



Original Research / Orijinal Araştırma

Kuru karıştırmalı değirmende bilya boyu dağılımının enerji, ürün tane boyu ve bilya aşınması üzerindeki etkilerinin araştırılması

The impacts of grinding ball size distribution on energy consumption, product size and media wear within the dry stirred mill

Tolga Sert^{a,*}, Okay Altun^{a,**}^a Hacettepe Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü, Ankara, TÜRKİYE

Geliş-Received: 09 July-Temmuz 2021 • Kabul-Accepted: 31 August-Ağustos 2021

Ö Z

Kuru karıştırmalı değirmenler üzerine yapılan çalışmalar son yıllarda hız kazanmıştır. Birçok değişken üzerinde araştırmalar yapılmış ancak değirmenlerin temel değişkeni olan bilya dağılımının etkileri detaylı olarak incelenmemiştir. Geleneksel bilyalı değirmenlerde, farklı çapta bilyalar kullanılıp, uygun dağılımın seçimi ile öğütme performansı artırılabilir. Benzer yaklaşımın kuru karıştırmalı değirmenler için de uygulanabileceği böylelikle, öğütme performansı ve ürün kalitesi üzerinde olumlu etkilerinin olabileceği öngörülmektedir. Bu çalışma kapsamında değirmen performansını doğrudan etkileyen bir değişken olan bilya boyu dağılımının, dik kuru karıştırmalı değirmenin öğütme performansı üzerine etkisi, kesikli öğütme testleri ile incelenmiştir. Bu amaçla, literatürde geliştirilen malzeme boyu ve bilya boyu oranı değerleri kullanılarak seçilen bilya boylarının, dik karıştırmalı değirmen için, ikili ve üçlü bileşimleri farklı oranlarda karıştırılmıştır. Kalsit, klinker ve bakır cevheri için farklı karıştırma hızlarında yapılan testler sonucunda elde edilen veriler, enerji, boyut dağılımının şekli ve boyut indirgeme oranları yönlerinden değerlendirilmiştir. Ayrıca, farklı boyutlara sahip bilya dağılımının kullanılmasının, bilya aşınmasına etkileri tartışılmıştır. Çalışmadan elde edilen bulguların, giderek yaygınlaşması beklenen kuru karıştırmalı değirmen teknolojisi üzerinde faydalı olacağı düşünülmektedir.

Anahtar Sözcükler: Öğütme, İnce öğütme, Karıştırmalı değirmen, Bilya dağılımı optimizasyonu

A B S T R A C T

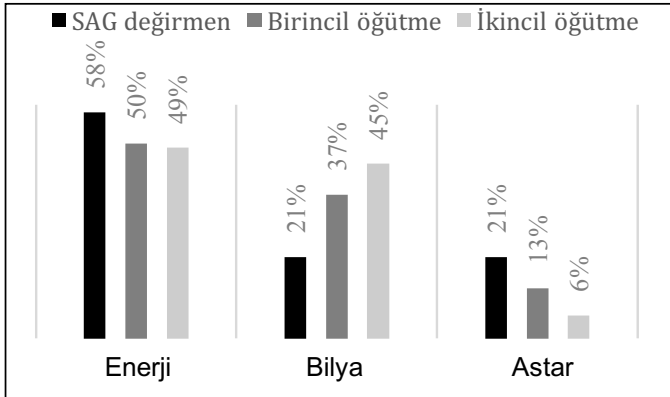
Nowadays, it is desired to use water resources more efficiently due to environmental factors. In this context, the importance of dry stirred mills is increasing day by day. In ball mills, grinding performance can be increased by using media with different sizes and choosing the appropriate grinding media size distribution. It is thought that a similar approach can be applied for dry-stirred mills. Thus, it is predicted that there may be effects on grinding performance and product quality. Although there has been an increasing amount of research on dry stirred mills lately, a missing point is the discussion of the effect of grinding media size distribution. Within the scope of the study, the effect of ball size distribution - a variable that directly affects the mill's performance - on the grinding performance of the vertical dry stirred mill was investigated by batch grinding tests. For this purpose, the bi-modal and tri-modal compositions of the media sizes selected using the material size-ball size ratio values developed in the literature were mixed in different ratios for the vertical stirred mill. The data obtained from the tests performed at different stirrer speeds for calcite, clinker, and copper ores were evaluated in terms of energy, shape of the size distribution, and the obtained size reduction ratios. In addition, the effects of using different sized media distributions on media wear are discussed. It is thought that the findings obtained from the study will be beneficial on the dry stirred mill technology, which is expected to become increasingly widespread.

Keywords: Grinding, Fine grinding, Stirred mill, Ball size optimization

* Sorumlu yazar / Corresponding author: tolgasert@hacettepe.edu.tr • <https://orcid.org/0000-0001-6625-5514>
 ** okyalun@hacettepe.edu.tr • <https://orcid.org/0000-0002-9823-3130>

Giriş

Öğütme işlemi yüksek enerji ihtiyacı duyan bir birim işlemdir. Bu işlemde toplam enerjinin yalnızca %2-20'sinin öğütmede kullanıldığı belirtilmiştir (Batterham, 2011; Jeswiet ve Szekeres, 2016). Kalan kısım ısı, ses ve titreşimler olarak dağılmaktadır. Mühendislik projelerinde değirmenlerin enerji verimliliğini arttıracak çözümler araştırılmaktadır. Bu bağlamda yeni teknoloji ya da halihazırdaki sistemlerin işletim değişkenleri bazında iyileştirilmesi üzerine çalışılmaktadır. Karıştırmalı değirmenler, bu alanda kullanılabilir ve geleneksel öğütme sistemine göre daha verimli olduğu bilinen bir teknolojidir (Jankovic, 2003; Huang vd., 2016). Mineral işlemede yaş işlemler için, özellikle tekrar öğütme aşamasında serbestlik derecesini arttırmak için veya yüzey temizleme amacıyla ince öğütme teknolojisi kullanılmaktadır (Jankovic, 2000; Gao vd., 2002; Taylor vd., 2020; Cleary vd., 2015). Son araştırmalar çimento öğütme devrelerindeki uygulamasına odaklanmıştır ve buna bağlı olarak son yıllarda kuru karıştırmalı değirmenler üzerine artan sayıda araştırma yürütülmüştür (Pilevneli vd., 2004; Altun, 2013; Çayırılı, 2017; Prziwara vd., 2018). Bilya, öğütme verimliliği ve işletme maliyetleri üzerindeki önemli etkisi nedeniyle öğütme operasyonlarının hayati bir parçasıdır. Farklı boyutlara sahip optimum bilya karışımı, belirli bir öğütme bölgesi hacmi için temas sayısında artış sağlayabilmekte ve buna bağlı olarak hem öğütme işlemlerinin ekonomisini hem de ürün kalitesini iyileştirebilmektedir (Cleary vd., 2015). Bilyanın öğütme işlemindeki ekonomisi bazı araştırmalarda tartışılmıştır (Metso Inc, 2002). Şekil 1'de sunulan veri setinde bilya tüketiminin tüm maliyetler içerisinde %21-45 aralığında bir payı olduğu belirtilmektedir. Bilya ekonomisinin tüm maliyetler içerisindeki yerini irdeleyen Roveri ve Chaves (2011) ve Sayadi vd., (2014), de benzer sonuçlara ulaşmıştır.



