşamaları Tablo 21'de sunulmaktadır. Test planından da anlaşılacağı üzere öğütülen sınıflandırıcı geri dönüş numuneleri ile çimento son ürün farklı oranlarda karıştırılmıştır. Karışımlara ait tane boyu dağılımları Şekil 32'te gösterilmektedir. Karışım numuneleri için çimento özelliklerinden dayanım ve priz sürelerindeki farklılıklar göz önünde bulundurulmuştur.



Şekil 32. 1 No'lu Çimento Öğütme Devresi için hazırlanan karışımların tane boyu dağılımları

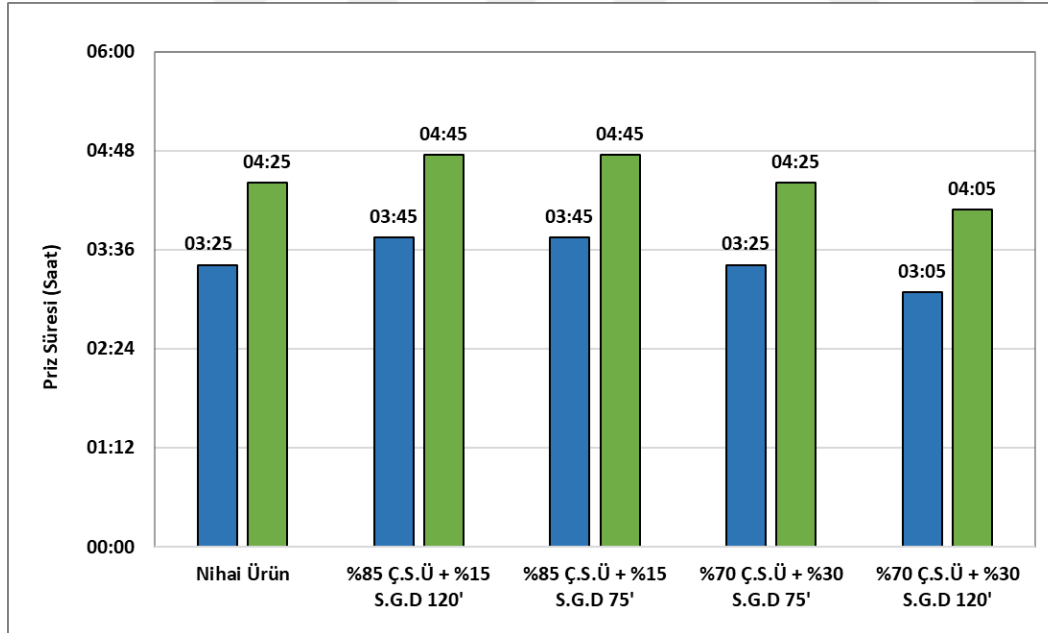


Şekil 33. 1 No'lu Çimento Öğütme Devresi hazırlanan karışımların dayanım değerleri

Numunelerin dayanım değerleri Şekil 33'te gösterilmektedir. Sonuçlar incelendiğinde tüm karışımlarda çimento son ürünün dayanım değerlerinin yakalandığı gözlemlenmektedir. Sınıflandırıcı geri dönüşünün 75 dakika öğütüldüğü ve kullanım oranının artırıldığı koşulda erken dayanımda düşüş olduğu gözlemlenmiştir. Öte yandan, sınıflandırıcı geri dönüş numunesinin 120

ve 75 dakika öğütölüp %15 oranında çimento son ürün numunesi ile karışım hazırlandığı koşullarda benzer dayanım sonuçları elde edilmiştir. Dayanım değerlerinden 28 günlüklerdeki değişim aralığı 55-56 MPa olarak tespit edilmiştir. Ek olarak, sınıflandırıcı geri dönüş numunesinin 120 dakika öğütöldükten sonra %30 oranında çimento son ürünü ile karıştırılan malzeme de dayanım özellikleri anlamında çimento son ürünü ile benzerlikler göstermektedir. Bu bağlamda, geri dönüş malzemesinin öğütölmesi ve son ürüne katılması uygulanabilir bir alternatif olarak görülmektedir.

Karışımlara ait priz süreleri Şekil 34'te sunulmaktadır. Çimento son ürünün priz sürelerine en yakın karışım 75 dakika öğütölmüş sınıflandırıcı geri dönüşünün %30 oranında çimento son ürününe katılması ile elde edilmiştir. Çok ince tane boyutuna öğütölmüş (120 dk.) sınıflandırıcı geri dönüşüne ait %30 oranındaki katkı (K4) değeri incelendiğinde son ürün değerine göre priz süresinde azalma olduğu belirlenmiştir. İnce öğütme işlemi, katkı oranının arttırılmasına rağmen priz anlamında avantaj getirmiştir.



Şekil 34. 1 No'lu Çimento Öğütme Devresi hazırlanan karışımların priz süreleri

#### 4.2.5.2. 4 No'lu Çimento Öğütme Devresi'nde Yürütülen Kalite Çalışmaları

Şekil 14'te gösterilen numune alma noktalarından aşağıda belirtilenler üzerinde detaylı kalite değerlendirmeleri yapılmıştır.

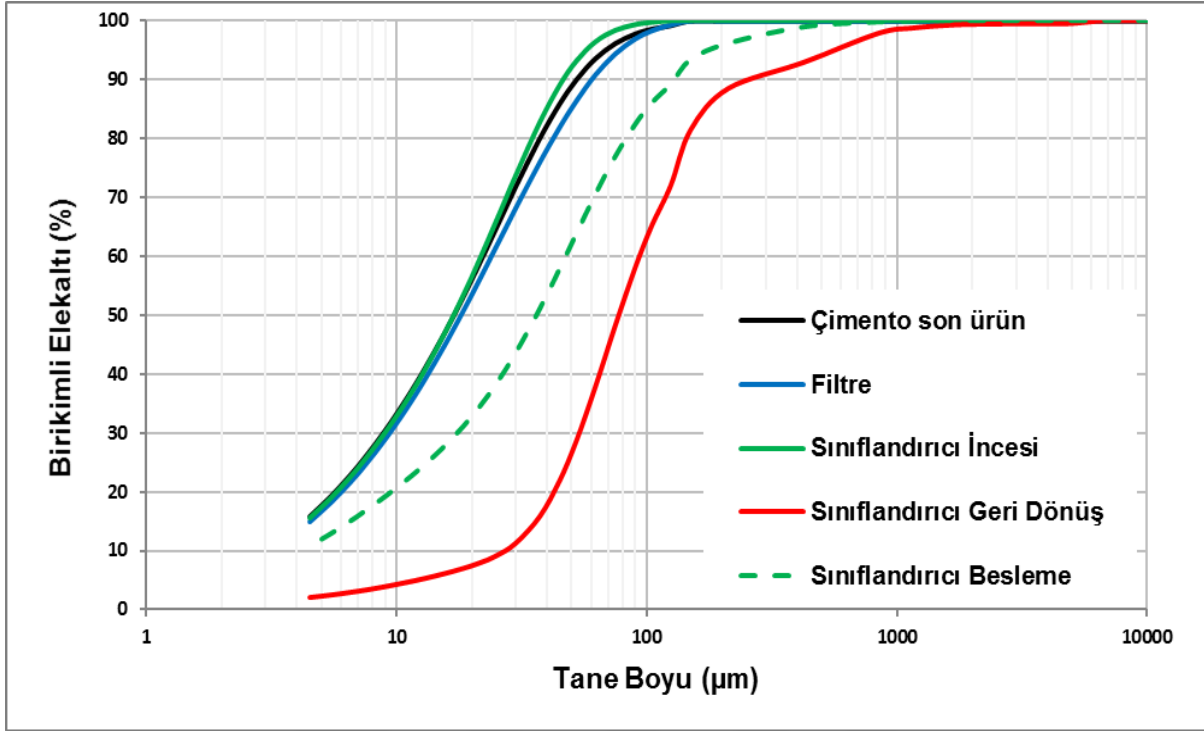
- Sınıflandırıcı geri dönüşü
- Sınıflandırıcı besleme
- Sınıflandırıcı ince
- Çimento son ürün
- Değirmen filtre ürünü

Tablo 22'de kullanılan numunelerin kimyasal içerikleri sunulurken, Şekil 35'da bu numunelere ait boyut dağılımları gösterilmektedir.



Tablo 22.Çalışmada kullanılan numunelere ait kimyasal kompozisyonlar

| Bileşen                        | Çimento son ürün | Filtre | Sınıflandırıcı incesi | Sınıflandırıcı geri dönüş | Sınıflandırıcı besleme |
|--------------------------------|------------------|--------|-----------------------|---------------------------|------------------------|
| SiO <sub>2</sub>               | 19,05            | 18,76  | 18,87                 | 20,26                     | 19,42                  |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 5,13             | 5,04   | 5,12                  | 5,51                      | 5,28                   |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 3,1              | 3,11   | 3,1                   | 3,37                      | 3,22                   |
| CaO                            | 62,94            | 62,51  | 62,98                 | 63,75                     | 63,26                  |
| MgO                            | 1,04             | 1,03   | 1,03                  | 1,05                      | 1,05                   |
| SO <sub>3</sub> (YAŞ)          | 2,46             | 2,23   | 2,49                  | 1,26                      | 1,96                   |
| Na <sub>2</sub> O              | 0,52             | 0,49   | 0,5                   | 0,50                      | 0,51                   |
| K <sub>2</sub> O               | 0,54             | 0,54   | 0,55                  | 0,52                      | 0,54                   |
| Cl                             | 0,018            | 0,021  | 0,023                 | 0,018                     | 0,014                  |
| Çözünmeyen kalıntı             | 0,13             | 0,04   | 0,07                  | 0,18                      | 0,10                   |
| Kızdırma kaybı                 | 5,07             | 6,23   | 5,27                  | 6,95                      | 4,65                   |



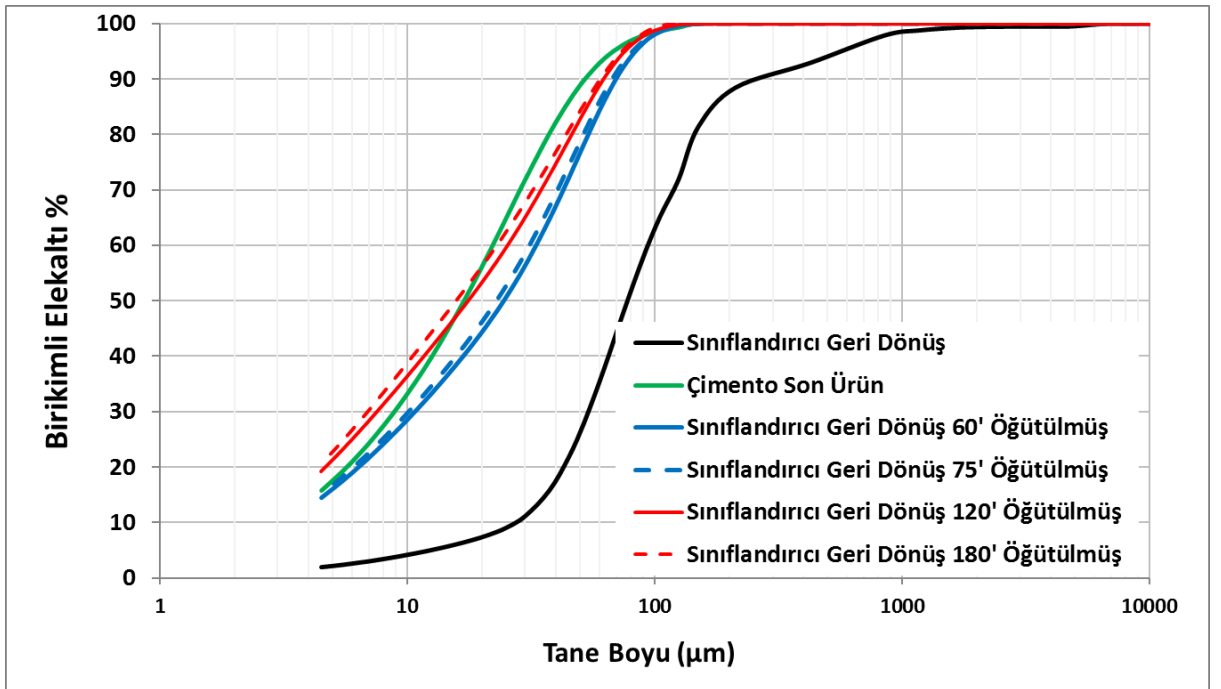
Şekil 35. 4 No'lu Çimento Öğütme Devresi kalite numuneleri boyut dağılımları.

4 No'lu çimento öğütme devresinden toplanan numuneler farklı zamanlarda öğütme işlemine tabi tutulmuştur. Bu öğütme çalışmalarında amaç, son ürün inceliğinin yakalandığı koşulun belirlenmesi ve sonrasında belirlenen malzemeler için kalite test çalışmalarının yürütülmesidir. Tablo 23'te öğütme testlerinin yapıldığı zamanlar ve numune isimleri verilmektedir. Şekil 36, Şekil 37, Şekil 38 ve Şekil 39'ta öğütme işlemi sonrasında ölçülen boyut dağılımları gösterilmektedir.

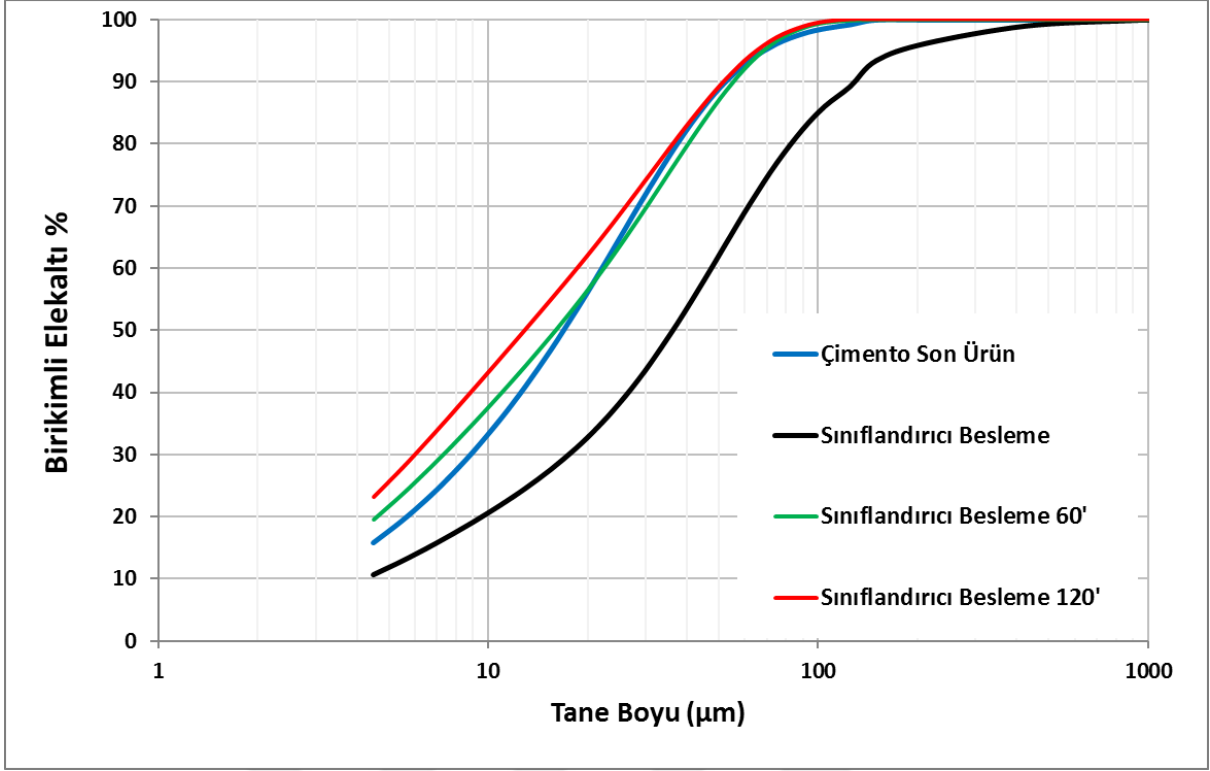
Tablo 23. 4 No'lu çimento öğütme devresi kalite test planı

|                           | Öğütme zamanları         |
|---------------------------|--------------------------|
| Sınıflandırıcı besleme    | 60dk, 120dk              |
| Sınıflandırıcı geri dönüş | 60dk, 75dk, 120dk, 180dk |
| Sınıflandırıcı ince       | Öğütülmemiştir           |
| Değirmen filtre           | 15dk, 30dk               |
| Çimento son ürün          | 15dk, 30dk               |

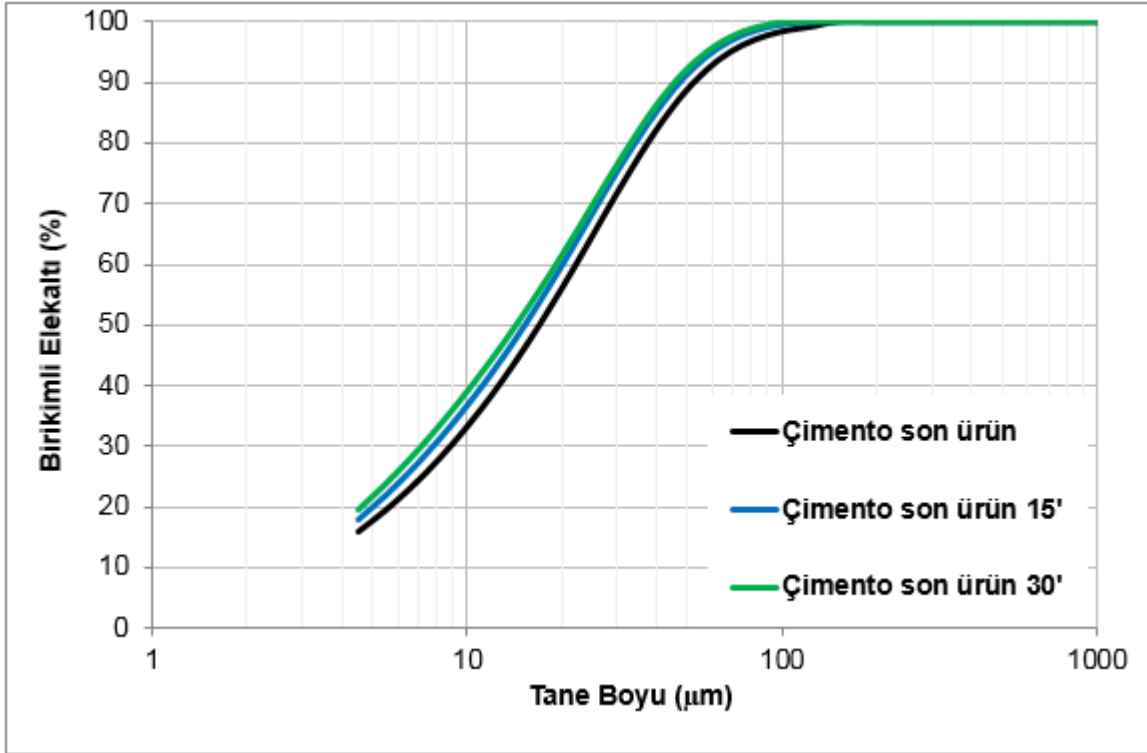
Tablo 23'ten görüleceği üzere sınıflandırıcı ince malzemesi üzerinde herhangi bir öğütme işlemi yapılmamıştır. Akım şeması incelendiğinde, sınıflandırıcı ince malzemesinin değirmen filtre ürünü ile karıştıktan sonra çimento son ürününü oluşturduğu anlaşılmaktadır. Sınıflandırıcı ince malzemesi öğütülmeden, farklı oranlarda, öğütülmüş filtre ürünü ile karıştırılmıştır. Ayrıca, farklı inceliklere öğütülmüş değirmen filtre ürünü de farklı oranlarda çimento son ürünü ile karıştırılarak değerlendirmeler yapılmıştır. Ek olarak, devreden alınan çimento son ürünü üzerinde de incelik-dayanım ilişkisi tanımlanmaya çalışılmıştır.



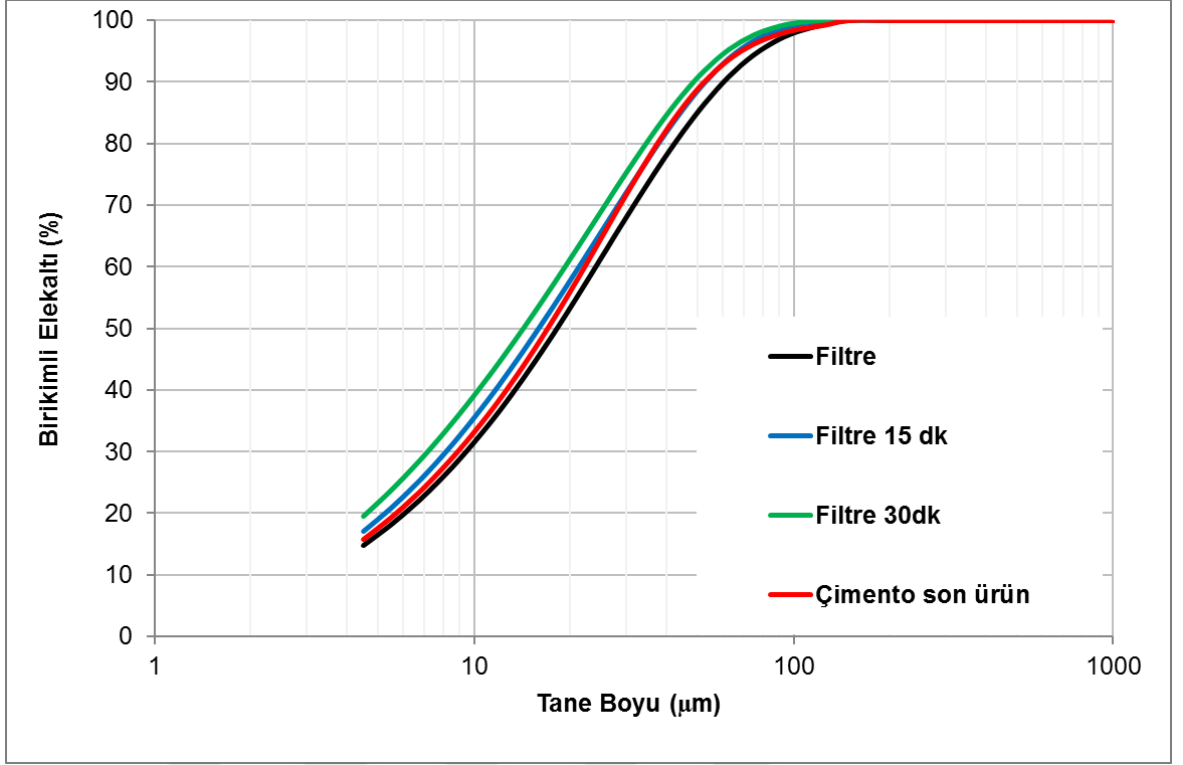
Şekil 36. 4 No'lu Çimento Öğütme Devresi, sınıflandırıcı geri dönüşü boyut dağılımları



Şekil 37. 4 No'lu Çimento Öğütme Devresi, sınıflandırıcı beslemesi boyut dağılımları



Şekil 38. 4 No'lu Çimento Öğütme Devresi, çimento son ürünü boyut dağılımları



Şekil 39. 4 No'lu Çimento Öğütme Devresi, değirmen filtresi boyut dağılımları

Ölçülen boyut dağılımları incelendiğinde Tablo 24'te verilen numune isimlerinin kalite çalışmalarında kullanılmasına karar verilmiştir. Bu numunelerin seçimindeki en büyük etken çimento son ürün numunesine yakın boyut dağılımlarının elde edilebilmesidir. Önceki çalışmada olduğu gibi öğütme işlemi neticesinde çimento son ürün dayanım değerlerinin hangi oranda gelişebileceği de çalışma kapsamında incelenmiştir. Sınıflandırıcı geri dönüş malzemesine ait 75 dakikalık öğütme sonucu da denemelere dâhil edilmiş olup burada bir miktar kaba mal üretiminde dayanımda meydana gelebilecek düşüşün saptanması amaçlanmıştır. Değirmen filtre çıkışı boyut dağılımı incelendiğinde, çimento son ürününe göre bir miktar iri olduğu anlaşılmaktadır. Bu nedenle değirmen filtre numunesinin de öğütülmesi planlamaya dâhil edilmiştir.