Şekil 1. Ortalama öğütme maliyetleri (Metso Inc., 2002)

Bilya boyunun değiştirilmesindeki ya da bu konunun araştırılmasının birincil nedeni öğütme inceliğine daha enerji verimli bir koşulda ulaşıp ulaşılamayacağı sorusudur. Beklendiği üzere, daha ince boya üretimin yapılmasının istendiği durumda daha fazla bilya temasına ya da bilya yüzeyine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu nedenle de daha ince boyda bilya kullanımı önerilmektedir (Kwade vd., 1996; Zheng vd., 1996; Fadhel ve Frances, 2001; Jankovic, 2003; Farber vd., 2011; Cho vd., 2013). Bilyalı değirmenlerde yapılan öğütme işleminde, bilya çapı ile öğütme değişkenleri arasındaki ilişkiyi tanımlayan farklı matematiksel ifadeler vardır (Tarjan, Razumov, Olevsky, Papadakis, Bombled, Lianxang, Bond, Nordberg). Bu araştırmalar belirli sınırlar içinde yürütülen uygulama özelinde çalışmalar olduğundan genel bir sonuca varmak zordur. Ancak önemli sonuçlardan bir tanesi çok boyutlu bilya dağılımının olumlu etkilerinin değerlendirilmesidir. Bu sayede maksimum öğütme verimine ulaşmak için bilyalar arasındaki

boşluğu en aza indirmek mümkündür. Karıştırmalı değirmenler incelendiğinde ise tekli bilya kullanımının etkilerinin belirlendiği görülmektedir (Jayasundara vd., 2015; Cleary vd., 2015) karışım bilya kullanımı geleneksel bilyalı değirmenlerde olduğu gibi olumlu etkiler yaratabilecektir.

Bilya boyutundaki farklılıklar, enerji-boyut indirgemesi ilişkisini etkilediği gibi aşınmalar üzerinde de farklılıklar yaratabilmektedir (Çolak vd., 2018). Aşınmaya dirençli bilya kullanımıyla bilya ve enerji tüketiminin %5- 10 aralığında azaltılabildiği tespit edilmiştir (Metso Inc., 2002; Madloul vd., 2011). Bu tür bir etkinin de araştırılması, seçilen bilya boyu dağılımının ekonomi üzerindeki etkilerinin tamamıyla değerlendirilmesi açısından önem arz etmektedir.

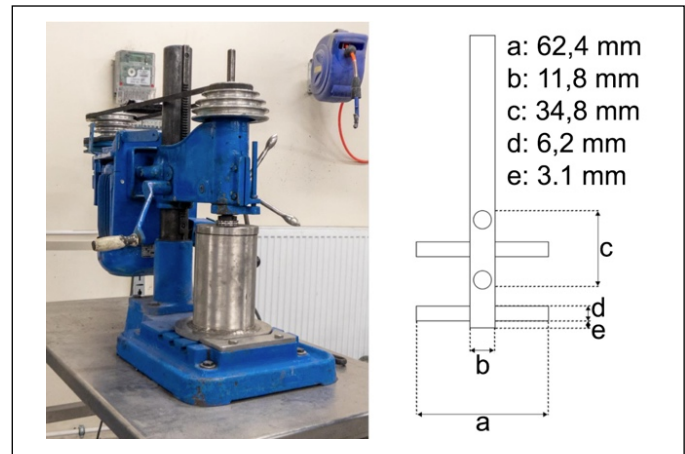
Bu çalışma kapsamında, kuru çalıştırılan dik karıştırmalı bir değirmende çok boyutlu bilya bileşiminin etkilerinin araştırılması amaçlanmıştır. Kuru ortamın tercihindeki en önemli etken, su kullanımı ve su verimliliği kavramlarının çevresel etkiler nedeniyle giderek önem kazanmasıdır (Northey vd., 2019). Çalışmalar süresince bakır cevheri, kalsit ve klinker malzemeleri üzerinde değerlendirmelerde bulunulmuştur. Bu mineral ve malzemelerin seçiminde yaygın kullanım alanlarının etkili olduğunu belirtmek gerekir. Öğütme testlerinde, boyutları 1,5 mm ile 4 mm aralığında değişen bilyalardan farklı oranlarda bileşimler oluşturulmuş ve kesikli testler tamamlanmıştır. Elde edilen veriler, öncelikli olarak enerji-boyut indirgemesi anlamında değerlendirilmiş ve uygun bilya boyunun veya dağılımının seçimi tartışılmıştır. Sonraki aşamada aşınma deneyleri yürütülmüştür. Aşınma denemelerinde, boyut indirgeme sonuçları gözetilerek seçilen bilya dağılımlarının kinetik bazda ağırlık kayıpları ölçülmüştür. Böylelikle hem öğütme etkinliği hem de aşınma değerleri bütün olarak değerlendirilmiştir. Bu çalışmadan elde edilen bulguların bilya boyu seçimine ışık tutacağı ve böylelikle karıştırmalı değirmen teknolojisinin, enerji ve ürün özellikleri yönlerinden daha etkin kullanımının sağlanabileceği düşünülmektedir.

1. Malzeme ve yöntem

Çalışmada dik karıştırmalı değirmen kullanılmış olup kuru öğütme işlemi gerçekleştirilmiştir. Değirmenin teknik özellikleri Çizelge 1 ve Şekil 2'de verilmiştir. Özgül enerjinin de hesaplanması için elektrik analizörü ile güç ölçümleri de yapılmıştır.

Çizelge 1. Değirmen teknik özellikleri

Hazne iç çapı (mm)	118
Hazne iç yüksekliği (mm)	192
Efektif hacim (cm ³)	1750



Şekil 2. Laboratuvar ölçekli kuru karıştırmalı dik değirmen.

Çalışma kapsamında, 8 farklı bilya bileşimi denenmiş olup bu bileşimlerin boşluk oranları da hesaplanmıştır (Çizelge 2). Boşluk oranı hesaplamasında su ve dereceli kaptan faydalanılmıştır. Bu bağlamda, seçilen bir bilya dağılımı 500 ml'lik bir kaba doldurulmuş ve ardından bu hacim değerine kadar su ilavesi yapılmıştır. Eklenen su miktarı bilindiğinden bilya/boşluk yüzde değeri de hesaplanabilmektedir.

Çizelge 2. Bilya boyut konfigürasyonları

Kod	1,5 (mm)	2,5 (mm)	4 (mm)	Ortalama Çap (mm)	Boşluk oranı (%)
C1	100%	0%	0%	1,5	57,53%
C2	0%	100%	0%	2,5	56,07%
C3	0%	0%	100%	4	55,90%
C4	0%	50%	50%	3,25	47,09%
C5	50%	0%	50%	2,75	51,49%
C6	50%	50%	0%	2	53,50%
C7	33%	33%	33%	2,66	51,30%
C8	10%	25%	65%	3,375	54,25%

Kesikli öğütme testlerinde bakır cevheri, kalsit ve klinker malzemeler kullanılmış olup, aynı bilya doluluk oranında (%40) ancak farklı öğütme süreleri (1, 5 ve 10dk) ve karıştırma hızlarında denemeler tamamlanmıştır (3,36, 4,06, 4,48 m/s). Önemle vurgulamak gerekir ki karıştırmalı değirmenlerde bilya doluluk oranı %60-70 değerine kadar çıkabilmektedir (Altun vd., 2013; Prziwara vd., 2018). Mevcut çalışmanın bu değer altında yürütülmesine, yaşanan mekanik sıkıntılar neden olmuştur. Değirmende %50 doluluğun üzerine çıkılması durumunda shaftın artan güç ihtiyacına bağlı olarak dönmediği tespit edilmiştir. Bu duruma, değirmenin geometrisi ve kurulu gücü neden olmaktadır. Shaft üzerindeki pinlerin öğütme hazne duvarı ile olan mesafesinde, belirli miktar üzerinde bilyanın bulunması durumunda bu tür bir sıkıntı yaşanmıştır. Böyle bir olgu literatürde de tartışılmıştır (Zheng vd., 1996; Farber vd., 2011). Değirmene yüklenecek olan bilya miktarı hesabında ölçülen boşluk değerleri kullanılmıştır.

Denemeler sırasında kullanılan malzeme özellikleri Çizelge 3'te verilmektedir.

Çizelge 3. Malzeme özellikleri

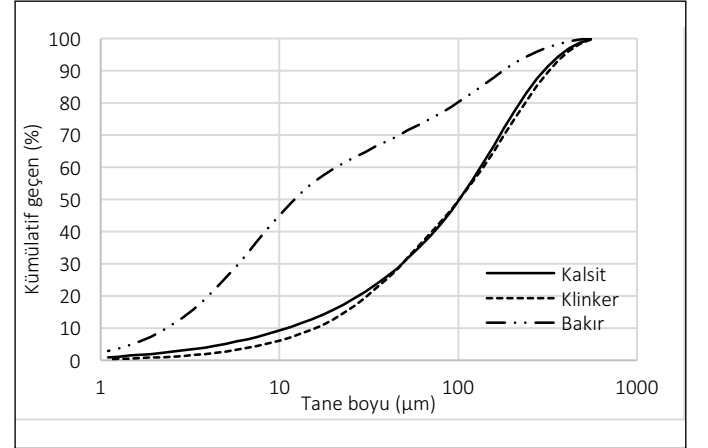
	Kalsit	Klinker	Bakır
Yığın Yoğunluğu (g/cm ³)	1,75	2,05	1,55
d ₅₀ (µm)	101	101	12
d ₈₀ (µm)	222	237	99

Öğütme testleri sonucunda malzemelerin boyut dağılımları ölçülmüştür. Dağılım ölçümünde hem elek analizi hem de lazer tekniği sonucu gelen veriler birleştirilmiştir. Lazer ölçüm sırasında kullanılan Sympatec marka cihazın görüntüsü Şekil 3'te sunulmaktadır. Yapılan ölçümler neticesinde numunelerin en üst boy değerinden 1,8 µm değerine kadar olan dağılımı tespit edilmiştir. Şekil 4'te denemelerde kullanılan malzemelerin boyut dağılımları gösterilmektedir. Özellikle bakır numunesinin diğer malzemelere nazaran ince boyutta olduğu göze çarpmaktadır. Bunun nedeni, ham cevherden ziyade, bir bakış tesisinden alınan flotasyon besleme numunesinin kullanılmasının istenmesidir. Boyut dağılımları

ölçümü sonrasında, diklik ve yatıklık üzerine de yorumlar yapılmıştır. Bu amaçla farklı karıştırıcı hızlarında gerçekleştirilen testlerden elde edilen tane boyut dağılımlarının eğim değerleri Rosin Rammler eşitliğindeki n değeri cinsinden hesaplanmıştır (Rosin ve Rammler, 1933).



Şekil 3. Sympatec Helos Lazer



Şekil 4. Hammadde boyut dağılımları

Çok boyutlu bilya şarjının tesis ölçeğindeki bir öğütme operasyonu üzerindeki etkilerini tartışmak için, sonuçların ekonomik temelde de değerlendirilmesi gereklidir. Bu nedenle, aşınma üzerindeki etkilerin incelemesi için testler yapılmıştır. Karıştırma hızı olarak, 4,48 m/s seçilmiş olup C2 (2,5 mm), C3 (4 mm) ve C4 (2,5 ve 4 mm karışım) bilya bileşiminde %50 doluluk oranında malzeme olmadan değirmen çalıştırılmıştır. Zaman bazlı aşınma değerleri ölçümü yapılmış olup, başlangıç, 10. dk ve 20. dk sonlarında tartım işlemi gerçekleştirilmiştir. Son olarak, yüzde olarak ifade edilen aşınma değerleri birikimli aşınma olarak hesaplanmış ve grafiksel olarak ifade edilmiştir.

Kuru öğütmenin en önemli sorunlarında biri de bilya ve değirmen çeperindeki sıvanmalardır. Bu olguyu engelleyebilmek amacıyla, karıştırmalı değirmenlerde etkin olduğu daha önce tespit edilen TEA kimyasalı kullanılmıştır (Austin vd., 1984; El-Shall ve Somasvaran, 1984; Fuerstenau, 1995; Jeknavorian vd., 1998; Hasegawa vd., 2001; Toprak vd., 2018). Kinetik öğütmede zamana bağlı olarak incelik değişmekte ve bu nedenle de farklı noktalarda sıvanmalar karşımıza çıkabilmektedir. Bu nedenle, öğütmenin farklı zamanlarında kimyasal eklenmesi tercih edilmiş ve bu durumda da sıvanmaların önemli ölçüde azaldığı belirlenmiştir. Çizelge 4'te kimyasal ekleme protokolü sunulmaktadır.