Tablo 24. 4 No'lu Çimento Öğütme devresi kalite test planı

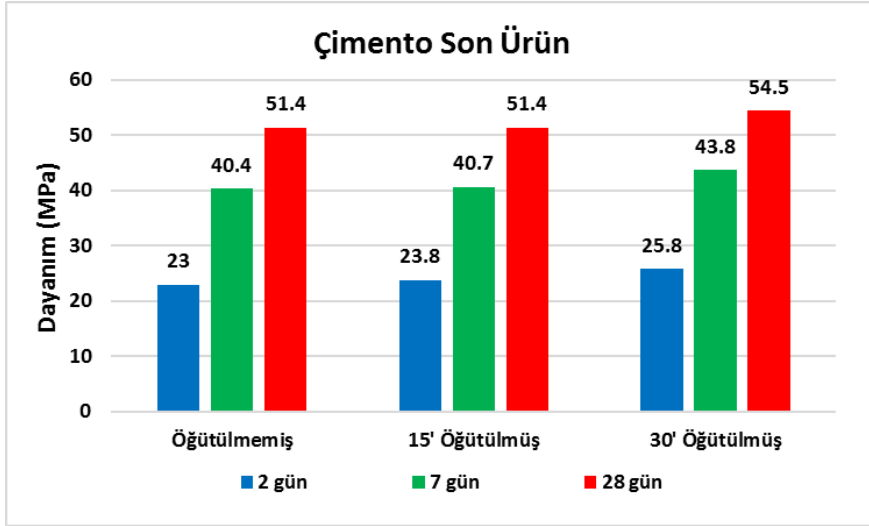
|                           |             |
|---------------------------|-------------|
| Sınıflandırıcı besleme    | 60dk        |
| Sınıflandırıcı geri dönüş | 75dk, 120dk |
| Değirmen filtre           | 15dk        |
| Çimento son ürün          | 15dk, 30dk  |

Tablo 25'te numunelere ait ürün özellikleri sunulmaktadır. İncelik, yüzey alanı ve boyut dağılımlarının eğim değerleri bu kapsamda değerlendirilmiştir.

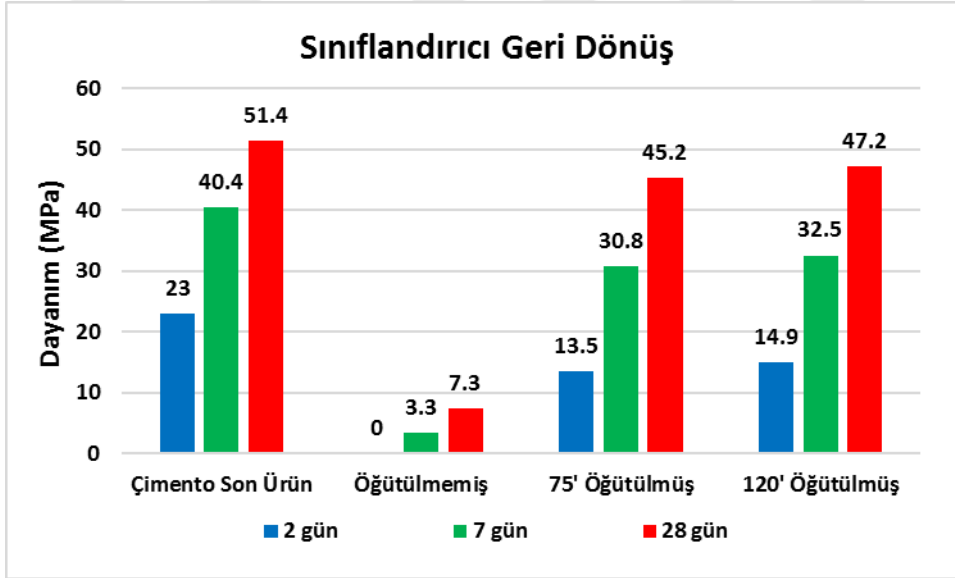
Tablo 25. 4 No'lu Çimento Öğütme Devresi numunelerine ait ürün özellikleri

|                                             | D <sub>50</sub><br>( $\mu$ m) | D <sub>80</sub><br>( $\mu$ m) | RRSB,n | Blaine<br>(cm <sup>2</sup> /gr) |
|---------------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|--------|---------------------------------|
| Filtre 15 dk. öğütülmüş                     | 15,94                         | 37,84                         | 0,9957 | 3760                            |
| Çimento son ürün 15 dk. öğütülmüş           | 15,22                         | 34,44                         | 1,0239 | 4010                            |
| Çimento son ürün 30 dk. öğütülmüş           | 14,28                         | 33,28                         | 0,9945 | 4490                            |
| Sınıflandırıcı besleme 60 dk. öğütülmüş     | 16                            | 40,52                         | 0,9057 | 4290                            |
| Sınıflandırıcı geri dönüş 75 dk. öğütülmüş  | 22,96                         | 51,54                         | 0,9420 | 3500                            |
| Sınıflandırıcı geri dönüş 120 dk. öğütülmüş | 17,75                         | 46,45                         | 0,8617 | 4080                            |
| Öğütülmemiş çimento son ürün                | 17                            | 37,4                          | 1,0438 | 3520                            |
| Öğütülmemiş Filtre                          | 18,15                         | 42,5                          | 1,0108 | 3290                            |
| Öğütülmemiş sınıflandırıcı incesi           | 16,9                          | 35,15                         | 1,1072 | 3450                            |
| Öğütülmemiş sınıflandırıcı geri dönüş       | 77,76                         | 146,2                         | 1,5606 | 790                             |
| Öğütülmemiş sınıflandırıcı besleme          | 36,42                         | 69,65                         | 0,9276 | 2210                            |

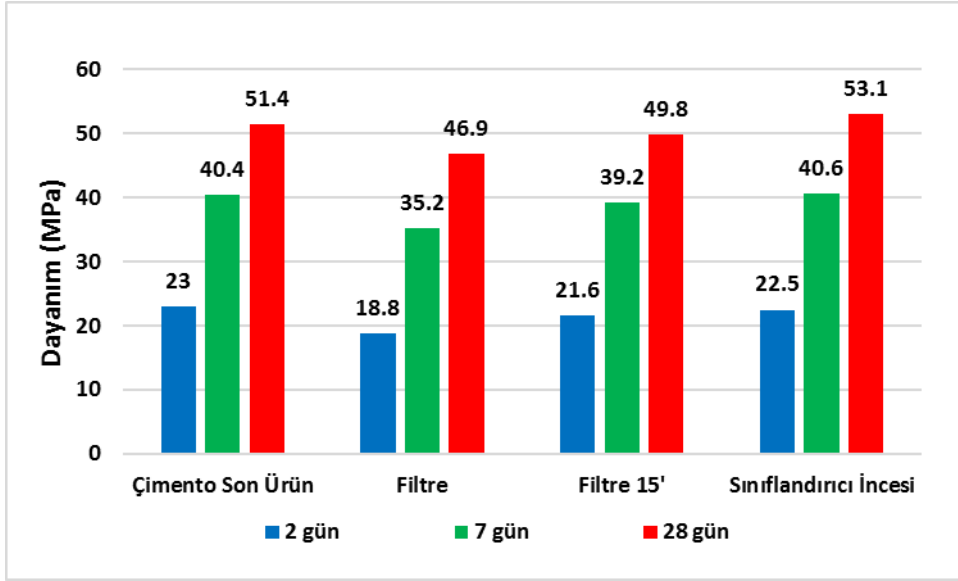
Tablo 25'te belirtilen ürün numuneleri için çimento özellikleri belirlenmiştir. Bu bağlamda sırasıyla, çimentolara ait 2, 7 ve 28 günlük basınç dayanımları, priz süreleri ve su ihtiyaçları göz önünde bulundurulmuştur. Dayanım değerlerinin sonuçları Şekil 40, Şekil 41, Şekil 42 ve Şekil 43'te sunulmaktadır.



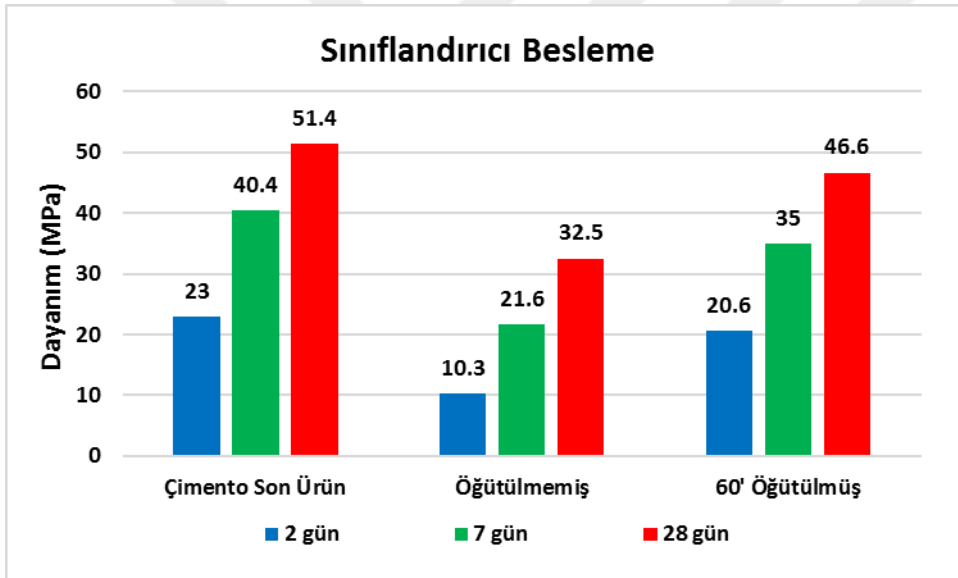
Şekil 40. 4 No'lu Çimento Öğütme Devresi, çimento son ürün dayanım değerleri



Şekil 41. 4 No'lu Çimento Öğütme Devresi, sınıflandırıcı geri dönüş dayanım değerleri

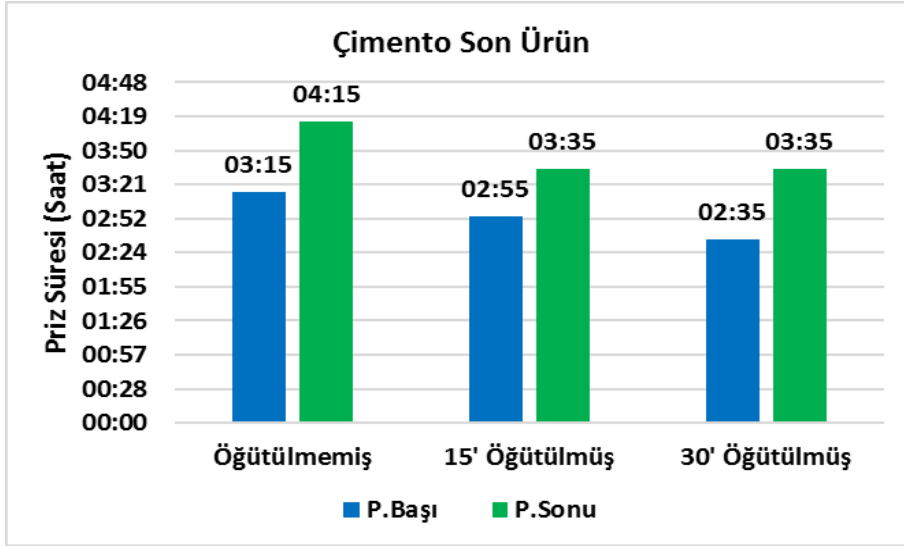


Şekil 42. 4 No'lu Çimento Öğütme Devresi, filtre dayanım değerleri

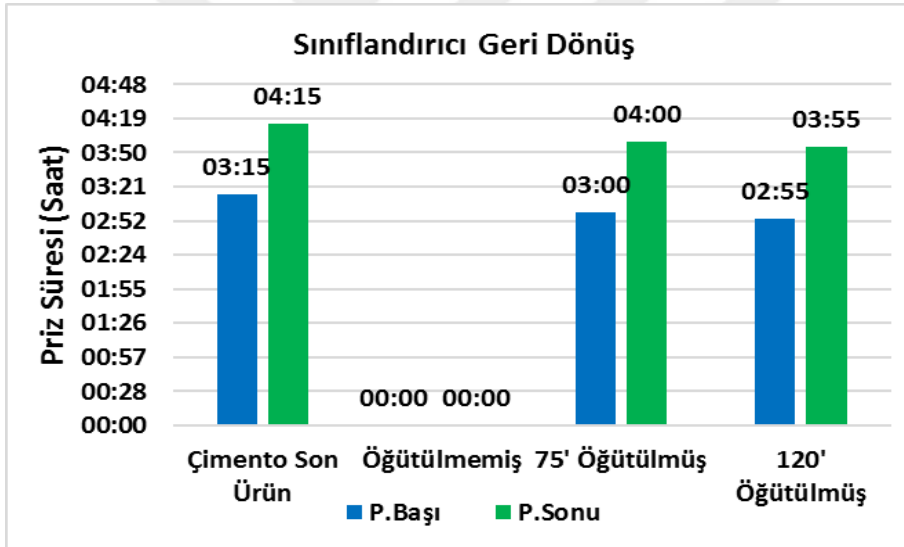


Şekil 43. 4 No'lu Çimento Öğütme Devresi, sınıflandırıcı besleme dayanım değerleri

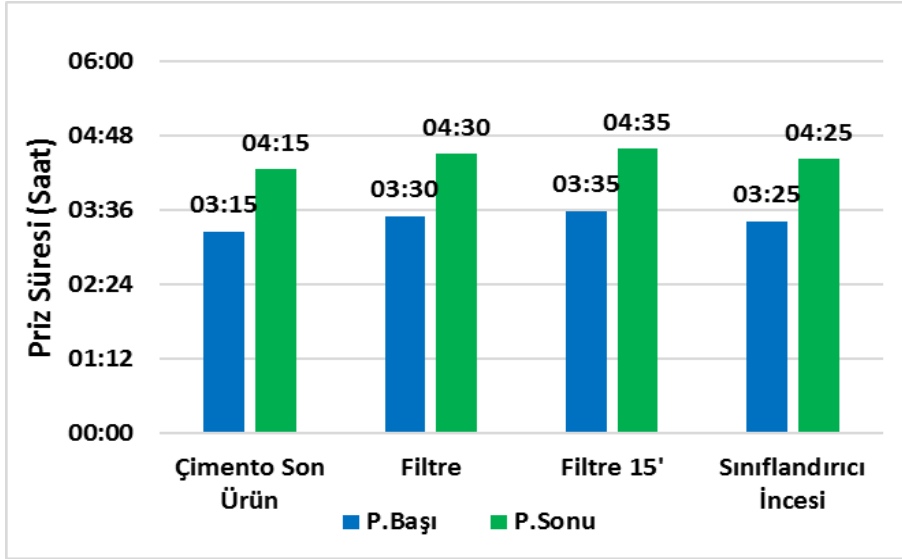
Numunelere ait priz değerlerinin sonuçları Şekil 44, Şekil 45, Şekil 46 ve Şekil 47'de sunulmaktadır. Çimento son ürünün öğütülmesi dayanım sonuçlarında artışa neden olurken priz sürelerinde kısaltmaya sebep olmuştur. Sınıflandırıcı geri dönüşünün ve beslemesinin öğütülmesi ile çimento son ürün dayanımları yakalanamamıştır. Bu akış kollarının priz süreleri de çimento son ürününden düşük çıkmıştır. 4 No'lu çimento öğütme devresine ait numunelerin incelik değerleri ve su ihtiyaçları ise Tablo 26'da sunulmaktadır.



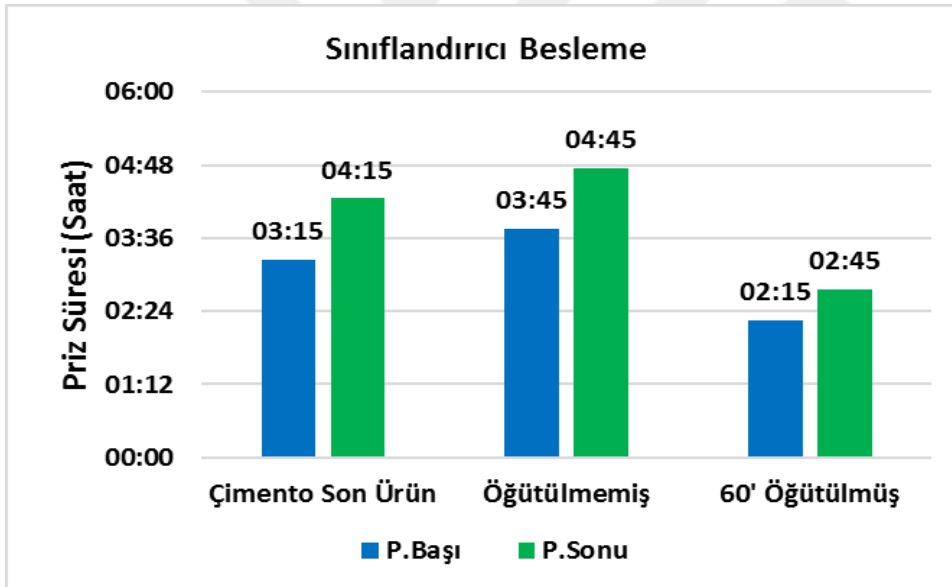
Şekil 44. 4 No'lu Çimento Öğütme Devresi, çimento son ürün priz süreleri



Şekil 45. 4 No'lu Çimento Öğütme Devresi, sınıflandırıcı geri dönüş priz süreleri



Şekil 46. 4 No'lu Çimento Öğütme Devresi, filtre numunesi priz süreleri



Şekil 47. 4 No'lu Çimento Öğütme Devresi, sınıflandırıcı besleme priz süreleri

Tablo 26. 4 No'lu Çimento Öğütme Devresi'ne ait numunelerin incelik değerleri ve su ihtiyaçları

|                                             | D <sub>50</sub> (µm) | Su ihtiyacı % |
|---------------------------------------------|----------------------|---------------|
| Filtre 15 dk. öğütülmüş                     | 15,94                | 29,2          |
| Çimento son ürün 15 dk. öğütülmüş           | 15,22                | 29            |
| Çimento son ürün 30 dk. öğütülmüş           | 14,28                | 28            |
| Sınıflandırıcı besleme 60 dk. öğütülmüş     | 16                   | 24,35         |
| Sınıflandırıcı geri dönüş 75 dk. öğütülmüş  | 22,96                | 24,55         |
| Sınıflandırıcı geri dönüş 120 dk. öğütülmüş | 17,75                | 25,25         |
| Öğütülmemiş çimento son ürün                | 17                   | 29,8          |
| Öğütülmemiş filtre                          | 18,15                | 29,5          |
| Öğütülmemiş sınıflandırıcı incesi           | 16,9                 | 30,3          |
| Öğütülmemiş sınıflandırıcı geri dönüş       | 77,76                | ölçülmemiştir |
| Öğütülmemiş sınıflandırıcı besleme          | 36,42                | 25,5          |

1 No'lu Çimento Öğütme Devresi'nde yapılan analizlere benzer olarak, 4 No'lu Çimento Öğütme Devresi etrafından toplanan numuneler de belli oranlarda karıştırılarak dayanım sonuçları üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. 1 No'lu Çimento Öğütme Devresinden farklı olarak, değirmen filtre numunesi de öğütülüp sınıflandırıcı ince numunesi ile belli oranlarda karıştırılmıştır. Buradaki amaç, çimento son ürün numunesinden daha iri olan değirmen filtre akışının ince öğütme teknolojisi ile öğütülüp sınıflandırıcı incesi ile karıştırılması durumunda kalite üzerinde olumlu bir etki yaratıp yaratmayacağının test edilmesidir.

Planlanan test prosedürü Tablo 27'de sunulmaktadır. Test planından da anlaşılacağı üzere sınıflandırıcı besleme, sınıflandırıcı geri dönüş numuneleri çimento son ürün ile karıştırılmış ek olarak da farklı inceliklere öğütülmüş değirmen filtre ürünü sınıflandırıcı incesi ile karıştırılmıştır.