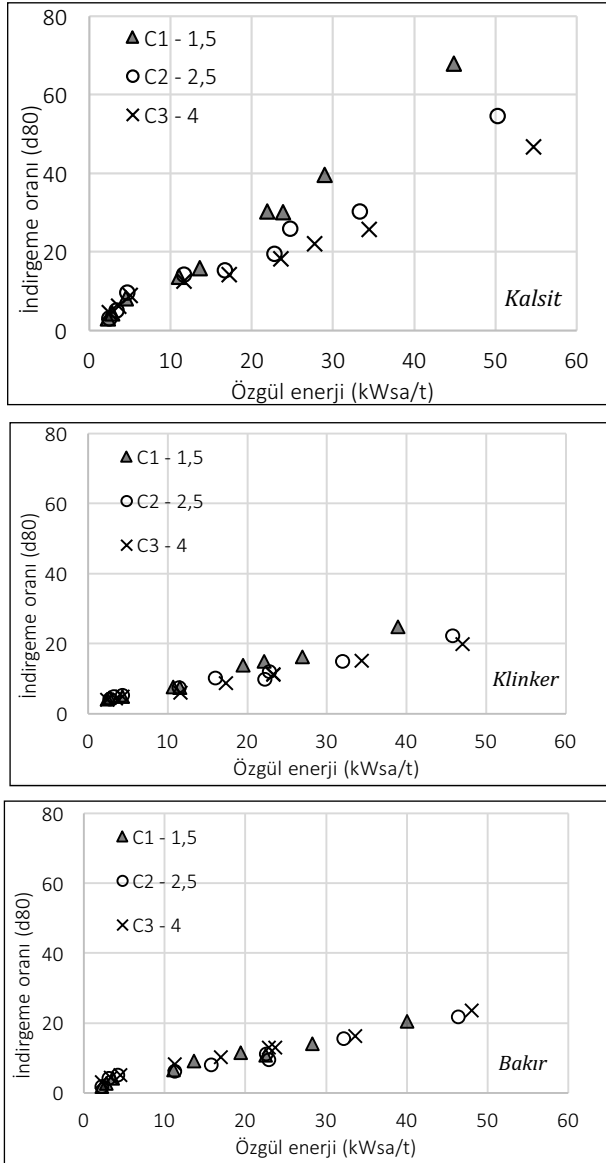
Çizelge 4. Zamana bağlı kimyasal dozaj miktarı

Zaman (dk)	Miktar (g/t)
0" (0 - 1)	1000
1" (1 - 5)	250
5" (5 - 10)	250

2. Bulgular ve tartışma

2.1. Enerji ve boyut indirgeme ilişkisi

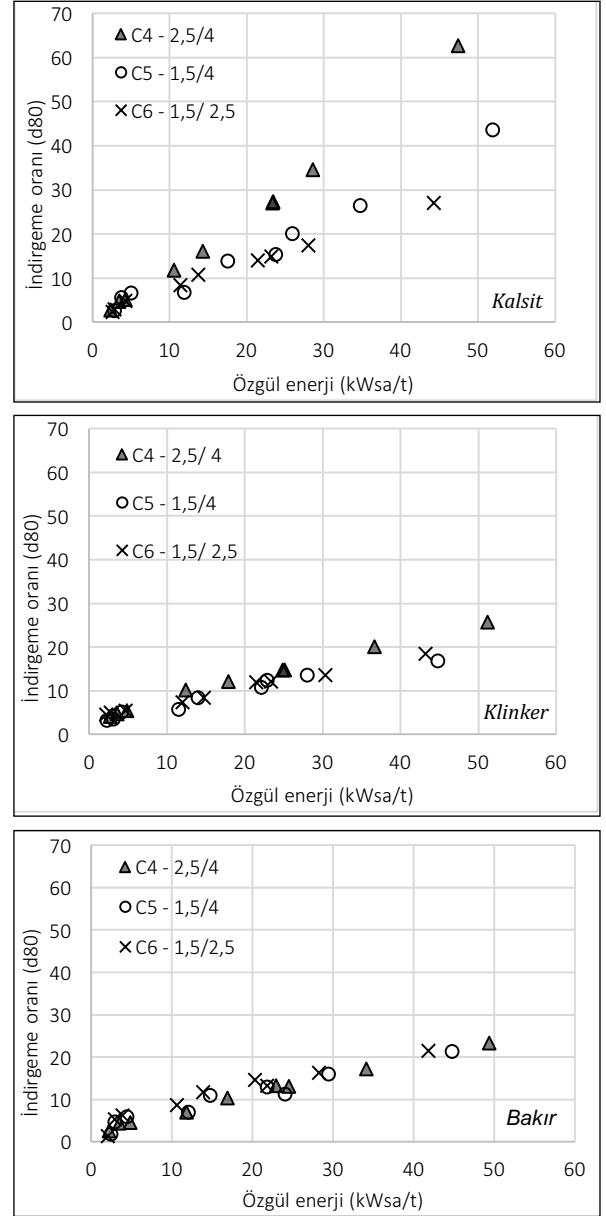
Öğütme sonuçları ilk olarak enerji ve boyut indirgemesi ilişkisi yönünden değerlendirilmiştir. Bu bağlamda, tekli, ikili ve üçlü bilya bileşiminin etkileri tartışılmıştır. Tekli bilya bileşimi bazında yapılan değerlendirme Şekil 5'te gösterilmektedir. Değerlendirmede yer alan indirgeme oranı, besleme ve ürün malzemelerinin %80'inin geçtiği boyların oranıdır.

**Şekil 5.** Tekli bilya denemelerine ait özgül enerji ve boyut indirgeme ilişkisi.

Elde edilen sonuçlar, tekli bilya boylarının performans farklılığının kalsit ve klinker malzemeleri için 10 - 15 kWsa/t değerinden sonra belirgin olduğunu göstermektedir. Bu bölge için, daha ince bilya kullanımı ile daha fazla boyut indirgemesi sağlandığı tes-

pit edilmiştir. Benzer bulgular literatürde de desteklenmektedir (Mankosa, 1986; Jankovic, 2003). Enerji harcamasındaki farklılık boyut indirgemesi bazında değişkenlik göstermekte olup kalsit öğütmede 45 değeri için 1,5mm'lik bilyanın 2,5mm'ye oranla %33, 4mm'ye oranla %66 daha az enerji harcadığı tespit edilmiştir. Klinker için 20 değerinde 1,5mm bilyanın 2,5mm'ye oranla %42, 4mm'ye oranla %76 daha az enerji harcadığı tespit edilmiştir. Bakır öğütme çalışmasında, her ne kadar, düşük enerji seviyesinde bir miktar değişim gözlemlenmiş olsa da genel değerlendirmede fazla bir farklılığın olmadığı söylenebilir. Bu olgu, bakır besleme numunesi besleme boyut dağılımının ince olması ile ilintilidir.