Tablo 27. 4 No'lu Çimento Öğütme Devresi karışım numuneleri reçeteleri  
Karışımlar

---

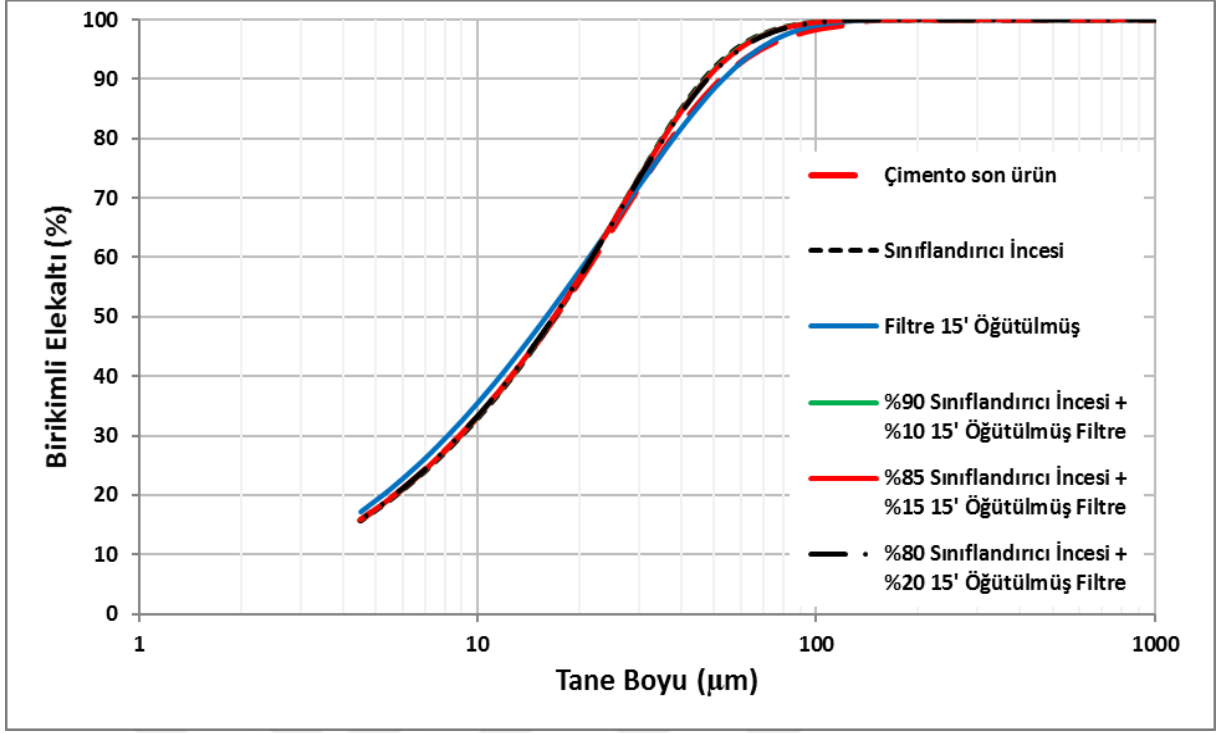
|                                                                        |
|------------------------------------------------------------------------|
| %90 Sınıflandırıcı incesi+%10 15 dk. öğütülmüş filtre                  |
| %85 Sınıflandırıcı incesi+%15 15 dk. öğütülmüş filtre                  |
| %80 Sınıflandırıcı incesi+%20 15 dk. öğütülmüş filtre                  |
| %90 Çimento son ürün+%10 60 dk. öğütülmüş sınıflandırıcı besleme       |
| %85 Çimento ürün ürün+%15 60 dk. öğütülmüş sınıflandırıcı besleme      |
| %80 Çimento son ürün +%20 60 dk. öğütülmüş sınıflandırıcı besleme      |
| %90 Çimento son ürün + %10 75 dk. öğütülmüş sınıflandırıcı geri dönüş  |
| %85 Çimento son ürün + %15 75 dk. öğütülmüş sınıflandırıcı geri dönüş  |
| %80 Çimento son ürün + %20 75 dk. öğütülmüş sınıflandırıcı geri dönüş  |
| %90 Çimento son ürün + %10 120 dk. öğütülmüş sınıflandırıcı geri dönüş |
| %85 Çimento son ürün + %15 120 dk. öğütülmüş sınıflandırıcı geri dönüş |
| %80 Çimento son ürün + %20 120 dk. öğütülmüş sınıflandırıcı geri dönüş |

---

Bu numunelere ait boyut dağılımları da ölçülmüş olup dayanım sonuçları ile birlikte sunulacaktır.

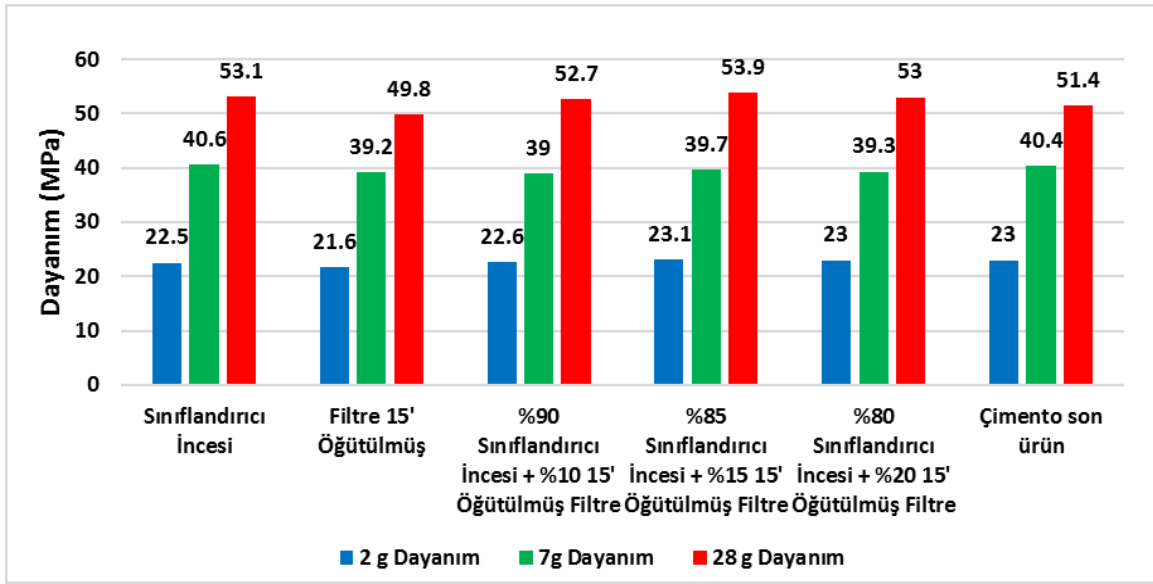
#### 4.2.5.2.1. Değirmen Filtre Akış Kolu Üzerinde Yapılan Kalite Çalışmaları

Filtre akış kolunun öğütülmesi ve sonrasında sınıflandırıcı ince numunesi ile karıştırılmasının çimento son ürün özelliği anlamında ne gibi farklılıklar yaratabileceği çalışma kapsamında değerlendirilmiştir. Çalışma planında da özetlendiği üzere 15 dakika öğütülen değirmen filtre numunesi sırasıyla kütlege %10, %15 ve %20 oranında olacak şekilde sınıflandırıcı ince numunesi ile karıştırılmıştır. Şekil 48'da tane boyu dağılımları gösterilmektedir

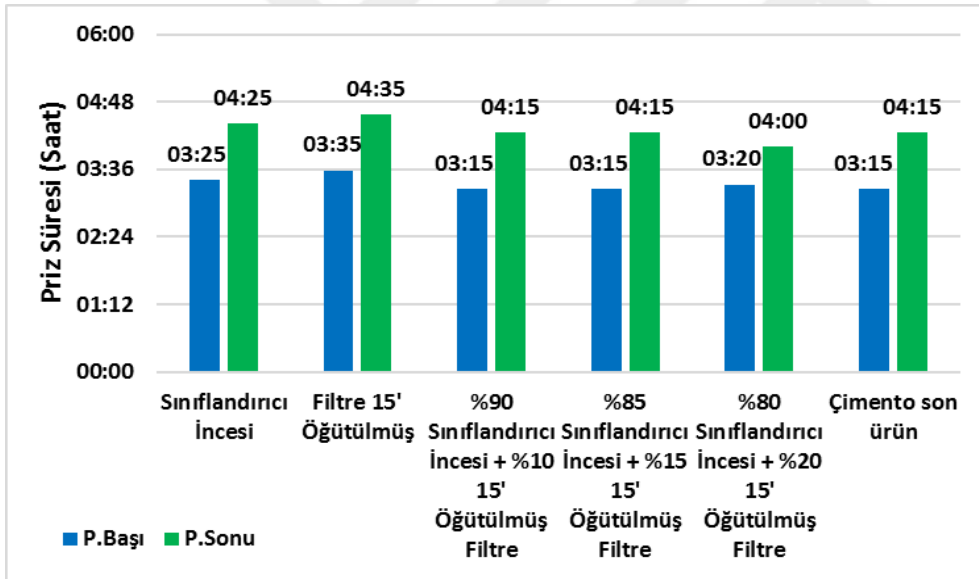


Şekil 48. 4 No'lu Çimento Öğütme Devresi'ne ait hazırlanan karışımların tane boyu dağılımları (filtre ve sınıflandırıcı ince)

Şekil 49'de numunelere ait dayanım sonuçları gösterilmektedir. Veriler incelendiğinde bütün karışımların 28 günlük dayanımlarının çimento son üründen daha yüksek olduğu gözükmeştir. Sonuç olarak, filtre numunesinin öğütülmesinin ve sonrasında sınıflandırıcı ürünü ile karıştırılmasının kalite anlamında olumlu olduğu tespit edilmiştir. Şekil 50 incelendiğinde ise filtre katkısının %20'ye çıkarıldığı durumda priz süresinde kısalma gözlenmiştir.



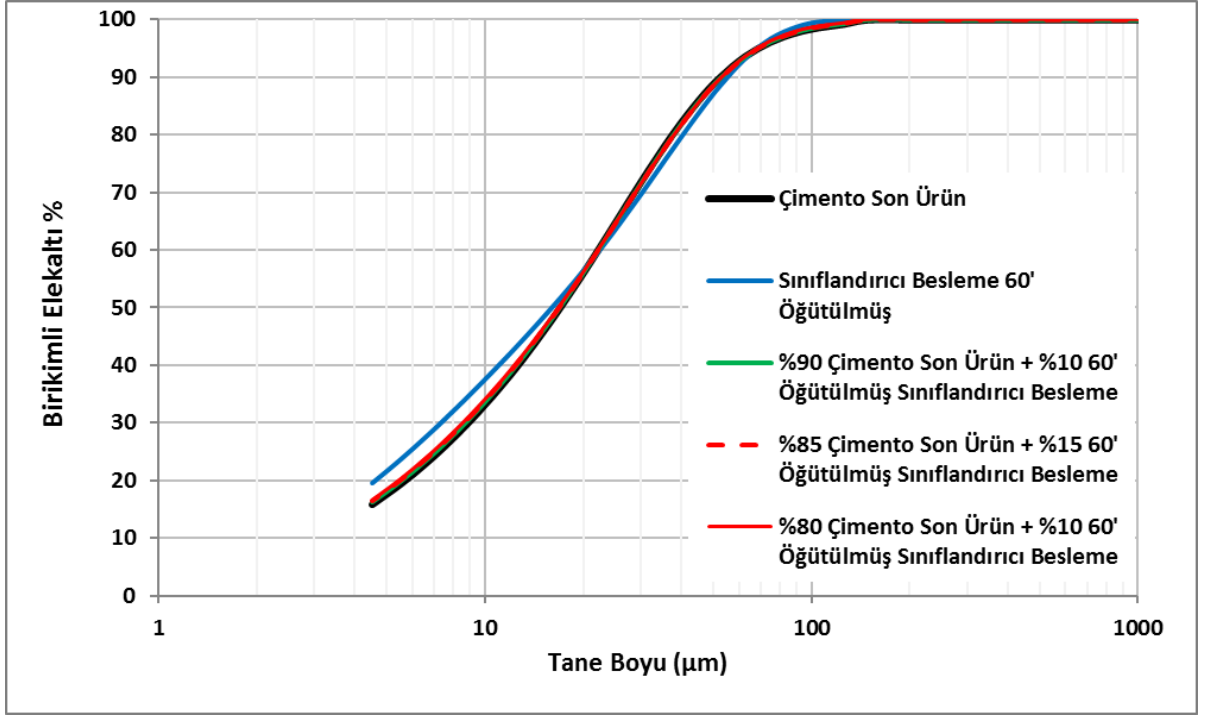
Şekil 49. 4 No'lu Çimento Öğütme Devresi'ne ait hazırlanan karışımların dayanım değerleri (filtre ve sınıflandırıcı incesi)



Şekil 50. 4 No'lu Çimento Öğütme Devresi'ne ait hazırlanan karışımların priz süreleri (filtre ve sınıflandırıcı incesi)

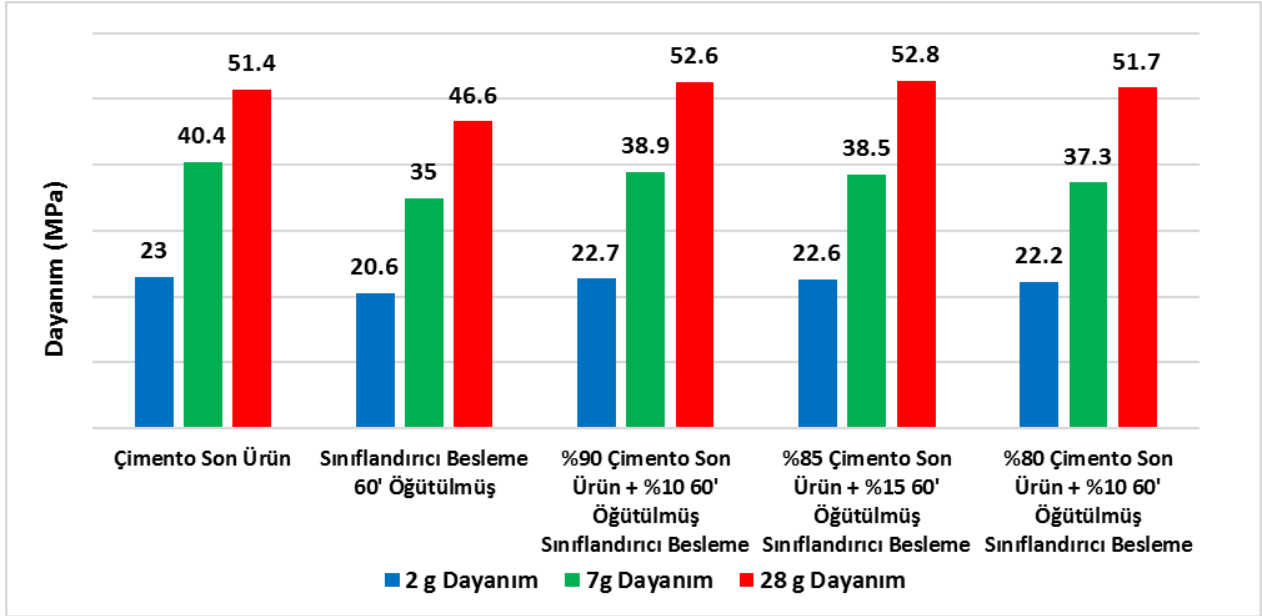
#### 4.2.5.2.2. Sınıflandırıcı Besleme Akış Kolu Üzerinde Yapılan Çalışmalar

Çalışmanın bu kısmında, 60 dakika öğütülen sınıflandırıcı beslemesinin sırasıyla %10, %15 ve %20 oranlarında çimento son ürününe katılmasının etkileri araştırılmıştır. Numunelere ait tane boyu dağılımları Şekil 51’de gösterilmektedir.



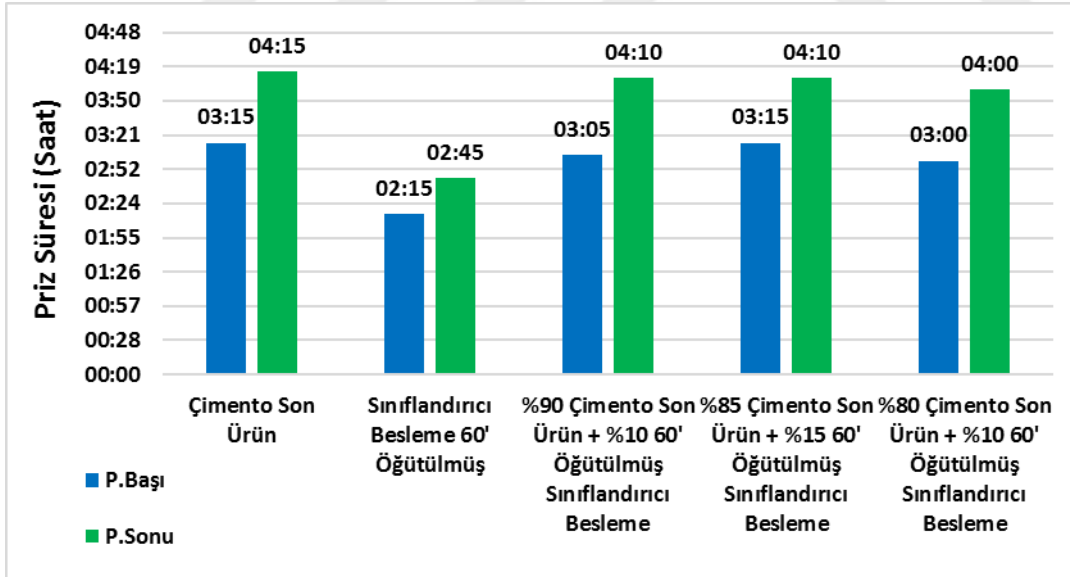
Şekil 51. 4 No’lu Çimento Öğütme Devresi’ne ait hazırlanan karışımların tane boyu dağılımları (sınıflandırıcı besleme ve çimento son ürün)

Numunelere ait dayanım değerleri Şekil 52’te gösterilmektedir. Elde edilen bulgular, sınıflandırıcı besleme numunesi oranının %20 değerine kadar çıkarılabileceğini göstermiştir. Bu noktada çimento son ürünü ile dayanım değerlerinin benzerlik gösterdiği anlaşılmıştır. Karışım oranlarına ait dayanım değerleri incelendiğinde (%10, %15, %20), çimento son ürün dayanımına kıyasla daha yüksek olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 52. Çimento son ürün – sınıflandırıcı besleme karışımı dayanım verileri

Numunelere ait priz sürelerindeki farklılık Şekil 46’da gösterilmektedir. Katkının artması priz süresinde (Şekil 53) azalmaya neden olurken, kısılma süresi 15 dakika değerine kadar ulaşabilmektedir.

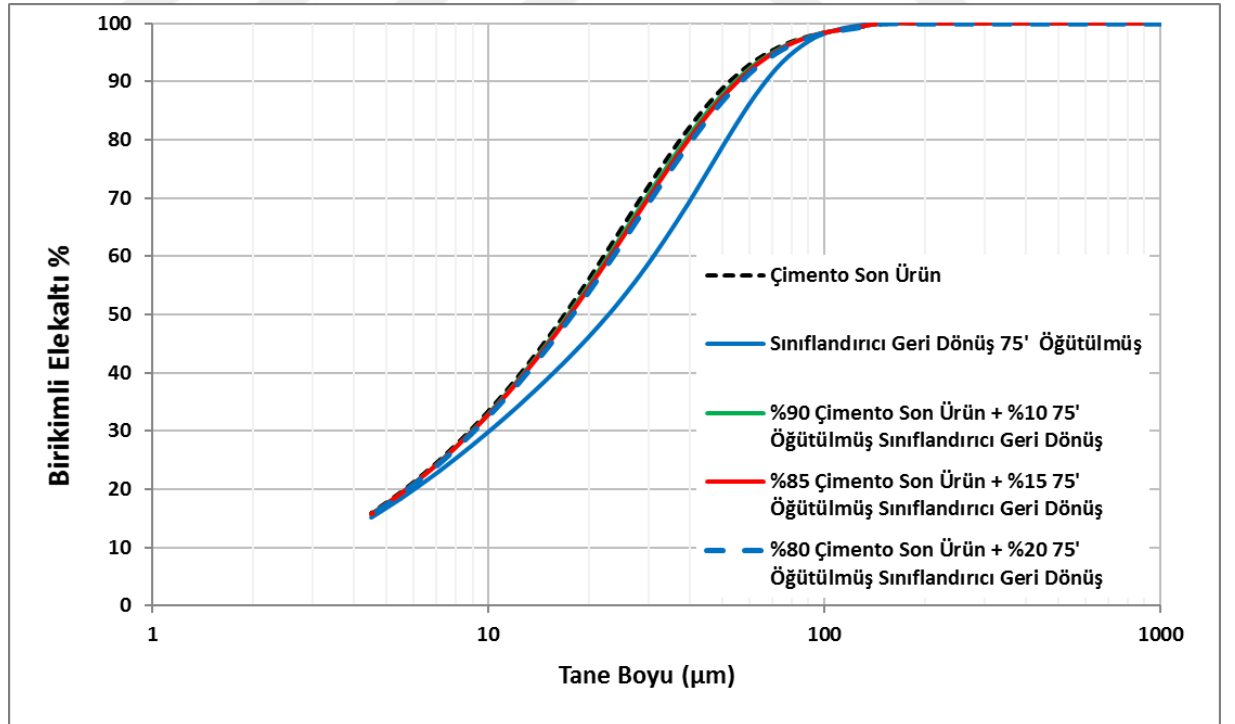


Şekil 53. Çimento son ürün – sınıflandırıcı besleme karışım priz süreleri

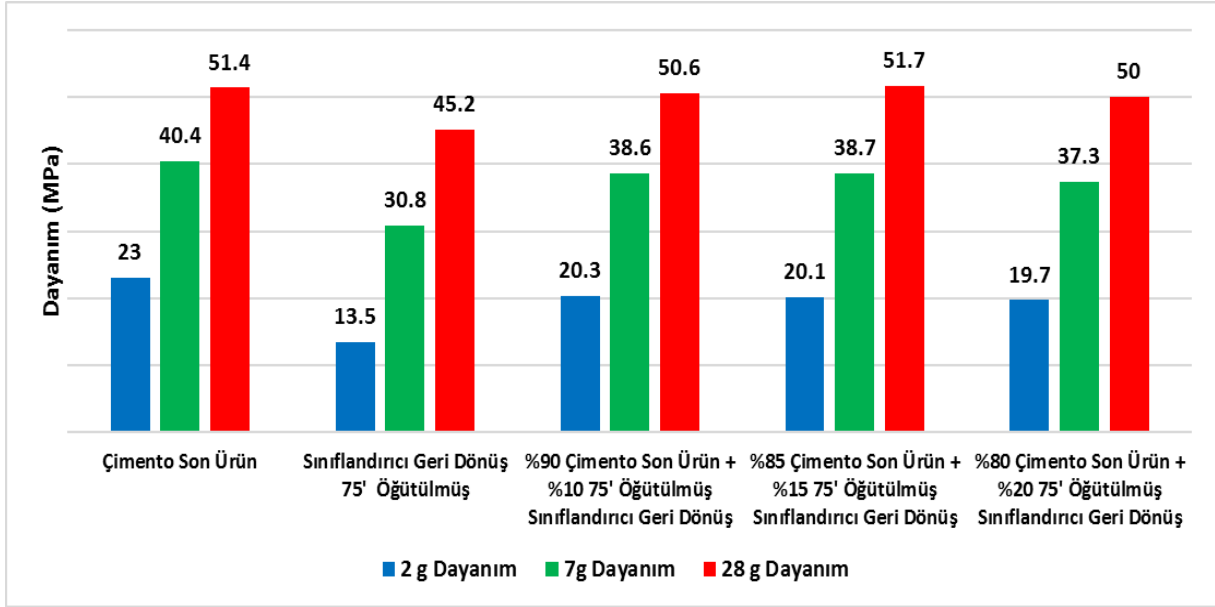
#### 4.2.5.2.3. Sınıflandırıcı Geri Dönüş Akış Kolu Üzerinde Yapılan Karışım Çalışmaları

Çalışmanın bir diğer aşamasında, 75 ve 120 dakika öğütülen sınıflandırıcı geri dönüş malzemesinin sırasıyla %10, %15 ve %20 oranlarında çimento son ürününe katılmasının etkileri araştırılmıştır. Numunelere ait tane boyu dağılımları Şekil 54'te gösterilmektedir.