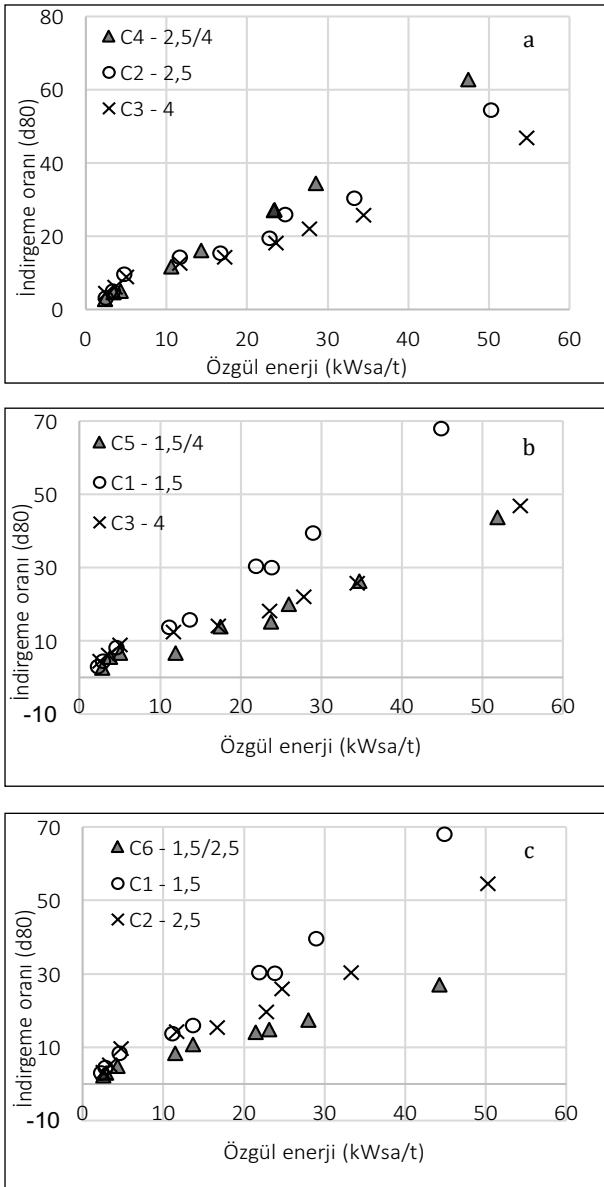
İki bilya bilya karışımının etkileri de Şekil 6'da gösterilmektedir. Sonuçlardan da anlaşılacağı üzere 10 kWsa/t enerji değerinin üzerinde farklılıklar ortaya çıkmaktadır. Özetle, her bir malzeme için farklı sonuçların elde edilebileceği anlaşılmıştır.

**Şekil 6.** İkili bilya bileşimlerine ait özgül enerji ve boyut indirgeme ilişkisi.

Malzemelerin öğütme karakteristiklerinin ve besleme boyut dağılımındaki farklılığın bu değişkenliğe yol açtığı söylenebilir. Kalsit numunesi için, bilya karışımının ortalama boyu arttıkça öğütme performansının iyileştiği, bir başka deyişle, aynı enerji tüketiminde daha fazla boyut indirgemesinin sağlandığı tespit

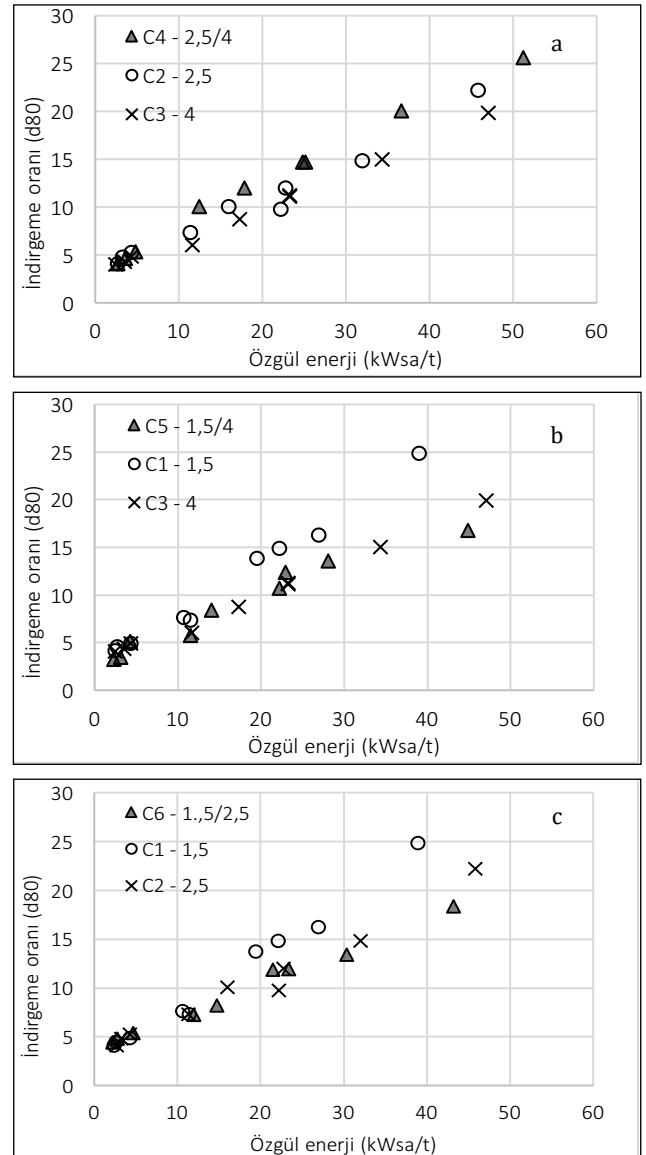
edilmiştir. Bu farklılığın bilyalar arası boşluk ile ilişkilendirilebileceği düşünülmektedir. Cleary vd. (2015) bilyalar arası boşluğun malzeme akış etkisi üzerindeki olumsuz etkisini tartışmıştır. Boşluk miktarının azalması, tanelerin hareketini ve etkin çarpışma ortamını doğrudan etkilemektedir. Klinker numunesi için, en iri kompozisyon olan C4'ün performans anlamında diğerlerinden ayrıldığı saptanmıştır. Ancak, kalsit ile yapılan testlerde aralarında önemli bir indirgeme oranı farkı bulunan diğer bileşimlerde (C5 ve C6), sonuçların benzer olduğu görülmektedir. Bakır numunesi için ise diğer numunelerden farklı olarak düşük enerji seviyelerinde (<20 kWsa/t) farklılık gözlemlenmiş, bu fark yüksek enerji harcamasında (>20 kWsa/t) neredeyse kaybolmuştur. Besleme boyunun inceliğine bağlı olarak düşük enerji seviyesinde en ince bilya boyu bileşimi olan 1,5/2,5mm karışımı en yüksek indirgeme oranına sahiptir. Bu beklenen bir durumdur, çünkü ince boydaki malzemenin etkin bir şekilde öğütülebilmesi için yüksek çarpışma ve temas sayısına ihtiyaç duyulmaktadır (Kwade vd., 1996). Yüksek enerji seviyesinde ise benzer bir eğilim mevcuttur.

Yapılan bir diğer değerlendirmede, bilya bileşimi ile bilya bileşimini oluşturan tek boyutlu bilyaların performansları karşılaştırılmıştır (Şekil 7,8,9).