Numunelere ait dayanım sonuçları Şekil 55'da sunulmuştur. Dayanım değerleri incelendiğinde, sınıflandırıcı geri dönüş oranı arttıkça erken dayanımda (2 ve 7 günlük) düşüş olduğu gözlemlenmiştir. Öte yandan, orandaki artış 28 günlük dayanımda büyük bir fark yaratmadığı görülmüştür. Çimento standartlarında (TS EN 196-1) 2 günlük dayanım değerinin (42,5 R için) en az 20 MPa olması gerektiği belirtilmekte olup, %20'lik karışımın bu koşulu sağlamadığı anlaşılmıştır. Diğer karışım oranları incelendiğinde ise, çimento son ürününe yakın oldukları anlaşılmaktadır. Özellikle %15'lik karışımın ürün özellikleri standart üretime yakın bulunmuştur.

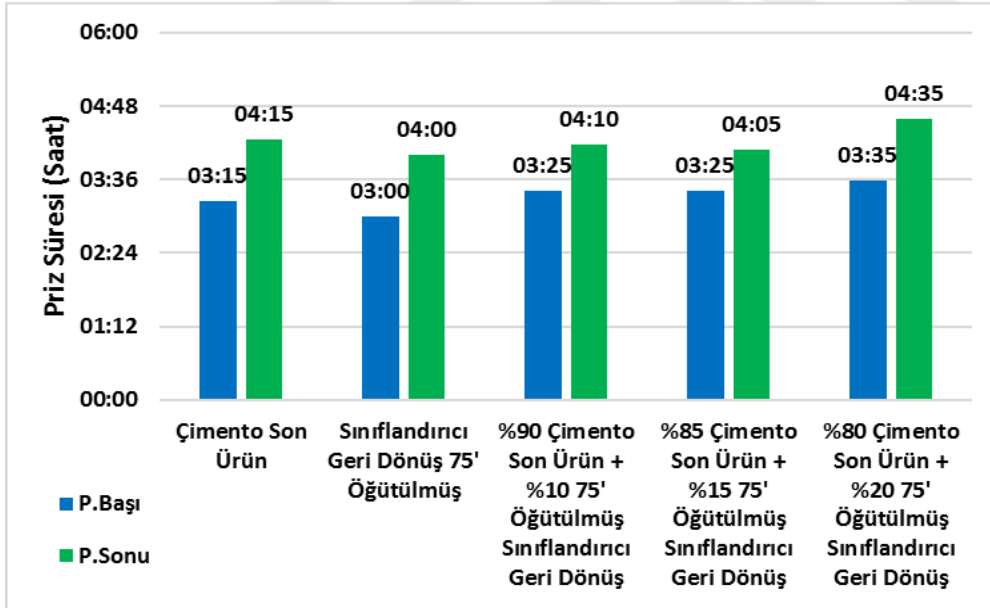


Şekil 54. 4 No'lu Çimento Öğütme Devresi'ne ait hazırlanan karışımların tane boyu dağılımları (sınıflandırıcı geri dönüş ve çimento son ürün)



Şekil 55. Çimento son ürün – 75 dk. öğütülmüş sınıflandırıcı geri dönüş karışımı dayanım sonuçları

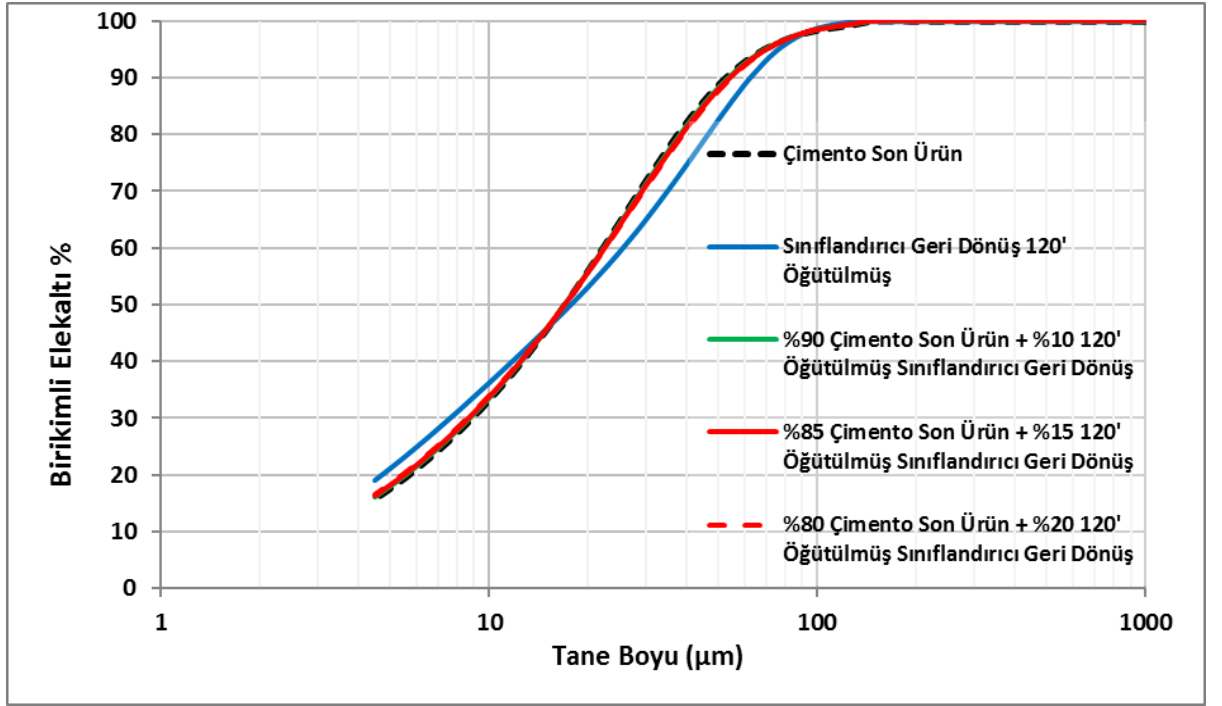
Priz süreleri incelendiğinde (Şekil 56) ise sınıflandırıcı geri dönüşü numunesinin katkısının priz süresinde uzamaya neden olduğu görülmektedir.



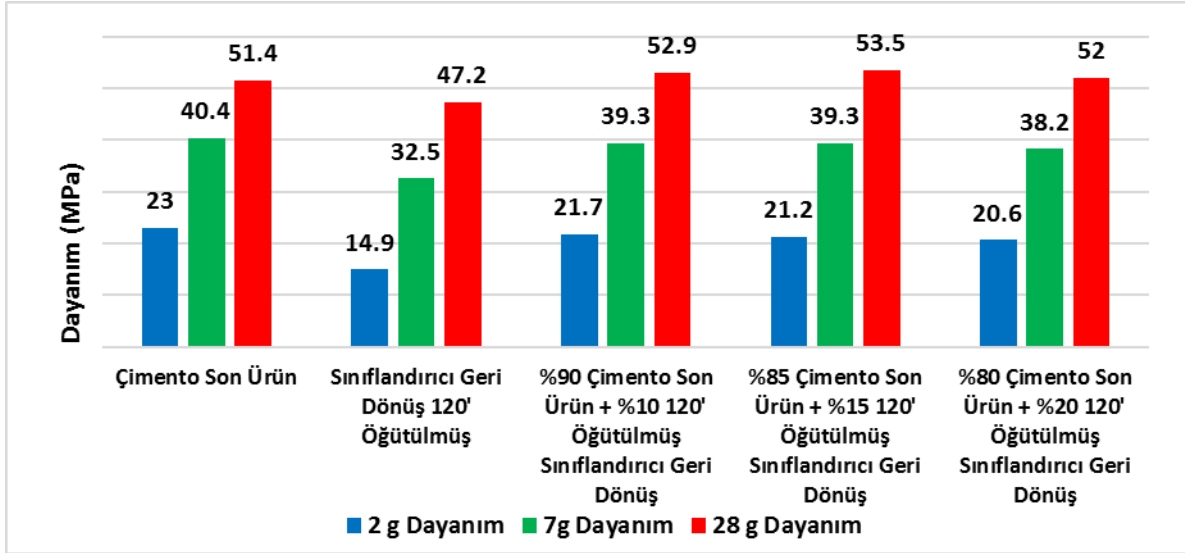
Şekil 56. Çimento son ürün – 75 dk. öğütülmüş sınıflandırıcı geri dönüş karışımı priz süreleri

Bir diğer karışım numune test planı 120 dakika öğütülmüş sınıflandırıcı geri dönüş malzemesi için gerçekleştirilmiştir. Karışım malzemelerinin boyut dağılımları da ölçülmüş olup Şekil 57'de sunulmaktadır. Bu numunelere ait dayanım sonuçları da Şekil 58'da gösterilmektedir. Dayanım verileri

incelendiğinde, öğütülmüş sınıflandırıcı geri dönüş malzemesinin çimento son ürüne katılması ile tesisin hâlihazırdaki üretimine ait dayanım değerlerinden daha iyi bir sonuç elde edilebileceği ortaya çıkmıştır. Öğütülmüş sınıflandırıcı geri dönüş malzeme miktarının karışım içerisinde artırılmasının bir sonucu olarak çimento erken dayanım değerleri tesis ürününe nazaran (çimento son ürün) düşmüştür. Ancak bütün numunelerin erken dayanım değerleri standarda uygun olarak 20 MPa değerinin üzerindedir.

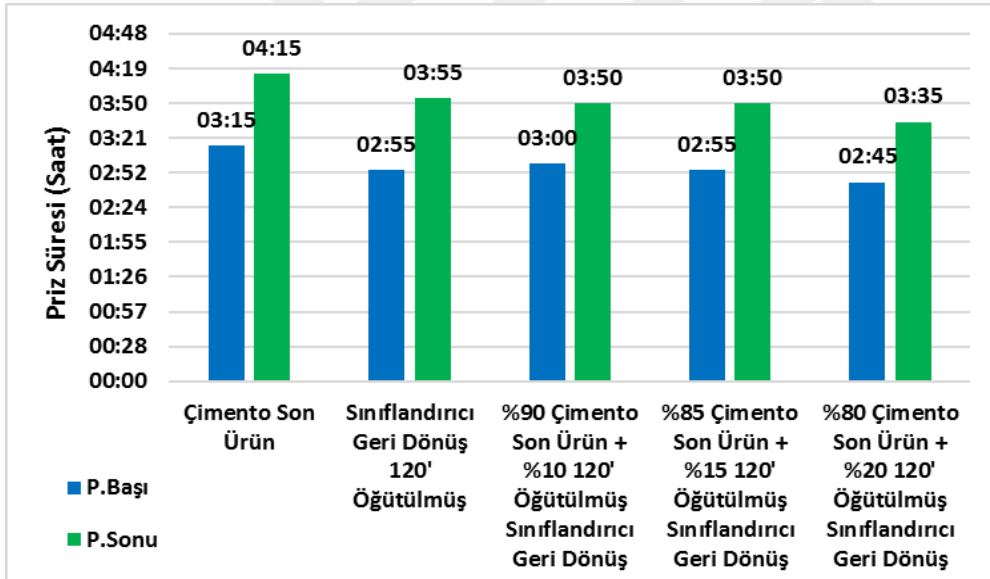


Şekil 57. Çimento son ürün – 120 dk. öğütülmüş sınıflandırıcı geri dönüş karışımı tane boyu dağılımı



Şekil 58. Çimento son ürün – 120 dk. öğütülmüş sınıflandırıcı geri dönüş karışımı dayanım verileri

Priz sürelerinde (Şekil 59) ise katkı oranı arttıkça süreler kısalmış ve çimento son ürün numunesinden daha kısa priz süreleri vermiştir.



Şekil 59. Çimento son ürün – 120 dk. öğütülmüş sınıflandırıcı geri dönüş karışımı priz süreleri

### **4.3. Madde Denkliği, Modelleme ve Simülasyon Çalışmaları**

Çimento öğütme devrelerinde farklı akış kollarından alınan numunelerin laboratuvar ölçekli Bond değirmeninde öğütülmesi ve belirli oranlarda birbirleri ile karıştırılması sonucunda elde edilen ürünün kalite değerlerinin belirlenmesinden sonra, bu ürünün endüstriyel ölçekli bir öğütme devresinde nasıl elde edilebileceği araştırılmıştır. Bunun için öncelikle, devre etrafından alınan numunelerin tane boyu dağılımları kullanılarak madde denkliği yapılmış ve devre etrafındaki her bir kolunun akış değerleri (tonaj, t/sa) hesaplanmıştır. Daha sonra devrede yer alan ekipmanların modelleri oluşturularak simülasyon çalışmalarına geçilmiştir.

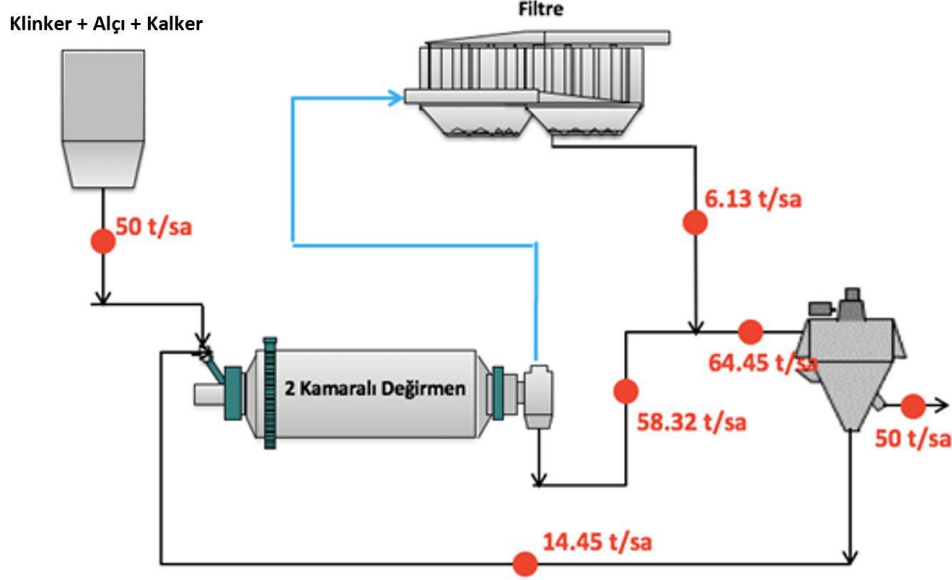
#### **4.3.1. Madde Denkliği Çalışmaları**

Herhangi bir örnekleme çalışması sırasında, sistemin dinamik yapısından, fiziksel koşullardan, ölçüm hatalarından ve insan faktöründen kaynaklanan bazı hatalar ortaya çıkabilmektedir. Madde denkliği, ham verilerin istatistiksel olarak hatalardan arındırılarak devre etrafındaki akışların en iyi şekilde tahmin edilmesini kapsamaktadır.

Tez çalışması kapsamında çimento öğütme devrelerinden alınan devre etrafı numunelerinin tane boyu dağılımları ve kontrol odasında kaydedilen tonaj değerleri kullanılarak madde denkliği kurulmuş ve hesaplamalar yapılmıştır. Madde denkliği sonucunda devre etrafı tane boyu dağılımları istatistiksel olarak hatalardan arındırılarak düzeltilmiş ve bu değerler kullanılarak devredeki tüm kolların akış değerleri (tonajları, t/sa) hesaplanmıştır. Bir örnekleme çalışmasında alınan verilerin güvenilirliği, ölçülen tane boyu dağılım değerlerinin madde denkliği sonucunda hesaplanan (düzeltilmiş) tane boyu dağılım değerleri ile kıyaslanması neticesinde olmaktadır. Bu iki değer birbirine yakın olması, üretilen verilerin sonraki aşama olan madde denkliği ve simülasyon çalışmalarında kullanılabileceğini göstermektedir.

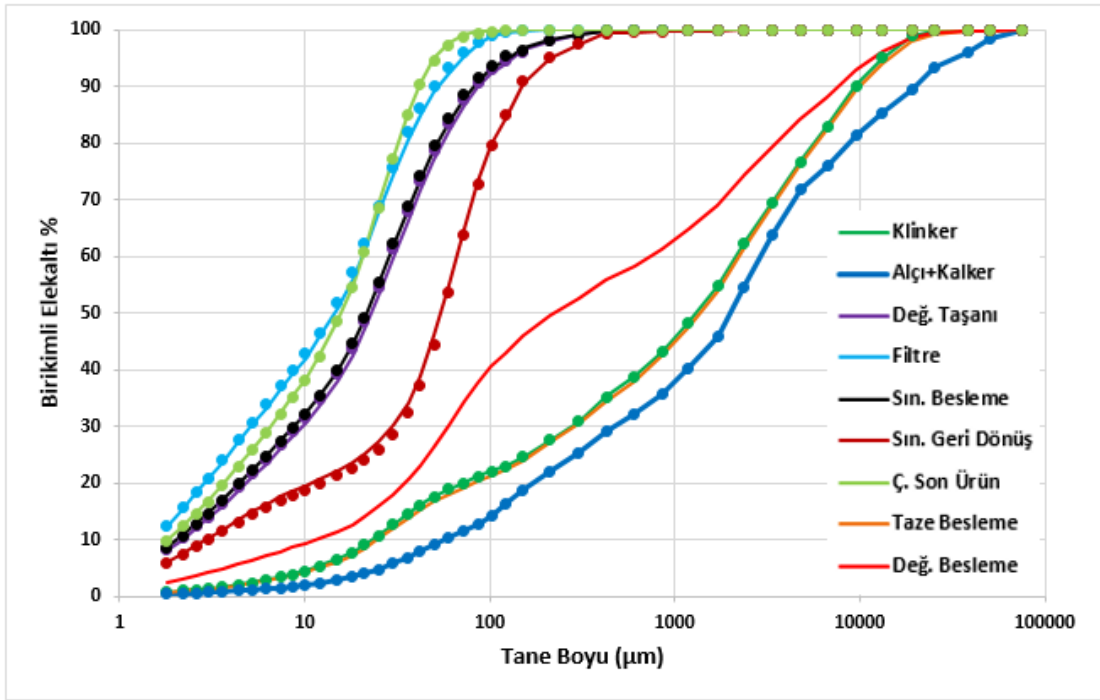
#### 4.3.1.1. 1 No'lu Çimento Öğütme Devresi

Şekil 60'de madde denkliği çalışmaları sonucunda hesaplanan devre etrafı akış değerleri (t/sa), Şekil 61'de ise ölçülen ve hesaplanan tane boyu değerleri gösterilmektedir.



Şekil 60. Madde denkliği sonucunda hesaplanan devre etrafı akış değerleri (t/sa)

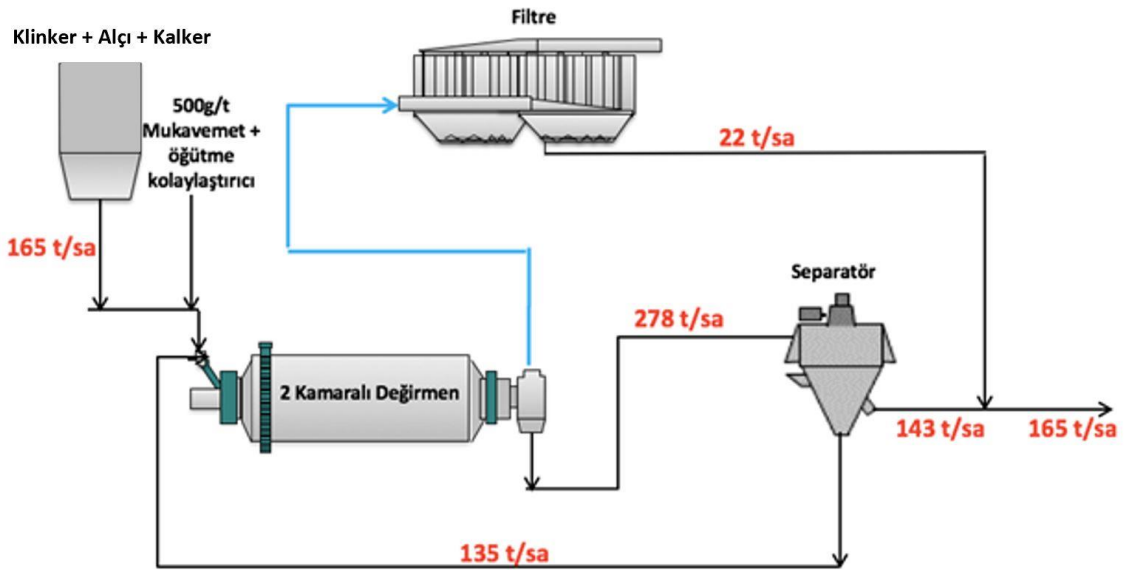
Şekil 61'de yer alan grafikte; hesaplanan boyut dağılım değerleri çizgi ile ifade edilmiş olup, ölçülen değerler işaretleyiciler ile gösterilmiştir. Şekil 61 incelendiğinde ölçülen ve hesaplanan değerlerin birbirlerine yakın oldukları anlaşılmaktadır.



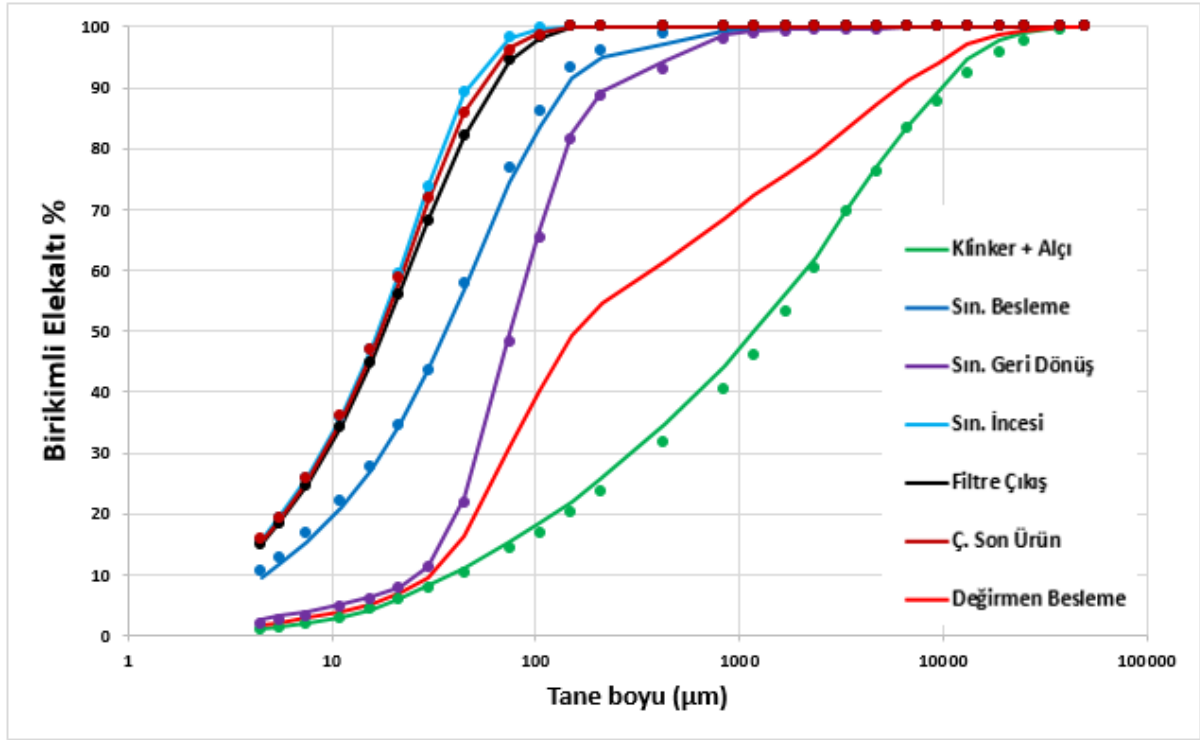
Şekil 61. Madde denkliği sonucunda hesaplanan devre etrafı tane boyu dağılımları

#### 4.3.1.2. 4 No'lu Çimento Öğütme Devresi

Madde denkliği çalışmaları sonucunda hesaplanan devre etrafı akış değerleri (t/sa) Şekil 62'te, hesaplanan tane boyu değerleri ise ölçülen değerlerle birlikte Şekil 63'te gösterilmektedir.



Şekil 62. Madde denkliği sonucunda hesaplanan devre etrafı akış değerleri (t/sa)



Şekil 63. Madde denkliği sonucunda hesaplanan devre etrafı tane boyu dağılımları

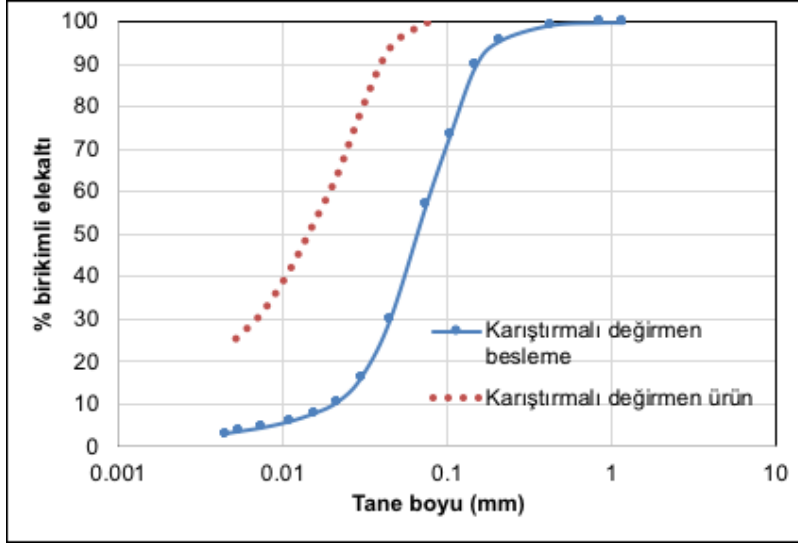
#### 4.3.2. Modelleme ve Simülasyon Çalışmaları

Devre etrafından alınan numunelerin farklı inceliklere öğütülerek çimento kalitesi üzerindeki etkileri incelendikten sonra, istenilen incelik değerlerinin elde edilebileceği akım şemaları bilgisayar ortamında oluşturulmuş ve ardından simülasyonlar yapılmıştır. Simülasyon çalışmalarında Bölüm 3.3'te açıklanan bilyalı değirmen, karıştırmalı değirmen, değirmen filtresi ve havalı sınıflandırıcı modelleri kullanılmıştır. Modelleme ve simülasyon çalışmaları, JKSimMet v6.0.1 paket program kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Karıştırmalı değirmen model yapısının geliştirilmesinde Altun (2013) tarafından gerçekleştirilen deneysel çalışmaların sonuçları kullanılmıştır. Sınıflandırıcı geri dönüş akışı numunesinin öğütüldüğü deneysel koşullar ve bu deneme neticesinde elde edilen boyut dağılımları Tablo 28 ve Şekil 64'te gösterilmektedir.

Tablo 28.Karıştırmalı değirmen testi deneysel koşulları

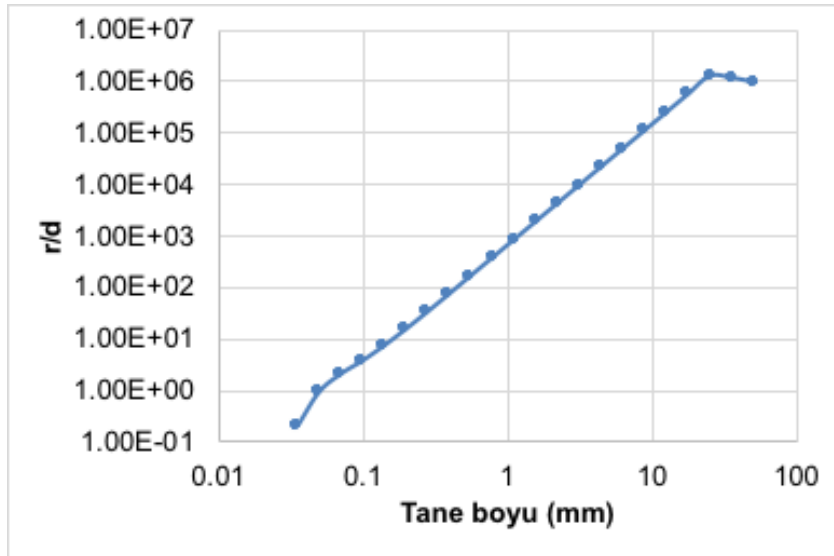
|                                |                      |
|--------------------------------|----------------------|
| Besleme hızı (kg/sa)           | 126                  |
| Karıştırma hızı (m/s)          | 4,3                  |
| Bilya doluluğu (%)             | 70                   |
| Bilya boyu (mm)                | (%60-6mm); (%40-4mm) |
| Özgöl enerji tüketimi (kWsa/t) | 20                   |



Şekil 64. Karıştırmalı değirmen testi besleme ve ürün boyut dağılımları (Altun, 2013)

Besleme ve ürün boyut dağılımları ile birlikte değirmenin çektiği özgöl enerji değerleri simülasyon çalışmalarına veri oluşturmuştur. Önemle belirtmek gerekir ki, tüm devre üzerinde yapılan değerlendirmelerde bu veriler baz alınmıştır.

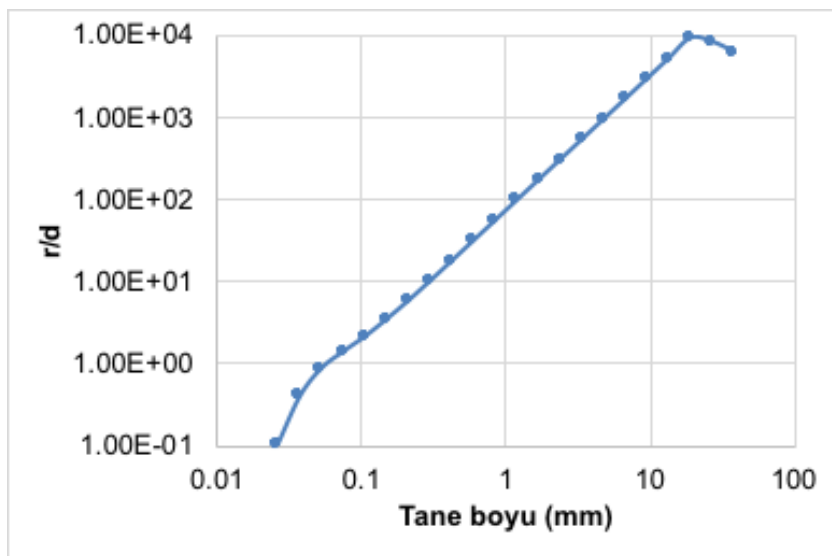
Bilyalı değirmen, karıştırmalı değirmen, değirmen filtresi ve havalı sınıflandırıcıya ait model yapıları sırasıyla Şekil 65, Şekil 66, Şekil 67, Tablo 29 ve Tablo 30'da sunulmaktadır.



Şekil 65. Bursa Çimento 1 No'lu devre bilyalı değirmen model yapısı

Tablo 29. Bursa Çimento 1 No'lu devre Değirmen filtresi ve havalı sınıflandırıcı model yapıları

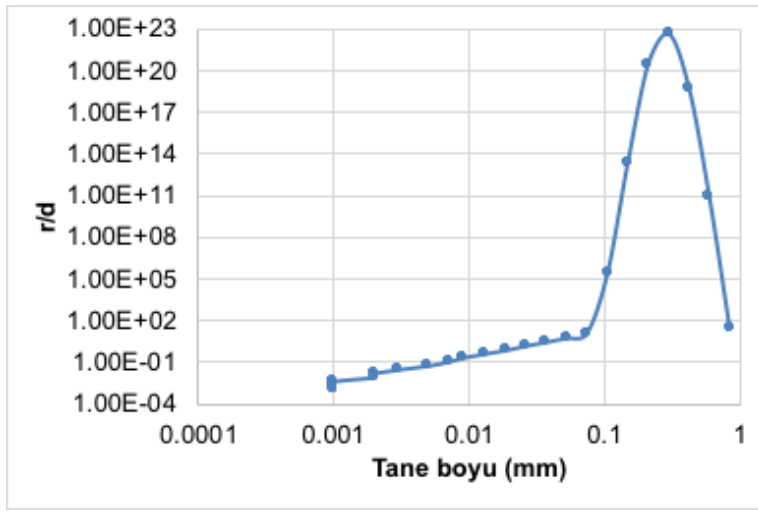
|                | Değirmen Filtresi | Havalı sınıflandırıcı |
|----------------|-------------------|-----------------------|
| $\alpha$       | 0.12              | 2.12                  |
| $\beta$        | 0.52              | 0.72                  |
| C              | 24.57             | 87.72                 |
| $d_{50c}$ (mm) | 0.01              | 0.07                  |



Şekil 66. Bursa Çimento 4 No'lu Devre bilyalı değirmen model yapısı

Tablo 30. Bursa Çimento 1 No'lu Devre Değirmen filtresi ve havalı sınıflandırıcı model yapıları

|                | Değirmen Filtresi | Havalı sınıflandırıcı |
|----------------|-------------------|-----------------------|
| $\alpha$       | 0.023             | 1.496                 |
| $\beta$        | 2.397             | 0.952                 |
| C              | 5.87              | 82.77                 |
| $d_{50c}$ (mm) | 0.09              | 0.05                  |



Şekil 67. Karıştırmalı değirmene ait model yapısı

Bursa Çimento Fabrikası'na ait 1 No'lu ve 4 No'lu çimento öğütme devrelerinde farklı simülasyon senaryoları ile karıştırmalı değirmen operasyonunun etkileri hem üretim artışı hem de enerji sarfiyatı parametreleri üzerinden tartışılmıştır.

Bursa Çimento Fabrikası 1 No'lu Öğütme Devresi için üretilen simülasyon senaryoları aşağıda özetlenmektedir;

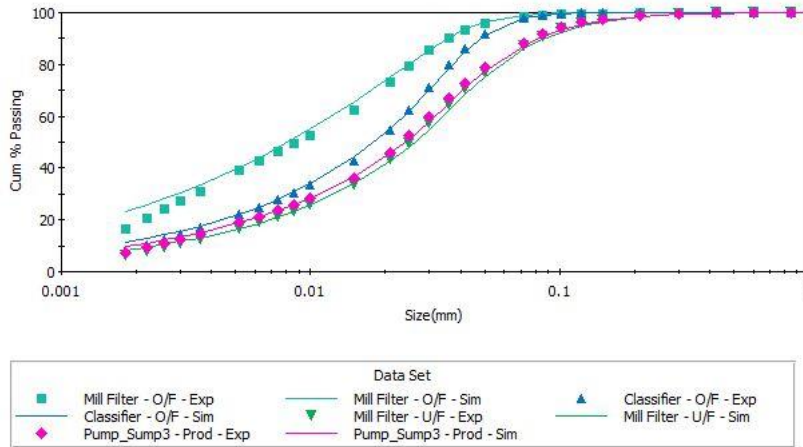
- Havalı sınıflandırıcı besleme malzemesinin belirli bir kısmının karıştırmalı değirmenden geçirilmesi ve son ürüne katılması
- Havalı sınıflandırıcı geri dönüş malzemesinin belirli bir kısmının karıştırmalı değirmenden geçirilmesi ve son ürüne katılması

Bursa Çimento Fabrikası 4 No'lu öğütme devresinde değirmen filtresi ürünü doğrudan ürün silosuna gönderildiğinden, simülasyon senaryosuna dahil edilememiştir. Aşağıda maddeler halinde, simülasyon çalışmalarının kapsamı özetlenmektedir;

- Havalı sınıflandırıcı besleme malzemesinin belirli bir kısmının karıştırmalı değirmenden geçirilmesi ve son ürüne katılması
- Havalı sınıflandırıcı geri dönüş malzemesinin belirli bir kısmının karıştırmalı değirmenden geçirilmesi ve son ürüne katılması

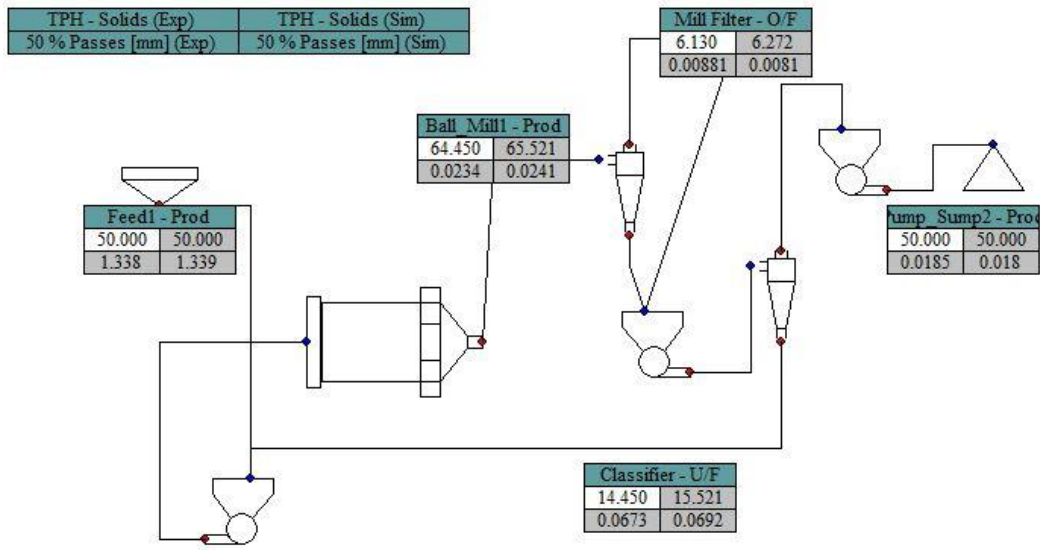
#### 4.3.3. 1 No'lu Çimento Öğütme Devresi'nde Karıştırmalı Değirmen Uygulaması

Karıştırmalı değirmen uygulamasının değerlendirildiği simülasyon çalışmalarının öncesinde, 1 No'lu çimento öğütme devresinin modellenmesi işlemi tamamlanmıştır. Şekil 68'da referans koşulu için model ve simülasyon çalışmalarının başarısını gösteren, ölçülen ve hesaplanan ürün boyut dağılımları gösterilmektedir. Ayrıca, Şekil 69'te akım şeması üzerinde madde denkliği sonucu hesaplanan akış hızı değerleri ile simülasyon sonuçları arasındaki farklılık da gösterilmektedir. Gerek boyut dağılımlarının gerekse de akış hızı değerlerinin birbirine yakın olması referans koşulu için tesis koşulunun bilgisayar ortamına başarılı bir şekilde aktarıldığını göstermektedir.



Şekil 68. 1 No'lu Çimento Değirmeni referans koşulu ölçülen ve hesaplanan boyut dağılımları

Boyut dağılımları incelendiğinde (Şekil 68), hesaplama sonuçlarının çoğunlukla uyumlu olduğu, değirmen filtresi boyut dağılımında 5 mikronun altında bir miktar sapma olduğu anlaşılmaktadır. Sapmanın nedeni olarak, bilyalı değirmen modelinde ince boylardaki kırılma dağılım fonksiyonunun belirlenmesindeki zorluklar gösterilebilir. Değirmen filtre miktarının az olması ve devrede sınıflandırıcıya tekrar beslenmesi hesaplama sonuçlarında farklılık yaratmamasına neden olacaktır.



Şekil 69. Bursa Çimento 1 No'lu değirmen referans koşulu simülasyon ekran görüntüsü

Simülasyon ekran görüntüsü incelendiğinde (Şekil 69) devrede 2 adet sınıflandırıcı sembolü bulunduğu görülmektedir. Ancak devrede sadece 1 adet havalı sınıflandırıcı kullanılmaktadır. Değirmen çıkışına bağlanan sınıflandırıcı şekli, değirmen filtresinin modellenmesi amacıyla yerleştirilmiştir. Bilindiği üzere değirmen filtresi, 2. kamaradan malzeme emişi gerçekleştirmekte olup, hava akışına kapılan taneler filtrede tutulmakta iken, hava hızına yenik düşmeyen iri ve ağır taneler taşınamamakta ve sınıflandırıcıya doğru yönlendirilmektedir. Bir başka deyişle, değirmen çıkışı filtresi sınıflandırıcı gibi davranmaktadır. Bu nedenle de sınıflandırıcı şekli kullanılmıştır.

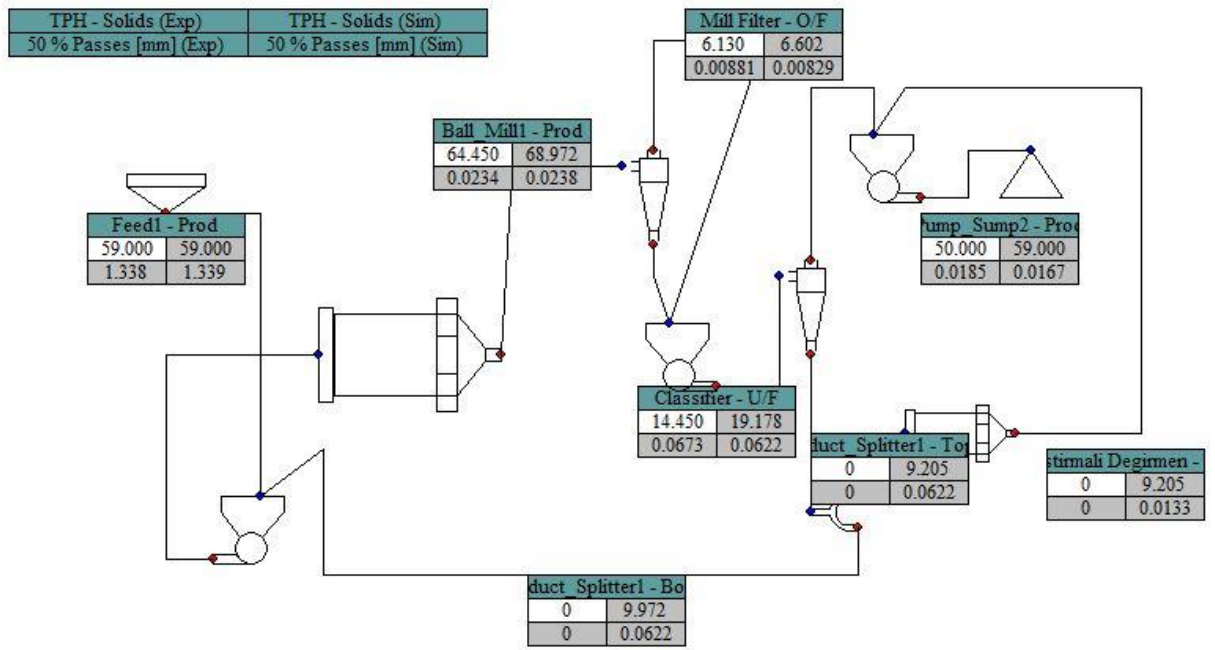
Boyut dağılımları ve akış hızı değerlerine ek olarak tüm devrenin çektiği güç ve enerji miktarlarının da hesaplanması gerekmektedir. Tablo 31’de referans koşulu için devrenin çektiği güç ve özgül enerji tüketimi özetlenmektedir. Sunulan veriler, her bir simülasyon çalışmasının çıktıları ile karşılaştırılmış ve değerlendirmeler bu bazda yapılmıştır.