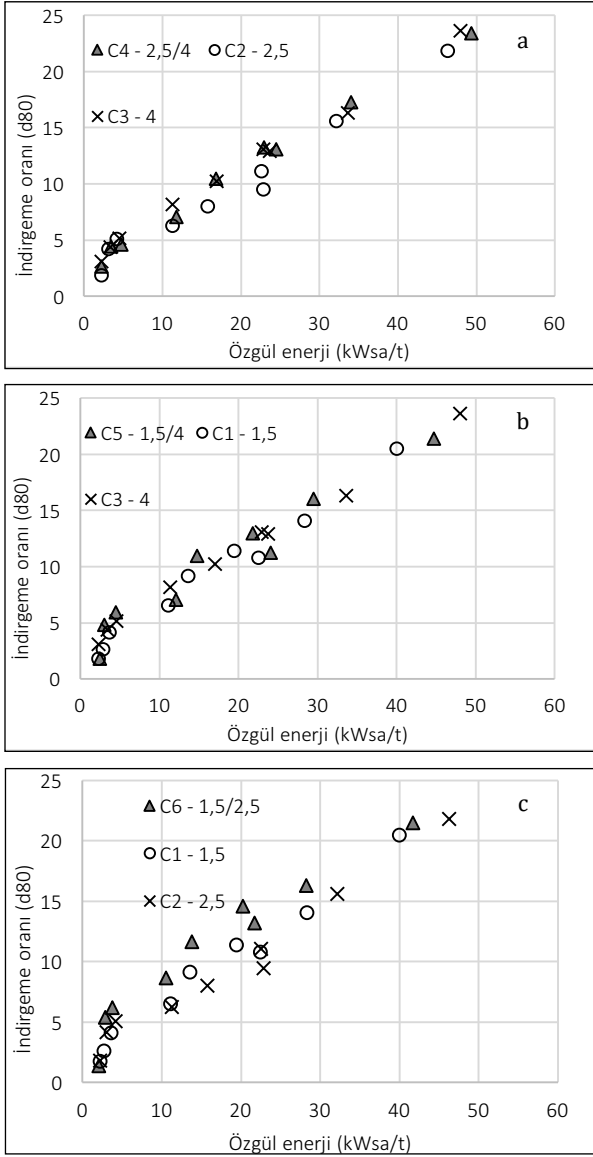
Şekil 7. Kalsit numunesi için bilya bileşim performansının bileşeni oluşturan bilyalar ile kıyaslanması.

Şekil 7-8 incelendiğinde, ikili bilya bileşiminin etkinliğinin seçilen bilya boylarına bağlı olarak değiştiği anlaşılmaktadır. Bilya boşluk oranının en az olduğu 2,5mm / 4mm karışımında (Şekil 7a, Şekil 8a), karışımın öğütme performansının tekli bilyalara oranla daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Öte yandan, Şekil 7b-c ve Şekil 8b-c'de karışım bilya kompozisyonunun performansı tekli bileşime oranla daha düşük kalmaktadır. Özetle, bilya karışımında, 2,5 mm / 4 mm karışımı öğütme performansında artış sağlarken en ince boy olan 1,5 mm'nin kullanımı, kalsit ve klinker ile gerçekleştirilen testlerde tane akışı ve çarpışma yönlerinden olumsuz etki yaratmış ve performans düşüklüğüne neden olmuştur. Bakır öğütmede ise, besleme malzemesinin inceliğine bağlı olarak farklı sonuçlar elde edilmiştir. Nispeten iri bilya bileşimi olan C4 (2,5/4 mm) ve C5 (1,5/4 mm)'te karışım ve tekli bilya seçimi arasında çok belirgin bir farklılığın olmadığı görülmüştür (Şekil 9a-b). Ancak ince bilya bileşimi olan 1,5 / 2,5 mm'de karışımın daha enerji verimli olduğu saptanmıştır (Şekil 9c). Karışımın etkinliği, özellikle, düşük enerji seviyelerinde daha açıktır. Bu noktada 10 boyut indirgemesi değerinde enerji tüketiminde, C1 ve C2'ye göre %40 tasarruf sağlanmıştır. Sonuç olarak, daha ince boyda yapılan beslemede boşluk oranının ayarlanması öğütmedeki enerjinin daha verimli kullanılabilmesine yol açmıştır.



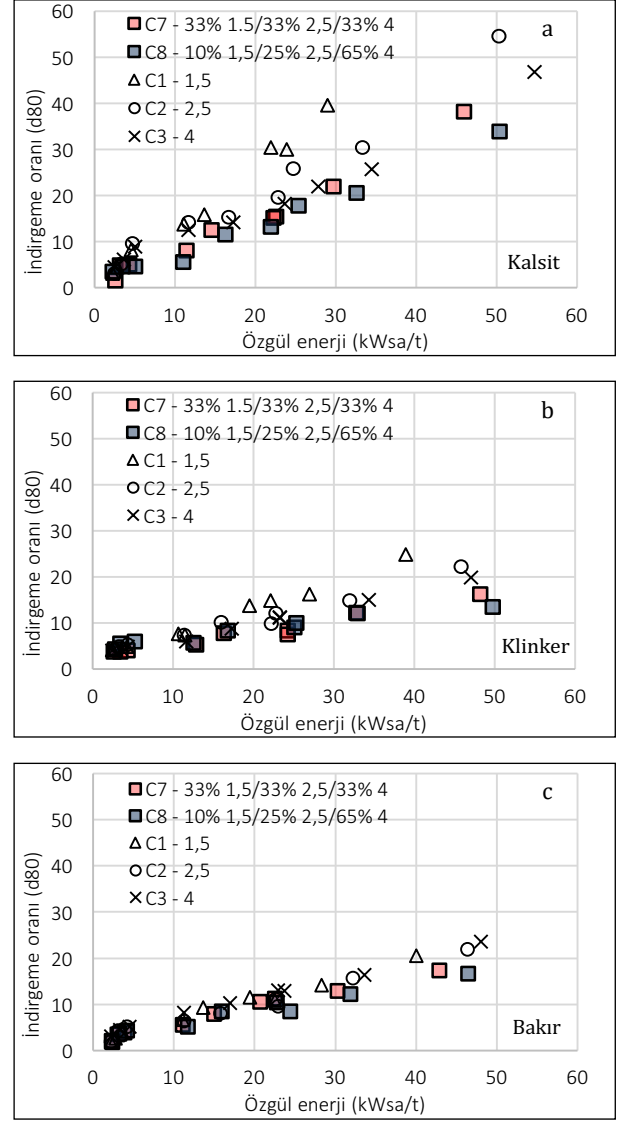
Şekil 8. Klinker numunesi için bilya bileşim performansının bileşeni oluşturan bilyalar ile kıyaslanması.

Tekli ve ikili bileşimlerin denenmesinin ardından, üçlü bilya bileşiminin etkileri de değerlendirilmiştir. Şekil 10'da karşılaştırmanın takip edilebilmesi açısından hem tekli bilyaların hem de üçlü bileşimin performansları sunulmaktadır.