Tablo 31. 1 No’lu Çimento Öğütme Devresi’ne ait referans koşulu güç tüketimleri ve özgül enerji değeri

|                                 | Referans<br>koşulu |
|---------------------------------|--------------------|
| Değirmen gücü (kW)              | 1384               |
| Değirmen elevatör gücü (kW)     | 9                  |
| Havalı sınıflandırıcı gücü (kW) | 15                 |
| Toplam güç (kW)                 | 1408               |
| Üretim hızı (t/sa)              | 50                 |
| Özgül enerji tüketimi (kWsa/t)  | 28,16              |

#### 4.3.3.1. Sınıflandırıcı Geri Dönüşü Uygulaması

Sınıflandırıcı geri dönüşü akışında karıştırmalı değirmen uygulamasına ait hesaplama sonuçları Şekil 70’de gösterilmektedir. Gösterilen akım şemasından da anlaşılacağı üzere, sınıflandırıcı geri dönüşünün bir kısmı karıştırmalı değirmene verilmiş, kalan bölüm bilyalı değirmene geri yollanmıştır. Bu simülasyon çalışmasında, devre incelik değeri düşünüldüğünde, karıştırmalı değirmen tonajının yaklaşık 9,2 t/sa olduğu hesaplanmıştır. Simülasyon çalışmalarında Şekil 33’te gösterilen kalite değerleri baz alınmıştır. Bu bağlamda, %85 çimento son ürün ve %15 oranın öğütülmüş sınıflandırıcı geri dönüş malzemesinin birleşmesi ve neticesinde son ürüne ait  $d_{50}$  boyunun yaklaşık 16,68 mikron olması amaçlanarak hesaplamalar tamamlanmıştır.



Şekil 70. 1 No'lu Çimento Öğütme Devresi sınıflandırıcı geri dönüşü karıştırmalı değirmen uygulaması.

Tablo 32'de simülasyon sonuçları özetlenmekte olup, toplam değerlendirmelerde kullanılmak üzere ilerleyen bölümlerde detaylı olarak tartışılacaktır. Önemle vurgulanmalıdır ki, karıştırmalı değirmenin çektiği güç hesaplanırken, besleme ve ürün akışlarına ait  $d_{50}$  değerlerinin benzerliğinden ötürü, Tablo 28'de verilen öğütme test sonuçları kullanılmış, buradaki özgül enerji değeri ile değirmenden geçen saatlik tonaj çarpılarak güç hesaplanmıştır. Ayrıca, bilyalı değirmen, sınıflandırıcı ve elevatöre ait güç değerlerinin de değişmediği varsayılmıştır.

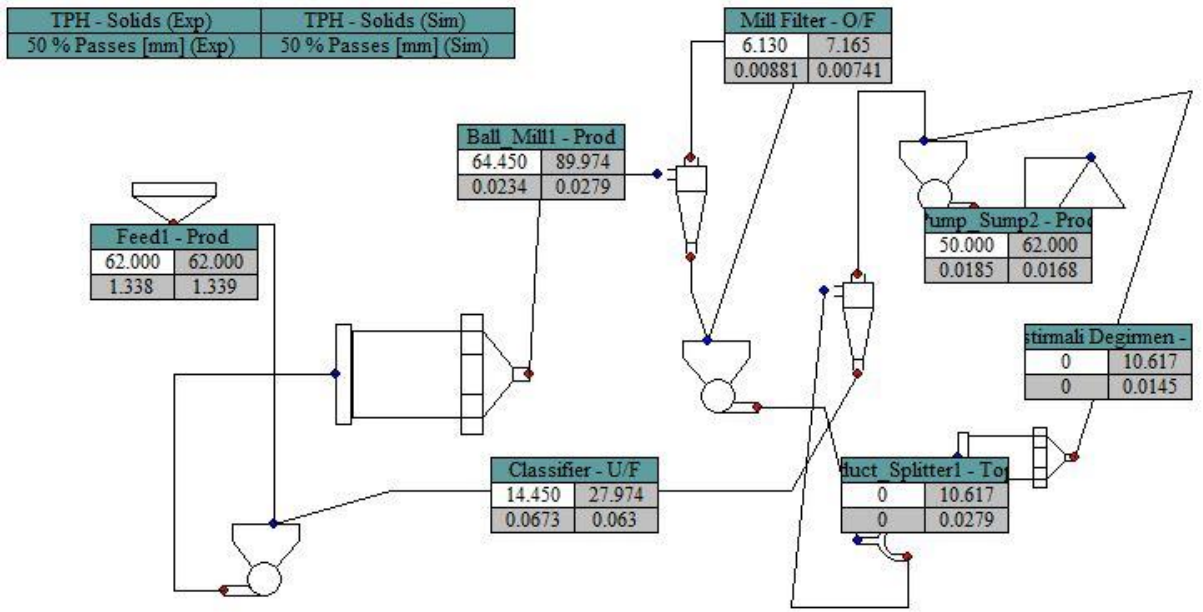
Tablo 32. Bursa Çimento 1 No'lu Çimento Öğütme Devresi'nde sınıflandırıcı geri dönüş uygulamasına ait güç tüketimleri ve özgül enerji değeri

| Sınıflandırıcı geri dönüşü uygulaması |       |
|---------------------------------------|-------|
| Değirmen gücü (kW)                    | 1384  |
| Değirmen elevatör gücü (kW)           | 9     |
| Havalı sınıflandırıcı gücü (kW)       | 15    |
| Karıştırmalı değirmen (kW)            | 193   |
| Toplam güç (kW)                       | 1601  |
| Üretim hızı (t/sa)                    | 59    |
| Devre özgül enerji tüketimi (kWsa/t)  | 27,13 |

Simülasyon çalışmaları neticesinde, karıştırmalı değirmen ürününün %15 oranında karıştırılmasıyla, devreye ait üretim tonajının 59 t/sa değerine çıkabileceği, devreye ait özgül enerji değerinin 27,13 kWsa/t değerine düşürülerek yaklaşık %3,7'lik bir enerji tasarrufu sağlanabileceği anlaşılmaktadır. Ayrıca, kalite değerleri göz önünde bulundurulduğunda ise 28 günlük dayanım değerinin 54,7 MPa'dan 55,5 MPa değerine çıkarılabileceği ön görülmektedir (Şekil 33).

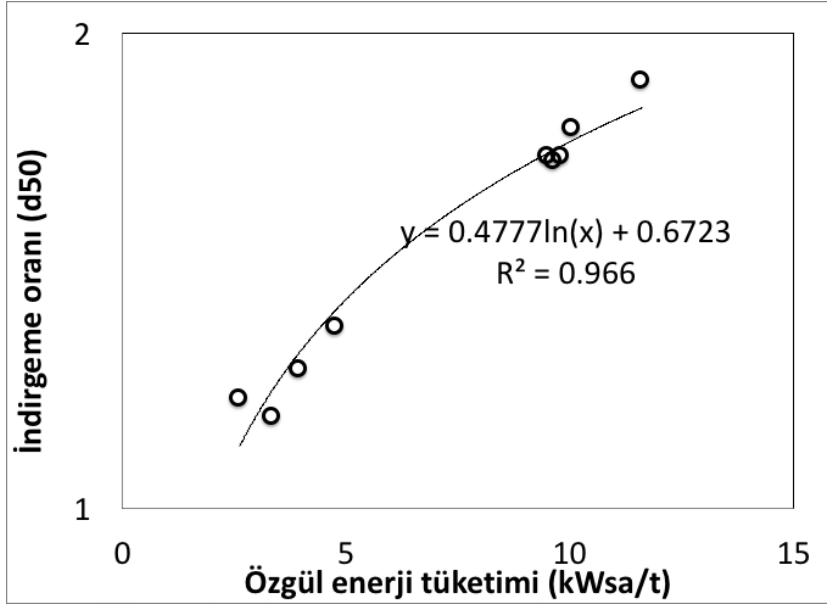
#### 4.3.3.2. Sınıflandırıcı besleme akışı uygulaması

Sınıflandırıcı besleme akışında karıştırmalı değirmen uygulamasının akım şeması ve hesaplama sonuçları Şekil 71'de gösterilmektedir. Simülasyonda, sınıflandırıcı beslemesi akışına bir ayırıcı yerleştirilmiş ve bu ayırıcının bir bölümünün karıştırmalı değirmene doğru yol alması sağlanmıştır. Sınıflandırıcı beslemesi kalite değerlendirmesinde de geri dönüş akışına ait değerler kullanılmış olup, %15 oranında karıştırmalı değirmen ürünü, %85 oranında son ürün ve devre son ürün  $d_{50}$  değerinin 16,7 mikron olduğu koşul için hesaplamalar tamamlanmıştır. Simülasyon çalışmasında karıştırmalı değirmen akış değerinin yaklaşık 10,6 t/sa olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 71 1 No'lu Çimento Öğütme Devresi sınıflandırıcı beslemesi karıştırmalı değirmen uygulaması

Tablo 33'de simülasyon çalışması çıktıları özetlenmektedir. Benzer şekilde, devrede bulunan bilyalı değirmen, sınıflandırıcı ve elevatöre ait güç tüketimleri referans koşulu ile aynı kabul edilmiştir. Toplam devre üretim hızının 62 t/sa değerine çıkabileceği belirlenmiştir. Ayrıca, karıştırmalı değirmene ait özgül enerji tüketiminin 10,59 kWsa/t olduğu test çalışmaları ile tespit edildiğinden (Şekil 72), 10,6 t/sa'lık bir akış hızında toplam güç değerinin 112 kW değerine çıktığı belirlenmiş ve toplam devre güç hesabında bu değer kullanılmıştır. Karıştırmalı değirmene ait güç tüketimi değeri, ölçek büyütme sırasında meydana gelecek iyileştirmeler göz önünde bulundurularak değerlendirilmiştir (Altun, 2013).



Şekil 72. Karıştırmalı değirmene ait boyut indirgeme değerleri

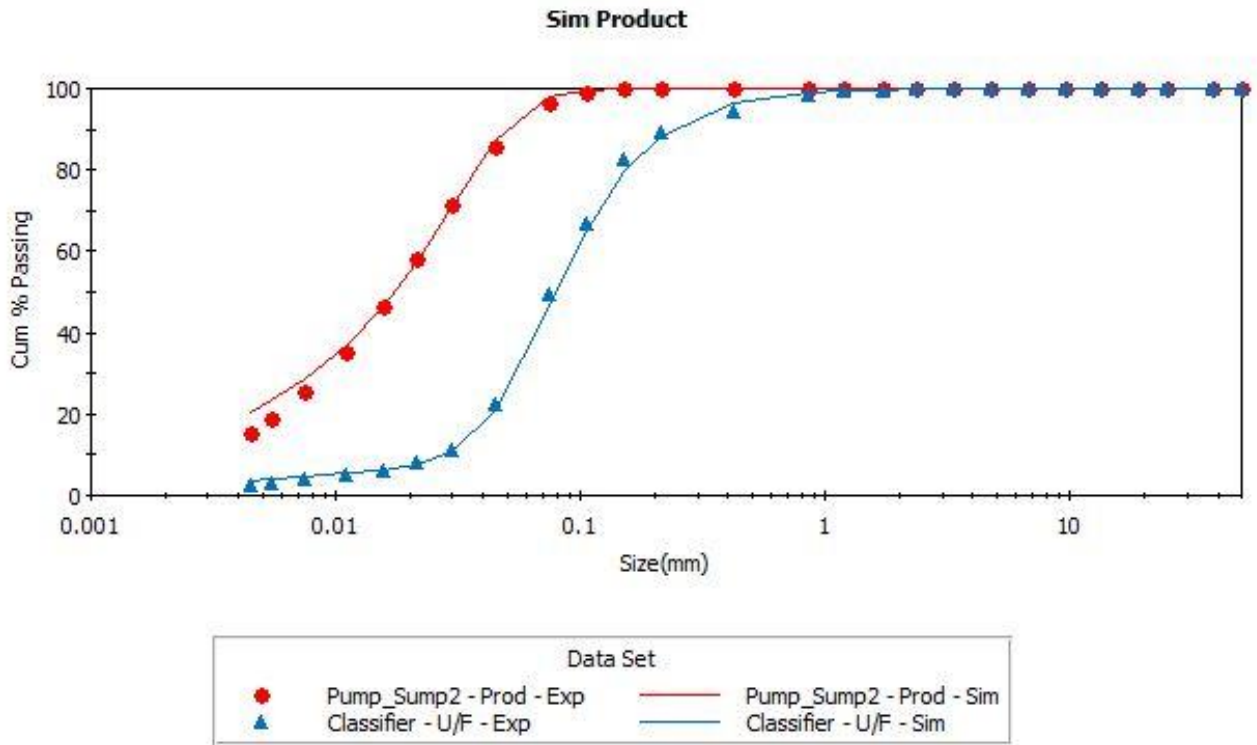
Tablo 33. 1 No'lu Çimento Öğütme Devresi'ne ait sınıflandırıcı besleme koşulu güç tüketimleri ve özgül enerji değeri

| Sınıflandırıcı besleme akışı uygulaması |       |
|-----------------------------------------|-------|
| Değirmen gücü (kW)                      | 1384  |
| Değirmen elevatör gücü (kW)             | 9     |
| Havalı sınıflandırıcı gücü (kW)         | 15    |
| Karıştırmalı değirmen (kW)              | 112   |
| Toplam güç (kW)                         | 1520  |
| Üretim hızı (t/sa)                      | 62    |
| Özgül enerji tüketimi (kWsa/t)          | 24,52 |

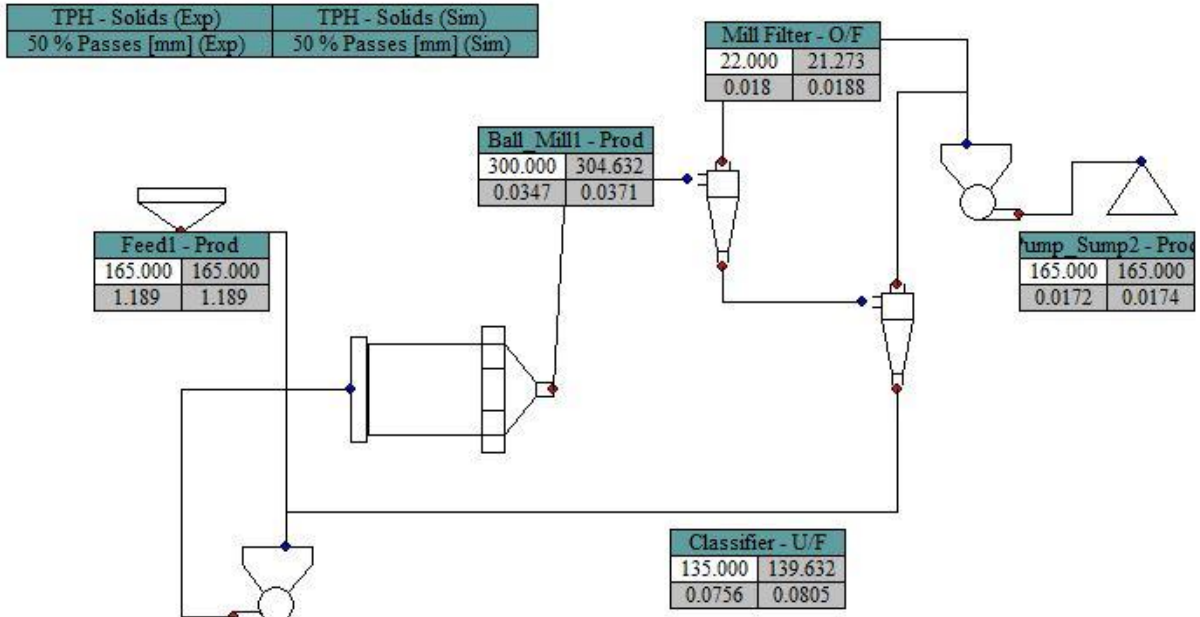
Devreye ait özgül enerji tüketimi değeri incelendiğinde ise referans koşuluna göre (28,16 kWsa/t) düşüş sağlandığı ve 24,52 kWsa/t olduğu tespit edilmiştir. Simülasyon çalışmaları neticesinde sınıflandırıcı geri dönüşünün son ürünlerdeki malzeme miktarına katkısının %17 olduğu hesaplanmıştır. Bu test koşulları için de sınıflandırıcı geri dönüş akışı için yapılan kalite testleri baz alındığından, kalite gelişiminde herhangi bir sorun yaşanmayacağı öngörülmektedir.

#### 4.3.4. 4 No'lu Çimento Öğütme Devresi'nde Karıştırmalı Değirmen Uygulaması

Bursa 1 No'lu Öğütme Devresi'nde yapılan çalışmalara benzer şekilde, 4 No'lu Öğütme Devresi için de referans simülasyon dosyası oluşturulmuştur. Şekil 73'te simülasyon sonucu hesaplanan boyut dağılımı ile ölçülen boyut dağılımı arasındaki farklılık gösterilmektedir. Kırmızı ile gösterilen dağılım devrenin son ürün akışına ait olup, mavi ile gösterilen ise sınıflandırıcı geri dönüş akışına ait ölçülen ve hesaplanan değerlerdir. Boyut dağılımının yanı sıra, akış hızı değerlerindeki farklılığın da değerlendirilmesi gerekmektedir. Şekil 74'te hesaplanan akış hızı değerleri ile ölçülen değerlerin bulunduğu simülasyon ekran görüntüsü sunulmaktadır. 1 No'lu Çimento Öğütme Devresi'ne benzer şekilde, devrede bulunan filtre için sınıflandırıcı sembolü kullanılmıştır.



Şekil 73. 4 No'lu Çimento Öğütme Devresi referans koşuluna ait ölçülen ve hesaplanan boyut dağılımları



Şekil 74. 4 No'lu Çimento Öğütme Devresi'ne ait referans koşulu simülasyon ekran görüntüsü

Şekil 74'te akış hızı değerlerindeki farklılık gösterilmektedir. Gerek boyut dağılımlarının gerekse de akış hızlarının ölçülen ve hesaplanan değerlerinin birbirlerine yakın olması, öğütme devresi koşullarının başarılı bir şekilde bilgisayar ortamına aktarıldığını göstermektedir.

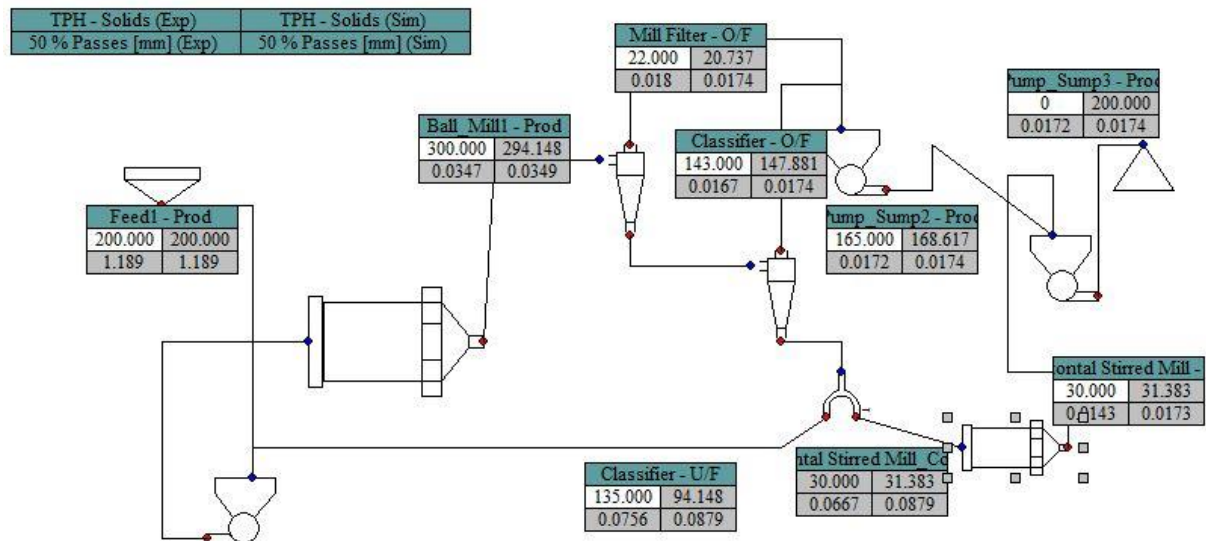
Tablo 34'te devreye ait güç tüketimleri, üretim hızı ve bu iki değişenin bir fonksiyonu olan özgül enerji tüketimi sunulmaktadır. Referans koşulu için verilen bu değerler, ilerleyen bölümlerde simülasyon çıktıları ile kıyaslanacaktır.

Tablo 34. 4 No'lu Çimento Öğütme Devresi'ne ait referans koşulu güç tüketimleri ve özgül enerji değeri

|                                 | Referans koşulu |
|---------------------------------|-----------------|
| Değirmen gücü (kW)              | 4577            |
| Değirmen elevatör gücü (kW)     | 56              |
| Havalı sınıflandırıcı gücü (kW) | 290             |
| Karıştırmalı değirmen (kW)      | 0               |
| Toplam güç (kW)                 | 4923            |
| Üretim hızı (t/sa)              | 165             |
| Özgül enerji tüketimi (kWsa/t)  | 29,84           |

#### 4.3.4.1. Sınıflandırıcı Geri Dönüşü Uygulaması

4 No'lu Çimento Öğütme Devresi için sınıflandırıcı geri dönüşünde karıştırmalı değirmen uygulaması ekran görüntüsü Şekil 75'da gösterilmektedir.



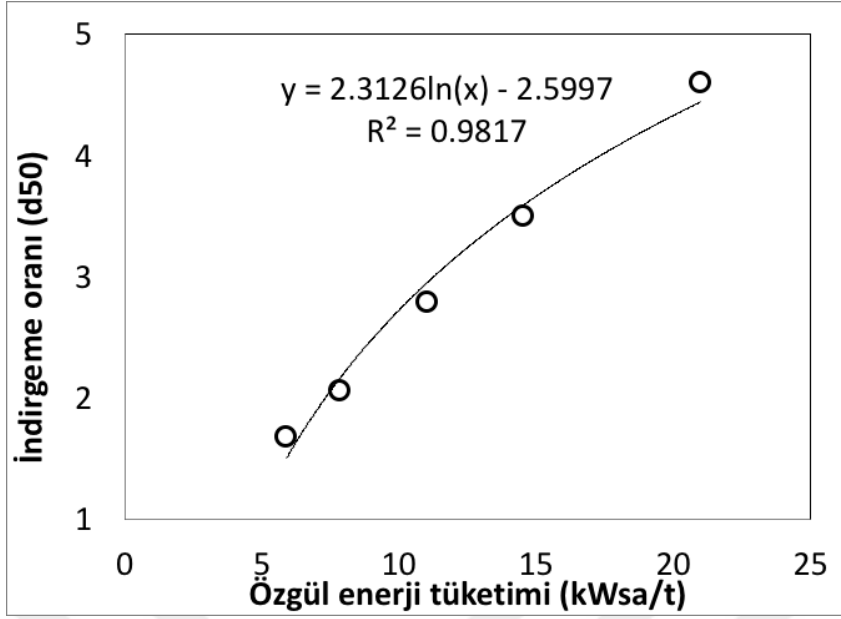
Şekil 75. 4 No'lu Çimento Öğütme Devresi sınıflandırıcı geri dönüşü karıştırmalı değirmen uygulaması.

Sınıflandırıcı geri dönüş akışına bir adet ayırıcı yerleştirilmiş ve kalite değerleri, ürün  $d_{50}$  boyu dikkate alınarak değirmene beslenecek akış değeri bu ayırıcı aracılığı ile ayarlanmıştır. Simülasyon çalışmalarında kalite değerleri baz alınmıştır. Bu bağlamda da tüm ürün içerisinde bulunan öğütülmüş sınıflandırıcı geri dönüş malzemesinin %15, son ürün  $d_{50}$  boyunun da 17,4 mikron civarında olacağı çözüm üretilmiştir.

Şekil 75’da gösterilen simülasyon sonucunda, karıştırmalı değirmene 31 t/sa’lik besleme yapılabileceği hesaplanmıştır. Ayrıca, toplam ürün içerisindeki öğütülmüş sınıflandırıcı geri dönüş miktarının yaklaşık %15 olduğu görülmektedir. Tablo 35’te simülasyon sonuçlarının özeti sunulmaktadır. Önemle belirtmek gerekir ki, simülasyon sonucu hesaplanan özgül enerji değerine karıştırmalı değirmen ilave edilmiş olup, bilyalı değirmen, sınıflandırıcı ve elevatöre ait güç tüketimleri referans koşulu ile aynı kabul edilmiştir.

Tablo 35’de geri dönüş malzemesinin karıştırmalı değirmende öğütüldüğü test koşulları verilmiştir. Buradaki besleme ve ürün malzemesine ait  $d_{50}$  değerlerinin sırasıyla 62 mikron ve 13 mikron olduğu, buna bağlı olarak da indirgeme oranının 4,76 olduğu belirlenmiştir. Şekil 75’da gösterilen uygulamada ise karıştırmalı değirmen besleme ve ürün akışlarına ait  $d_{50}$  değerlerinin sırasıyla 88 mikron ve 17 mikron olduğu ve indirgeme oranının 5,18 olduğu hesaplanmaktadır. Bu indirgeme oranında harcanacak özgül enerji değeri ise Altun (2013) tarafından yürütülen tez çalışmasındaki verilerden bulunabilmektedir (Şekil 76). Şekil 76’de sınıflandırıcı geri dönüş akışı için yapılan bir dizi testten elde edilen boyut indirgemesi ve özgül enerji tüketimi ilişkisi yer almaktadır. Bu verilerde, değirmenin ölçek büyütmesi sırasında güç tüketiminde sağlanabilecek azalma da yer almaktadır. Bu veriler ışığında, 5,18’lik boyut indirgemesi için 27.92 kWsa/t’luk bir enerji tüketimine ihtiyaç duyulduğu hesaplanmıştır. Bu değer baz alınarak, karıştırmalı değirmende 31,4 t/sa’lık bir akışın öğütülebilmesi için, değirmen motor gücünün 876 kW olması gerektiği hesaplanmış ve bu şekilde hesaplamalarda kullanılmıştır.

Enerji ve üretim hızı değerleri incelendiğinde, devre üretim tonajının 200 t/sa değerine ulaşabileceği, özgül enerji tüketiminin de 29 kWsa/t değerine düşürülebileceği hesaplanmıştır. Ayrıca, bu üretime ait kalite verilerinin değerlendirilmesi yapıldığında (Şekil 49) 28 Günlük dayanım değerinin %15’lik öğütülmüş sınıflandırıcı geri dönüşü akışı için 51,7 MPa olduğu, referans koşuluna göre (51,4 MPa) bir miktar iyileştirildiği tespit edilmiştir. Sonuç olarak, karıştırmalı değirmen kullanımı ile hem devre üretim miktarı hem de çimento kalitesinde iyileştirme sağlanacağı öngörülmektedir



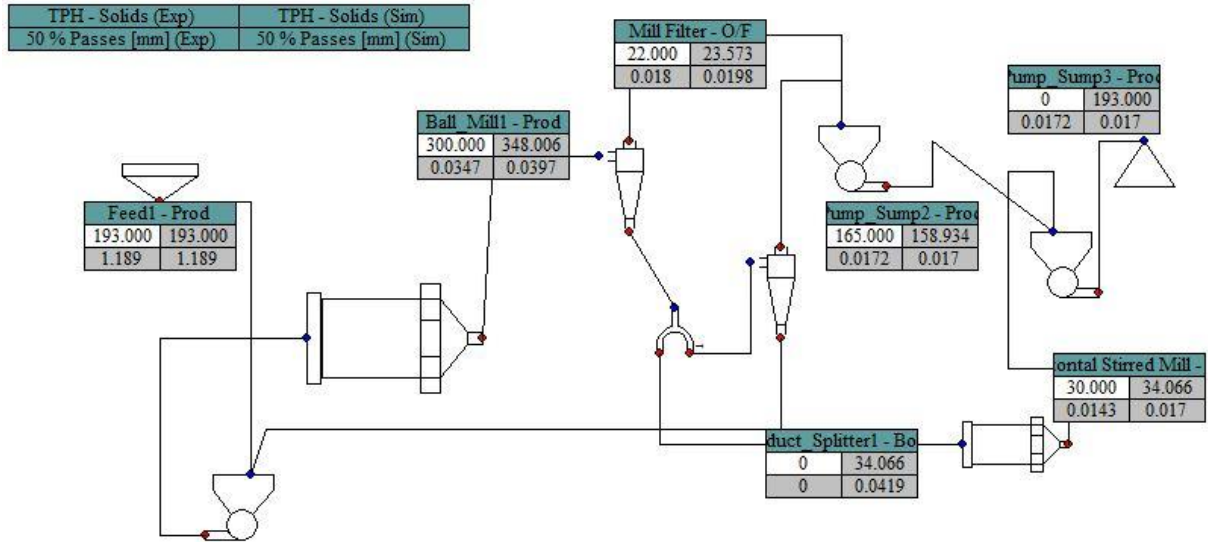
Şekil 76. Sınıflandırıcı geri dönüş malzemesi için karıştırmalı değirmene ait boyut küçültme ile özgül enerji tüketimi arasındaki ilişki

Tablo 35. Bursa Çimento 4 No'lu devreye ait sınıflandırıcı geri dönüş akışı uygulaması güç tüketimleri ve özgül enerji değeri

| Sınıflandırıcı geri dönüş uygulaması |      |
|--------------------------------------|------|
| Değirmen gücü (kW)                   | 4577 |
| Değirmen elevatör gücü (kW)          | 56   |
| Havalı sınıflandırıcı gücü (kW)      | 290  |
| Karıştırmalı değirmen (kW)           | 876  |
| Toplam güç (kW)                      | 5799 |
| Üretim hızı (t/sa)                   | 200  |
| Özgöl enerji tüketimi (kWsa/t)       | 29   |

#### 4.3.4.2. Sınıflandırıcı Besleme Akışı Uygulaması

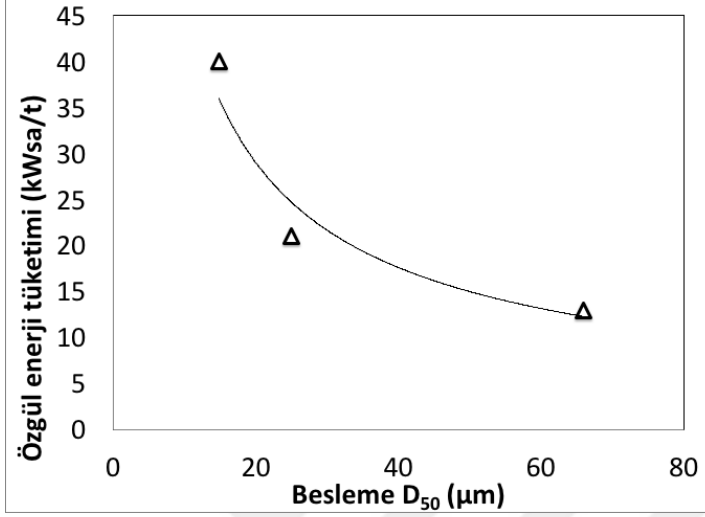
Sınıflandırıcı beslemesinde karıştırmalı değirmen uygulamasına ait hesaplama sonuçları Şekil 77’de gösterilmektedir. Önceki devre şemalarına benzer şekilde, sınıflandırıcı beslemesine ayırıcı yerleştirilmiş ve bu akıştaki toplam miktarın belirli bir kısmının karıştırmalı değirmene yönlendirilmesi sağlanmıştır. Karıştırmalı değirmene hangi miktarda malzemenin besleneceği, istenilen son ürünün  $d_{50}$  boyuna göre hesaplanmıştır. Kalite değerlendirmesinde,  $d_{50}$  boyunun 16,88 mikron olması durumunda 28 günlük dayanım değerinin referans koşuluna göre bir miktar daha iyi olduğu anlaşılmıştır. Bu nedenle de simülasyon çalışmasında bu ürün boyuna odaklanılmıştır.



Şekil 77. 4 No’lu Çimento Öğütme Devresi sınıflandırıcı beslemesinde karıştırmalı değirmen uygulaması.

Yürütülen hesaplamalar neticesinde, devre üretim tonajı değerinin 193 t/sa değerine çıkabildiği ve bu koşulda karıştırmalı değirmene 34 t/sa’lik bir besleme yapılabileceği tespit edilmiştir. Belirtilen tonaj değerleri baz alındığında, öğütülen sınıflandırıcı besleme malzemesinin toplam ürüne oranının %17,6 olduğu bulunmuştur. Bu oran %15 değerine yakın olup, kalite değerlendirmesinde %15’lik test sonuçları dikkate alınmıştır.

Simülasyon çalışmalarının değerlendirilmesinde önemli bir unsur da karıştırmalı değirmende harcanacak gücün tespitidir. Bu amaçla, Altun (2013) tarafından yürütülen tez çalışmasının sonuçları değerlendirilmiştir. Altun (2013), aynı indirgeme oranı için, besleme boyu ile enerji harcaması ilişkisini Şekil 78'deki gibi tanımlamıştır.



Şekil 78. Aynı boyut indirgemesi değeri için, karıştırmalı değirmen besleme boyu ile özgül enerji tüketimi ilişkisi (Altun, 2013)

Şekil 78'da gösterildiği üzere, enerji harcaması aynı indirgeme oranı için, besleme boyu irileştikçe azalma göstermektedir. Şekil 77'de gösterilen simülasyon çalışmasında karıştırmalı değirmen etrafı indirgeme oranı,  $d_{50}$  bazında, 2,46 olarak hesaplanmaktadır. Altun (2013) tarafından yürütülen tez çalışması verilerinde bu değerin daha ince besleme boyu için elde edildiği anlaşılmış olup, simülasyon çalışmasındaki besleme  $d_{50}$  değeri için (42 mikron), ne kadarlık bir enerji harcaması olacağı hesaplanmıştır. Tablo 36'da Altun (2013) tarafından yapılan test çalışmaları özetlenmiş ve Eşitlik 8'de enerji ve besleme boy ilişkisi sunulmuştur.

Tablo 36 Karıştırmalı değirmen testleri, Altun (2013)

|        | Özgül enerji<br>(kWsa/t) | Besleme $d_{50}$ ( $\mu\text{m}$ ) | Ürün $d_{50}$ ( $\mu\text{m}$ ) | İndirgeme<br>oranı |
|--------|--------------------------|------------------------------------|---------------------------------|--------------------|
| Test 1 | 14.83                    | 15.27                              | 9.25                            | 1.65               |
| Test 2 | 23.50                    | 15.87                              | 6.3                             | 2.52               |
| Test 3 | 7.94                     | 46.66                              | 28.1                            | 1.66               |

$$\text{Özgöl enerji}_2 = \frac{\text{Özgöl enerji}_1}{\left(\frac{F_{50,2}}{F_{50,1}}\right)^{0,6}} \quad (8)$$

Bu veriler bazında (Tablo 36), Test 2 çalışması indirgeme oranı simülasyon çalışması ile benzerlik göstermektedir. Eşitlik 8 kullanılarak yapılan hesaplamada, simülasyon sonucu besleme boyu ve indirgeme oranı için 13,7 kWsa/t'luk bir enerji harcamasının olacağı öngörülmektedir. Bu enerji değeri göz önünde bulundurularak, karıştırmalı değirmene 34 t/sa'lık besleme yapılabilmesi için 466 kW'lık bir motor gücüne ihtiyaç duyulmaktadır. Tüm devreye ait güç ve enerji tüketimi hesaplamaları Tablo 37'da sunulmuştur.

Tablo 37. 4 No'lu Çimento Devresi'ne ait sınıflandırıcı besleme akışı uygulaması güç tüketimleri ve özgöl enerji değeri

| Sınıflandırıcı besleme uygulaması |       |
|-----------------------------------|-------|
| Değirmen gücü (kW)                | 4577  |
| Değirmen elevatör gücü (kW)       | 56    |
| Havalı sınıflandırıcı gücü (kW)   | 290   |
| Karıştırmalı değirmen (kW)        | 466   |
| Toplam güç (kW)                   | 5389  |
| Üretim hızı (t/sa)                | 193   |
| Özgöl enerji tüketimi (kWsa/t)    | 27,92 |

Verilerden de anlaşılacağı üzere, özgöl enerji tüketimi referans koşuluna göre azalma göstererek 27,92 kWsa/t olmuştur. Ayrıca kalite verilerinden de bu koşul için son ürün 28 günlük dayanım değerinin 52,8 MPa olabileceği, son ürüne göre de (51,4 MPa) artış sergileyebileceği öngörülmüştür (Şekil 49). Sonuç olarak karıştırmalı değirmen uygulaması ile hem üretim hızında hem de son ürün kalitesinde artış sağlanabileceği düşünülmektedir.

## 5. YORUM

Bu tez çalışması kapsamında ince öğütme teknolojilerinden bir tanesi olan karıştırmalı değirmenin, çimento öğütme akım şemasındaki kullanım olanaklarının, çimento kalite verileri göz önünde bulundurularak incelenmesi amaçlanmıştır. Çalışmalar, endüstriyel tesisten veri toplanması ve paralelinde laboratuvar ortamında yürütülen çimento kalite denemeleri olacak şekilde yürütülmüştür. Bu bağlamda ilk olarak, Bursa Çimento Fabrikası'nın 1 ve 4 No'lu Çimento Öğütme devrelerinde CEM I 42.5R tipi çimento üretimi işlemi esnasında örnekleme çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Toplanan numunelere ait iş indeksi testi, boyut dağılımı analizleri, kimyasal analizler, incelik-dayanım ilişkilerinin tespiti işlemleri yapılmıştır. Karıştırmalı değirmenin geleneksel çimento öğütme devresinde sınıflandırıcı geri dönüş ve sınıflandırıcı besleme akışlarına yerleştirilmesi ve buradan alınan ürünlerin çimento son ürün silosuna gönderilmesi hedeflendiğinden, bu uygulamalara ait kalite denemelerinin gerçekleştirilmesi sağlanmıştır. Bu noktada, laboratuvar ortamında öğütme çalışmaları tamamlanmıştır. Akışların hem kendi kalite gelişimlerinin hem de öğütülen sınıflandırıcı geri dönüş ve sınıflandırıcı besleme numunelerinin farklı oranlarda çimento son ürünü ile karıştırılmalarının kalite gelişimi üzerindeki etkileri incelenmiştir. Daha sonra, kalite denemeleri sonucunda belirlenen hedef incelik değerleri de kullanılarak karıştırmalı değirmenin devre üzerindeki etkilerinin belirlenmesi amacıyla bilgisayar ortamında hesaplamalar gerçekleştirilmiştir. Bilgisayar ortamında yürütülen çalışmalarda, öncelikli olarak, bilyalı değirmen, havalı sınıflandırıcı ve karıştırmalı değirmen ekipmanlarına ait model yapısı geliştirilmiş ve ardından simülasyon çalışmaları ile faydalar tespit edilmiştir.

Laboratuvarda gerçekleştirilen kalite testleri neticesinde %85 oranında çimento son ürüne, %15 oranında sınıflandırıcı besleme veya sınıflandırıcı geri dönüş malzemesinin öğütülerek karıştırılması ile çimento kalitesinden taviz vermeden çimento öğütme devresinin üretim miktarının artırılmasının mümkün olabileceği anlaşılmıştır (Tablo 40 ve Tablo 41). Karışım numunelerine ait 28 günlük dayanım değerleri referans koşulundan daha yüksek değere sahip olduğu

görülmüştür (Tablo 38 ve Tablo 39). Böylelikle, belirtilen akış kollarında öğütücü ekipman kullanılmasının mümkün olabileceği tespit edilmiştir.

Tablo 38. 1 No'lu Çimento Öğütme Devresi'nden alınan numunelerle gerçekleştirilen test sonuçları

|                      | Çimento<br>Son Ürün<br>(referans) | %85 Çimento Son<br>Ürün<br>+<br>%15 75 dk.<br>Öğütülmüş<br>Sınıflandırıcı Geri<br>Dönüş |
|----------------------|-----------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|
| D <sub>50</sub> (µm) | 16,63                             | 16,68                                                                                   |
| D <sub>80</sub> (µm) | 34,49                             | 35,90                                                                                   |
| 2 günlük dayanım     | 26,5                              | 25,4                                                                                    |
| 7 günlük dayanım     | 44,0                              | 43,8                                                                                    |
| 28 günlük dayanım    | 54,7                              | 55,5                                                                                    |

Tablo 39. 4 No'lu Çimento Öğütme Devresi'nden alınan numunelerle gerçekleştirilen test sonuçları

|                      | Çimento<br>Son Ürün<br>(referans) | %85 Çimento<br>Son Ürün<br>+<br>%15 75 dk.<br>Öğütülmüş<br>Sınıflandırıcı<br>Geri Dönüş | %85 Çimento Son<br>Ürün<br>+<br>%15 60 dk.<br>Öğütülmüş<br>Sınıflandırıcı<br>Besleme |
|----------------------|-----------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| D <sub>50</sub> (µm) | 17                                | 17,6                                                                                    | 16,88                                                                                |
| D <sub>80</sub> (µm) | 37,4                              | 39,8                                                                                    | 37,87                                                                                |
| 2 günlük dayanım     | 23                                | 20,1                                                                                    | 22,6                                                                                 |
| 7 günlük dayanım     | 40,4                              | 38,7                                                                                    | 38,5                                                                                 |
| 28 günlük dayanım    | 51,4                              | 51,7                                                                                    | 52,8                                                                                 |

Yukarıda sunulan kalite verilerinde hedef incelik değerleri de tespit edilmiştir. Belirtilen karışım oranlarında hangi inceliğe öğütme işleminin yapılacağı bilgisi simülasyon aşamasında kullanılmıştır. Simülasyon çalışmalarında amaç, çimento öğütme devresinin işleyebileceği en yüksek malzeme miktarının tespit edilmesi ve toplam ekonomik değerlendirme yapabilmek amacıyla veri üretilmesini sağlamaktır.

Önemle belirtmek gerekir ki, simülasyon çalışmaları için geliştirilen kuru karıştırmalı değirmen model yapısında, Altun (2013) tarafından yürütülen pilot ölçekteki test çalışmalarının sonuçları kullanılmıştır. Ayrıca bu çalışmalardan elde edilen enerji değerleri de ölçek büyütme sırasında kazanılabilecek iyileştirmeler göz önünde bulundurularak değerlendirilmiştir.

Simülasyonlarda, kalite verileri doğrultusunda belirlenen hedef incelik değerlerine göre hesaplamalar yapılmış olup, Tablo 40 ve Tablo 41’de sonuçlar özetlenmiştir.