Şekil 9. Bakır numunesi için bilya bileşim performansının bileşeni oluşturan bilyalar ile kıyaslanması

Üçlü bilya bileşiminin denenmesinin amacı, ikili kompozisyona oranla daha etkin bir öğütme ortamının yaratılıp yaratılmayacağını test edilmesidir. Önemle belirtmek gerekir ki, üçlü bilya bileşiminin oluşturulmasında ortalama bilya çapı değeri gözetilmiştir. Üçlü bileşimden C7, C2 ile benzer bir ortalama bilya boyuna sahip iken, C8 kompozisyonu C3 ile benzerlik göstermektedir (Çizelge 2). Bütün numuneler için üçlü bilya bileşenleri karşılaştırıldığında (C7 ve C8), birbirlerine yakın oldukları ancak C7'nin bir miktar yüksek performans gösterdiği anlaşılmaktadır. Farklılık yüksek enerji seviyelerinde daha belirgin olup, kimi noktalarda %20 enerji verimliliği sağladığı görülmüştür. Benzer ortalama boya sahip olan C7 ve C2 karşılaştırıldığında, tekli bileşimin daha yüksek performansta olduğu görülmüş; C7'nin C3 ile benzerlik gösterdiği tespit edilmiştir (Şekil 10). Benzer durum diğer üçlü bilya bileşimi olan C8'in C3 ile olan kıyası için de geçerlidir. Ayrıca, üçlü karışımlar, ikili karışımlar ile karşılaştırıldığında, hiçbir koşulda öğütme performansında bir fayda sağlayamamıştır.



Şekil 10. Tekli ve üçlü bilya bileşiminin performanslarının karşılaştırılması

2.2. Bilya bileşiminin boyut dağılımının şekli üzerine etkisi

Bilya bileşimindeki değişkenlik, enerji sarfiyatını etkilediği kadar boyut dağılımının şeklini de etkileyebilmektedir (Altun vd., 2013). Bu çalışma kapsamında RRSB eşitliğindeki n değeri hesaplanarak kıyaslamalar yapılmıştır. Karşılaştırmalar 10 dakikalık öğütme işlemi sonrası elde edilen nihai ürünlerin dağılımları üzerine odaklanmıştır. Tüm şarj tipleri ile gerçekleştirilen 10 dakikalık öğütme testlerinden elde edilen nihai ürünlerin tane boyut dağılımı diklikleri Çizelge 5, 6 ve 7'de gösterilmektedir.

Çizelge 5. Kalsit nihai ürün boyut dağılımı diklik değerleri (n)

Karıştırıcı hızı (m/s)	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
4,48	1,18	1	0,94	1,6	0,89	0,88	0,90	0,93
4,06	1,08	0,89	0,88	0,88	0,87	0,83	0,87	0,85
3,36	0,9	0,84	0,82	1,03	0,85	0,83	0,87	0,89

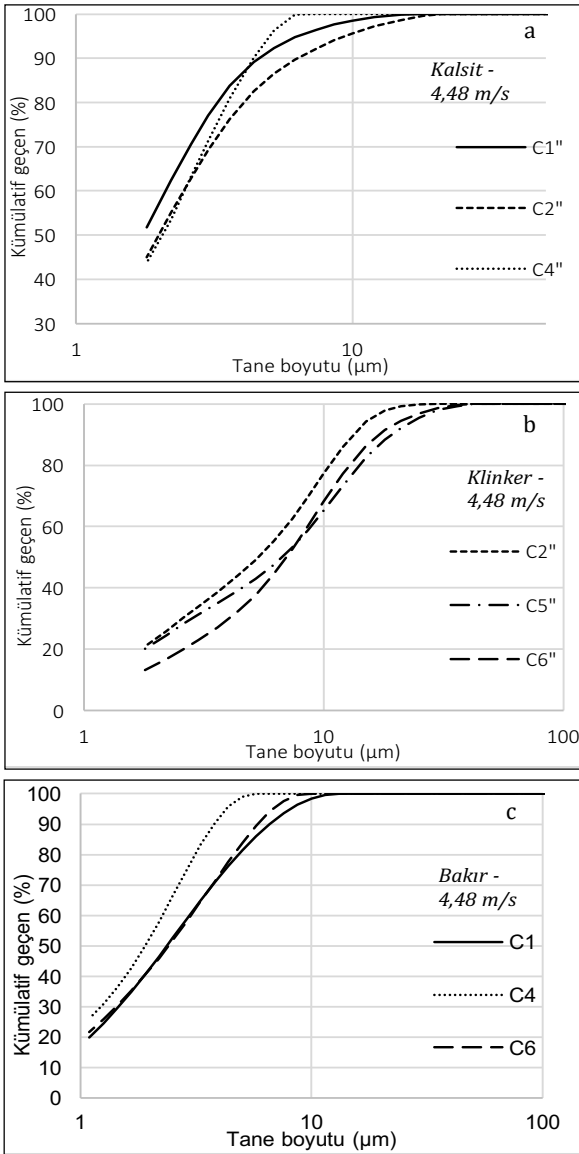
Çizelge 6. Klinker nihai ürün boyut dağılımı diklik değerleri (n)

Karıştırıcı hızı (m/s)	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
4,48	1,11	1,1	0,9	1,11	0,96	0,88	0,95	1,04
4,06	0,95	0,99	0,99	1,13	1,05	0,83	1,07	1,08
3,36	1,1	1,15	1,12	1	1,05	0,83	1,09	1,13

Çizelge 7. Bakır nihai ürün boyut dağılımı diklik değerleri (n)

Karıştırıcı Hızı (m/s)	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
4,48	1,35	1,29	1,4	1,6	1,32	1,35	1,34	1,36
4,06	1,35	1,27	1,37	1,28	1,33	1,33	1,35	1,33
3,36	1,24	1,31	1,39	1,38	1,38	1,44	1,38	1,24

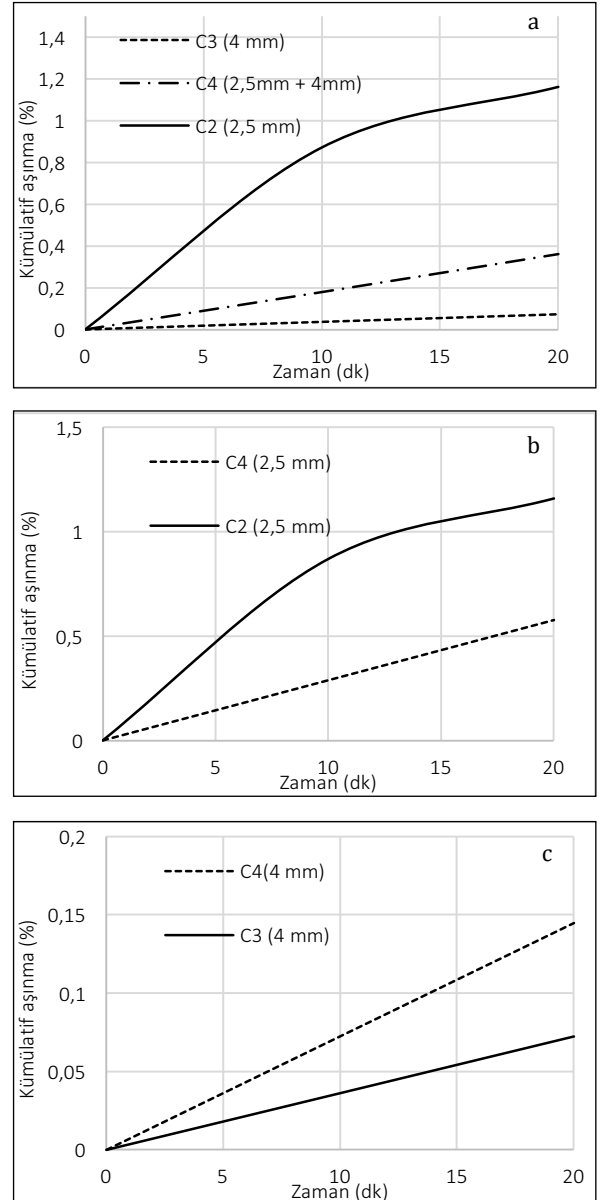
Çalışma kapsamında matematiksel ifade üzerinden değerlendirilen eğim, tane boyut dağılım grafiklerinde de gözlemlenebilmektedir (Şekil 11).