Tablo 40. 1 No’lu Çimento Öğütme Devresi üzerinde gerçekleştirilen simülasyon sonuçları

|                                 | Referans koşulu | Sınıflandırıcı geri dönüşü uygulaması | Sınıflandırıcı besleme uygulaması |
|---------------------------------|-----------------|---------------------------------------|-----------------------------------|
| Değirmen gücü (kW)              | 1384            | 1384                                  | 1384                              |
| Değirmen elevatör gücü (kW)     | 9               | 9                                     | 9                                 |
| Havalı sınıflandırıcı gücü (kW) | 15              | 15                                    | 15                                |
| Karıştırmalı değirmen (kW)      | -               | 193                                   | 112                               |
| Toplam güç (kW)                 | 1408            | 1601                                  | 1520                              |
| Üretim hızı (t/sa)              | 50              | 59                                    | 62                                |
| Özgül enerji tüketimi (kWsa/t)  | 28,16           | 27,14                                 | 24,52                             |
| Üretim hızı artışı (%)          | -               | 18                                    | 24                                |
| Özgül enerji tasarrufu (%)      | -               | 3,63                                  | 12,93                             |

Tablo 41. 4 No’lu Çimento Öğütme Devresi üzerinde gerçekleştirilen simülasyon sonuçları

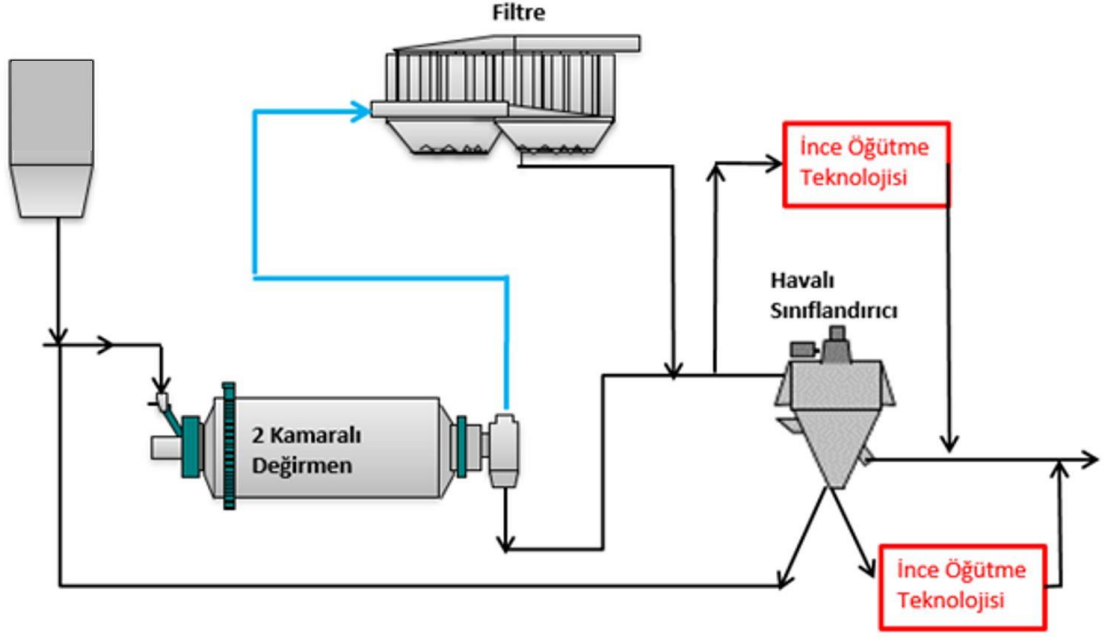
|                                 | Referans koşulu | Sınıflandırıcı geri dönüşü uygulaması | Sınıflandırıcı besleme uygulaması |
|---------------------------------|-----------------|---------------------------------------|-----------------------------------|
| Değirmen gücü (kW)              | 4577            | 4577                                  | 4577                              |
| Değirmen elevatör gücü (kW)     | 56              | 56                                    | 56                                |
| Havalı sınıflandırıcı gücü (kW) | 290             | 290                                   | 290                               |
| Karıştırmalı değirmen (kW)      | -               | 876,7                                 | 465,8                             |
| Toplam güç (kW)                 | 4923            | 5799,7                                | 5388,8                            |
| Üretim hızı (t/sa)              | 165             | 200                                   | 193                               |
| Özgül enerji tüketimi (kWsa/t)  | 29,84           | 29,00                                 | 27,92                             |
| Üretim hızı artışı (%)          | -               | 21,21                                 | 16,97                             |
| Özgül enerji tasarrufu (%)      | -               | 2,81                                  | 6,42                              |

Yapılan simülasyonlar sonucunda, sınıflandırıcı geri dönüş malzemesinin bir kısmının ince öğütme ekipmanında öğütülerek çimento son ürüne eklenmesiyle özgül enerji tüketimi değerlerinin düşürülebileceği anlaşılmıştır. Ancak

sınıflandırıcı beslemesi malzemesinin öğütülmesi ile sağlanan faydanın daha fazla olduğu tespit edilmiştir. Çimento son ürün silosuna gönderilen malzemenin içerisinde öğütülmüş sınıflandırıcı besleme malzemesinin %15 oranında olduğu ve kalan malzemenin sınıflandırıcı incisinin olduğu koşulda, 1 No'lu Öğütme Devresi için %12,93, 4 No'lu Öğütme Devresi için de %6,42 oranında özgül enerji tasarrufu sağlanabileceği öngörülmüştür. Sınıflandırıcı beslemesi için uygulanan yöntemin, aynı karıştırma oranında sınıflandırıcı geri dönüş akışına uygulanması ile özgül enerji tüketimindeki tasarrufun 1 ve 4 No'lu öğütme devreleri için sırasıyla %3,63 ve 2,81 olacağı hesaplanmıştır.

Bu iki farklı akış koluna uygulanan metodun üretim miktarı üzerindeki etkileri incelendiğinde ise her iki devre için sonuçların farklı olduğu anlaşılmaktadır. 1 No'lu Çimento Öğütme Devresi'nde en yüksek üretim hızı artışının sınıflandırıcı beslemesi uygulaması (%24) ile elde edilirken, 4 No'lu Çimento Öğütme Devresi'nde ise üretim hızı artışının en yüksek olduğu uygulama sınıflandırıcı geri dönüşün öğütüldüğü koşuldur (%21,21).

Bu sonuçlar göz önünde bulundurulduğunda, her ne kadar ince öğütme teknolojilerinin kullanılabileceği alternatif akım şemaları oluşturulmuş olsa da (Şekil 79), öğütme devreleri için genel bir çıkarım yapmanın pek mümkün olmadığı, devrede yer alan diğer ekipmanların teknik özelliklerine, devreye beslenen klinker ve ham maddelerin karakteristiklerine ve üretilmesi hedeflenen çimento tipi ve ürün inceliğine bağlı olarak her üretim şemasının ayrı ayrı değerlendirilmesi gerektiği anlaşılmaktadır.



Şekil 79. İnce öğütme teknolojilerinin çimento öğütme devrelerindeki kullanımı

Bu çalışmada, ince öğütme ekipmanlarının çimento öğütme devrelerindeki kullanılabilirliği araştırılırken, temel olarak ürün kalitesini bozmadan, üretim hızının artmasına ve enerjinin daha verimli bir şekilde kullanılmasına imkân veren senaryolar değerlendirilmiştir. Devrede yer alan ekipmanların enerji tüketim maliyeti her ne kadar işletme giderleri içinde en büyük paya sahip olsa da, enerji maliyetleri incelenmesi gereken ekonomik unsurlardan sadece biridir. İnce öğütme teknolojisinin kullanılmasının öğütme devreleri için faydalı olacağı bu çalışma sonucu belirginleşmiş olup mevcut tesislerde uygulanabilirliğinin tam tahlili açısından ekonomik analize ihtiyaç duyulmaktadır.

Ekonomik analizin güvenilir bir şekilde tamamlanabilmesi için değirmene ait yatırım ve işletme maliyetlerinin tespiti gerekmektedir. Yatırım maliyetlerindeki en önemli payın ekipman satın alınması sürecine ait olduğu düşünüldüğünde, üreticiler tarafından pazar araştırmasının yapılması ve fiyatın bu doğrultuda belirlenmesi önem arz etmektedir. Aynı şekilde, işletme maliyetlerinin (enerji, aşınma, çelik sarfiyatı, kimyasal sarfiyatı) de ekonomik analize dâhil edilmesi gerekmektedir. Bu tür verilerin ise endüstriyel uygulamalardan uzun dönemli gözlemler neticesinde toplanması daha güvenilir sonuçlar vermektedir. İnce

öğütme ekipmanlarının, çimento öğütme devrelerinde endüstriyel olarak kullanılması henüz hayata geçmemiş bir çalışma olduğundan, bu iki analiz için yeterli bilgi edinme imkânı olmamıştır. Dolayısıyla, bu çalışma kapsamında ekonomik analize yer verilememiş sadece enerji ve üretim hızı üzerindeki faydalar tartışılmıştır. Bu çalışmanın fikir ve fayda anlamında yapılabilir olduğu bu dönem içerisinde kanıtlanmış olup, ilerleyen dönemlerin ekonomik analizler üzerinde daha belirleyici olacağı düşünülmektedir.

Yürütülmüş olan bu çalışmanın, benzer araştırma konularına sahip çalışmalara da ışık tutması beklenmektedir. Bu bağlamda birtakım öneriler geliştirilmiş ve aşağıda maddeler halinde sunulmuştur.

- İnce öğütme teknolojisinin etkilerinin tespitine yönelik yapılan simülasyon çalışmalarında, karıştırmalı değirmenin açık devre olarak çalıştırıldığı devre şeması üzerinden değerlendirmeler yapılmıştır. Ancak karıştırmalı değirmenler kapalı devre olarak da işletilebilirler. Bu tür bir sonucun üretilebilmesi için sürekli çalışan laboratuvar ölçekteki bir havalı sınıflandırıcıdan veri toplanması ve karıştırmalı değirmene ait değerlendirmenin yapılması gerekmektedir. Belirtilen çalışma süresi zarfında bu tür bir çalışmaya yeterli zaman ayrılamamış olup ilerleyen dönemde kapalı devre bir sınıflandırıcı sistemi ile birlikte işletilen karıştırmalı değirmenin performans verilerinin de simülasyon çalışmalarında kullanılması ve devre tahminlerinin bu doğrultuda yapılması önerilmektedir.
- Çalışma kapsamında yapılan değerlendirmelerde, karıştırmalı değirmen devreye bağlanmış ve tüm devre üzerindeki etkiler değerlendirilmiştir. Buna ilaveten ilerleyen dönemde, karıştırmalı değirmenin kendi üretim hattının olduğu seçenek de değerlendirilmelidir. Bir başka deyişle, ayrı hatta sahip açık/kapalı karıştırmalı değirmen devresinden alınan ürünün kalite ve incelik unsurları göz önünde bulundurularak, mevcut çimento üretim silolarına belli oranda katılmasının etkilerinin de değerlendirilmesi önerilmektedir.
- Çok ince çimento ürünü farklı kullanım alanlarına sahip olmaktadır. Özellikle, prizlenmenin, donma reaksiyonlarının hızlı olmasının

beklendiği koşullar için ince çimento üretimi önem arz etmektedir. Sonraki araştırma konusunda değirmenden bu tip ürünün alınabilmesi için gerekli olan ekonomik koşulların araştırılması ve kalite unsuruna göre değerlendirilmesi önerilmektedir.

- Devre etrafında yürütülen çalışmalar CEM I 42.5R çimento tipinde gerçekleştirilmiştir. İlerleyen dönemde farklı çimento tipleri için de değerlendirmelerin yapılmasının tesisin toplam faydasının belirlenmesi açısından önemli olduğu düşünülmektedir. Yürütülen bu çalışma Bursa Çimento Fabrikası'nda tamamlanmış olup tesisin gereksinimleri doğrultusunda CEM I çimentosunda örnekleme ve etraflı değerlendirmeler yapılmıştır. Ancak, katkıli çimentolarında gerek CO2 emisyonu gerekse enerji harcamalarına olan olumlu etkileri düşünüldüğünde katkıli çimento tipinde de bu çalışmaların yapılabileceği öngörülmektedir. Bursa Çimento tesisi bazında CEM I üretimine yoğunlaşılması katkıli çimentoda faydaların belirlenememesine yol açmış olup farklı tesislerde katkıli çimentoda benzer analizlerin yapılması önerilmektedir.
- Çimento üretiminde farklı tipler olup yapı içerisindeki klinker ve katkı oranlarında bazı değişiklikler olmaktadır. Çimento inceliğinin değiştirilmesi ile katkı oranlarında artış ve buna bağlı olarak da klinker kullanımında tasarruf yapılabilmektedir. Çimento üretiminde klinker üretim süreci maliyetli olup, kullanımındaki azalma ekonomik olarak fayda getirmektedir. Karıştırmalı değirmen uygulamasının bu tür verileri göz önünde bulundurarak değerlendirilmesi önerilmektedir.

## KAYNAKLAR

Aiqin, W., Chengzhi, Z., Ningsheng, Z., The theoretic analysis of the influence of the particle size distribution of cement system on the property of cement, Cement and Concrete Research, 29, 1721-1726, **1999**.

Altun, O., Investigation of dry horizontal stirred milling applications for cement grinding circuits, Ph. D Thesis, Hacettepe University, Ankara, **2013**.

Altun, O., Benzer, H., Selection and mathematical modelling of high efficiency air classifiers, Powder Technology, 264, 1-8, **2014**.

Altun, O., Toprak, A., Benzer, H., Darilmaz, O., Multi component modelling of an air classifier, Minerals Engineering, 93, 50-56, **2016**.

Altun, O., Comparison of different efficiency curve approaches in modelling of air classifiers, MSc. Thesis, Hacettepe University, Ankara, **2007**.

Austin, L. G., Klimpel, R. R., Luckie, P. T., Process Engineering of Size Reduction Ball Milling, New York: Society of Mining Engineers, AIME, **1984**.

Barrios, G.K.P., Carvalho, R.M., Tavares, L.M., Extending breakage characterization to fine sizes by impact on particle beds, Mineral Processing and Extractive Metallurgy, 120, 37-44, **2011**.

Benzer, H., Ergun, L., Oner, M., Lynch, A.J., Simulation of open circuit clinker grinding, Minerals Engineering, 14-7, 701-710, **2001**.

Benzer, H., Jankovic, A., Ergün, L., Cement Practice Practice and Technology, Kawatra, S. K. Advances in Comminution, 169-181, **2006**.

Bwalya, M.M., Moys, M.H., A model for pulverised fuel production in an air-swept tube mill, Minerals Engineering, 43-44, 154-158, **2013**.

Bye, G.C., Portland Cement composition, production and properties, Thomas Telford 2nd Edition, London, 225, **1999**.

Cembureau, Cement Activity, **2017**.

Cleary, P.W., Morrison, R.D., Understanding fine ore breakage in a laboratory scale ball mill using DEM, Minerals Engineering, 24, 352-366, **2011**.

Delaney, G.W., Cleary, P.W., Morrison, R.D., Cummins, S., Loveday, B., Predicting breakage and the evolution of rock size and shape distributions in AG and SAG mills using DEM, Minerals Engineering, 50-51, 132-139, **2013**.

Duda, W.H., Cement-data-book: internationale Verfahrenstechniken der Zementindustrie, **1976**.

Eksi, D., Benzer, A., Sargin, A., Genc, O., A new method for determination of fine particle breakage, Minerals Engineering, 24, 216-220, **2011**.

Epstein, B., The material description of certain breakage mechanisms leading to the logarithmic-normal distribution, Journal of the Franklin Inst., 244, 471-477, **1947**.

Finch, J.A., Modelling a fish-hook in hydrocyclone selectivity curves, Powder Technology, 36, 127-129, **1983**.

Gao, M.W., Forssberg, E., Prediction of product size distributions for a stirred ball mill, Powder Technology, 84, 101-106, **1995**.

Ghiasvand, E., Ramezaniapour, A.A., Ramezaniapour, A.M., Effect of grinding method and particle size distribution on the properties of Portland-pozzolan cement, Construction and Building Materials, 53, 547-554, **2014**.

Hacıfazlıoğlu, H., İnce ve çok ince öğütme için alternatif değirmen tiplerinin tanıtılması, AKÜ Fen Bilimleri Dergisi, 1, 17-30, **2009**.

Hasan, M., Palaniandy, S., Hilden, M., Powell, M., Calculating breakage parameters of a batch vertical stirred mill, Minerals Engineering, 111, 229-237, **2017**.

Hosten, C., Fidan, B., An industrial comparative study of cement clinker grinding systems regarding the specific energy consumption and cement properties, Powder Technology, 221, 183-188, **2012**.

Ito, M., Sutoh, K., Matsuda, T., Classification efficiency of cage-type air classifier, ZKG, 49-3, 134-141, **1996**.

International Energy Agency, "Energy technology perspectives mobilising innovation to accelerate climate action", France, **2015**.

Jiang, S.P., Mutin, J.C., Nonat, A., Studies on mechanism and physicochemical parameters at the origin of the cement setting, I. The fundamental processes involved during the cement setting, Cement and Concrete Research, 25, 779-789, **1995**.

Kellerwessel, H. A. M., High pressure particle bed comminution, Engineering and Mining Journal, 45-52, **1996**.

Kosmatka, S.H., Panarese, W.C., Gissing, K.D., MacLeod, N.F., Design and control of concrete mixtures, Canadian Portland Cement Association, 221, **1995**.

Kuhlmann, K., Ellerbrock, H.G., Sprung, S., Particle size distribution and properties of cement, Part I: Strength of portland cement, ZKG, No. 6, 136-145, **1985**.

Labahn, O., Cement engineers' handbook, Bauverlag, **1971**.

- Lippe, E., Espig, D., Forschungsarbeiten zur Mathematischen, Modellierung von Trockenmahlangen, Freiburger Forschungsheft, 602, 77-78, **1978**.
- Lynch, A.J., Mineral crushing and grinding circuits: their simulation, optimization, design and control, Elsevier, **1977**.
- Madloul, N.A., Saidur, R., Hossain, M.S., Rahim, N.A., A critical review on energy use and savings in the cement industries, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 15, 2042-2060, **2011**.
- Mirtic, A., Reynolds G.K., Determination of breakage rate and breakage mode of roller compacted pharmaceutical materials, Powder Technology, 298, 99-105, **2016**.
- Napier-Munn, T.J., Morrell, S., Morrison, R.D., Kojovic, T., Mineral comminution circuits-Their operation and optimization, JKMRRC monograph series in mining and mineral processing, Brisbane, **1996**.
- Nobis, E., Experience with grinding slag and clinker in a Loesche mill, ZKG 42, 6, 142-144, **2001**.
- Odler, I., Chen, Y., Influence of the method of comminution on the properties of the cement. ZKG, 6, 42, 142-144, **1995**.
- Onuma, E., Ito, M., Separators in grinding circuits, ZKG, 47-9, 535-542, **1994**.
- Pilevneli, C.C., Bilyalı bir karıştırmalı değirmende ince boyutlu klinker öğütmesinin incelenmesi, Doktora tezi, Zonguldak Kara Elmas Üni., Fen Bilimleri Ens., 159, **2003**.
- Plitt, L.R., A mathematical model of the hydrocyclone classifier, CIM Bull, 69-776, 114-123, **1976**.
- Popovics, S., Concrete Materials: Properties, Specifications, and Testing, Second edition, **1992**.

Seebach, H.M.V., State of the art of energy efficient grinding systems, ZKG, Feb. 49(2), 61-67, **1996**.

Shall, H. L., Effect of Chemical Additives on Grinding, Doktora Tezi, Columbia University, New York. **1980**.

Shi, F., Kojovic, T., Larbi-Bram, S., Manlapig, E., Development of a rapid particle breakage characterization device – JKRBT, Minerals Engineering, 22, 602-612, **2009**.

Schönert; Kaluss., Advances in the Physical Fundamentals of Comminution, In Advances in Mineral Processing, Society of Mining, **1986**.

Schnatz, R., Knobloch, O., Influence of the Ball Filling Factor on the Power Consumption and Throughput of Ball Mills in Combined Grinding Plants. ZKG, 8, **2000**.

Shimoide, K., Cement grinding by vertical roller mill, World Cement, Eylül, **1996**.

Škvára, F., Kolár, K., Novotný, J., Zadák, Z., The effect of cement particle size distribution upon properties of pastes and mortars with low water-to-cement ratio, Cement and Concrete Research, Vol.11, 247-255, **1981**.

Sun, P., Wu, H., Chemical and freeze-thaw resistance of fly ash-based inorganic mortars, Fuel, 111, 740-745, **2013**.

Toprak, N.A., Öğütme Yardımcılarının Çimento Öğütme Devresi Performansı Üzerine Etkilerinin Modellenmesi ve Simülasyonu, Doktora Tezi, Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, **2015**.

Tsivilis, S., Tsimas, S., Benetatou, A., Haniotakis, E., Study on the contribution of the fineness on cement strength, ZKG, No. 1, 26-29, **1990**.

TS EN 196-1, Türk Standartları Enstitüsü, Çimento Deney Metotları-Bölüm 1: Dayanım Tayini, **2016**.

TS EN 196-2, Türk Standartları Enstitüsü, Çimento Deney Metotları-Bölüm 2: Çimentonun Kimyasal Analizi, **2013**.

TS EN 196-3, Türk Standartları Enstitüsü, Çimento Deney Metotları-Bölüm 3: Priz Süresi ve Hacim Genleşme Tayini, **2010**.

TS EN 196-6, Türk Standartları Enstitüsü, Çimento Deney Metotları, İncelik Tayini, **2010**.

TS EN 197-1, Türk Standartları Enstitüsü, Çimento- Bölüm 1: Genel Çimentolar - Bileşim, özellikler ve uygunluk kriterleri, **2012**.

TS 7700, Türk Standartları Enstitüsü, Öğütme İş İndeksi Tayini, **1989**.

Villa, E., Spada, F., Crushing and Grinding Training Course, Italcementi Group, **2005**.

Vogel, L., Peukert, W., Breakage behaviour of different materials - construction of a master curve for the breakage probability, Powder Technology, 129, 101-110, **2003**.

Xie, W., He, Y., Luo, C., Zhang, X., Li, H., Wang, H., Shi, F., Energy-size reduction of coals in the Hardgrove machine, International Journal of Coal Preparation and Utilization, 35, 51-62, **2015**.

Zhang, Y.M., Kavetsky, A., Napier-Munn, T.J., Effects of separator efficiency on clinker grinding circuits, ZKG, 41-10, 501-505, **1988**.

Zhao, J., Wang, D., Wang, X., Liao, S., Lin, H., Ultrafine grinding of fly ash with grinding aids: Impact on particle characteristics of ultrafine fly ash and properties of blended cement containing ultrafine fly ash, Construction and Building Materials, 78, 250-259, **2015**.

Zolghadri, M., Noaparast, M., Tonkaboni, S.Z.S., A novel theory for energy considerations in breakage function, Powder Technology, 331, 338-345, **2018**.