**Şekil 11.** Kalsit(a), klinker(b), bakır(c) nihai ürün tane boyut dağılımı grafikleri

Tekli bileşimler incelendiğinde, kalsit için; ancak 1,5 mm çaplı C1 bileşimi ile diğer tekli bileşimlere kıyasla 0,12 ile 0,26 arasında daha dik bir ürün tane boyut dağılımı sağlanmaktadır. Kalsit ve bakır için farklı karıştırıcı hızlarında görece benzer sonuçlar elde edilmiştir (<0,15). İkili bileşimler, oluşturuldukları tekli bileşimlerle kıyaslanmıştır. Tüm hammaddeler için, farklı karıştırıcı hızlarında, C4, C2 ve C3'e kıyasla 0,14-0,66 daha dik bir boyut dağılımı sağlamaktadır. İkili bileşimler C5 ve C6, üçlü bileşimler C7 ve C8 bileşimleri ile gerçekleştirilen testlerde, tekli bileşimlere kıyasla daha yatık boyut dağılımı sağlanmıştır (<0,15).

2.3. Aşınma test sonuçları

Aşınma verileri, ürün inceliği ve tane boyunun şekli açısından fark yaratan C4 bileşimi (2,5-4mm karışım) ve bu bilya bileşimini oluşturan 4 mm (C3) ve 2,5 mm (C2)'lik bilyaların kıyaslaması şeklinde yapılmıştır. Bilya bileşimi olan C4'ün veri değerlendirilmesinde, bileşimdeki 2,5 mm'lik ve 4 mm'lik bilyaların aşınmaları ayrı ayrı değerlendirilmiş ve tek boyutlu yapılan aşınma testleri ile olan kıyaslaması da yapılmıştır. Şekil 12'de zaman bazlı birikimli aşınma değerleri gösterilmektedir.

**Şekil 12.** C2, C3 ve C4 aşınma oranları

Veriler incelendiğinde (Şekil 12.a), karışım içerisindeki ince bilyanın (2,5mm) iri bilyaya olan 4 mm'ye oranla daha fazla aşındığı, karışımın toplam aşınma değerinin ise bu iki eğilim arasında yer aldığı görülmektedir. Şekil 12.b ve Şekil 12.c'de karışım içerisindeki davranımın tekli bilya bileşiminin aşınmasından olan farklılığı tartışılmaktadır. İnce bilyanın tekli olarak kullanıldığı durumdaki aşınma değerinin, karışım içerisindeki verilere nazaran daha fazla olduğu belirlenmiştir (Şekil 12.b). Bu davranım iri bilyada değişmiş, tekli bilyanın aşınma değerinin karışım içerisindeki verilere kıyasla daha az olduğu tespit edilmiştir (Şekil 12.c). Bu durum, karışım içerisinde bulunan iri bilyaların daha fazla darbeye maruz kalmasıyla ve ince bilyaların bir şekilde darbeden korunmasıyla açıklanabilir. Sonuç olarak, karışım kullanıldığında, iri bilyanın ince bilya üzerinde ek bir aşınma hareketine neden olmadığı anlaşılmıştır.

Sonuçlar

Çalışma, farklı boylarda bilya karışımının öğütme sonuçları üzerindeki etkilerini araştırarak karıştırılmalı değirmenlerde enerji optimizasyonu hakkında bir fikir vermeyi amaçlamıştır. Bu bağlamda, tek boyutlu şarjlarla birlikte, ikili ve üçlü bileşimler hazırlanmış ve farklı çalışma koşulları ve malzemeler için test edilmiştir. Çalışma sonucunda en verimli öğütme koşulunun 1,5 mm'lik tekli bilya kullanımına ait olduğu tespit edilmiştir. Ancak karışım kullanımının da getirdiği birtakım avantajların olduğu da saptanmıştır. Boyut dağılımının şekli bunun en önemli sonucudur.

Tek boyutlu bilya kullanımında ince boydaki bilyanın öğütme verimliliğinin daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Kullanılan bilyalar içerisinde 1,5 mm'lik bilya en verimli enerji-boyut indirgemesi ilişkisine sahiptir. Ancak malzeme bazlı değişkenlik olduğu da tespit edilmiştir. Klinker ve kalsit malzemelerinde ince bilyanın etkin olduğunun belirlenmesine karşın, daha ince besleme boyuna sahip bakır numunesinde önemli farklılık saptanamamıştır. İki boyutlu bilya karışımının etkileri incelendiğinde belirli bir enerji değerinin üstünde (10 kWsa/t) farklılıklar gözlemlenmiştir. Malzemelerin öğütme karakteristiklerinin ve besleme boyut dağılımındaki farklılığın bu değişkenliğe yol açtığı söylenebilir. Kalsit ve klinker numuneleri için ikili bileşimin ortalama bilya boyu değerinin artması ile enerji verimli bir öğütme işleminin gerçekleştirilebildiği saptanmıştır. Bakır numunesi için ise diğer numunelerden farklı olarak düşük enerji seviyelerinde (<20 kWsa/t) farklılık gözlemlenmiş ve daha ince bilya bileşimi olan 1,5/2,5mm karışımının daha etkin olduğu anlaşılmıştır. Üçlü bilya bileşiminde yapılan deneyler neticesinde bu tür bir bilya dağılımının belirlenen test koşulları, malzeme ve makine özelinde etkin olmadığı anlaşılmıştır. Tekli ve üçlü bilya bileşimlerinin enerji-boyut indirgemesi verileri kıyaslandığında, tek boyutlu bilya tercihinin daha makul olduğu anlaşılmıştır.

İkili bilya dağılımı C4 (2,5 mm, 4 mm), diğer tekli, ikili ve üçlü bileşimlerle kıyaslandığında daha dik bir tane boyut dağılımı sağlamıştır. Ayrıca, tekli şarjlara kıyasla, aynı indirgeme değerleri için %56'ya varan bir enerji tasarrufu ve aşınma miktarında %50 azalma sağlamaktadır.

Aşınma, öğütme işlemi için önemli bir konudur. Tercih edilen bilya karışımının aşınma olgusunun da incelenmesi öğütme maliyeti açısından önemlidir. Çalışma kapsamında, karışımlar içerisinde enerji ve boyut dağılımının şekli değişkenleri yönünden fark yaratan 2,5 mm ve 4 mm karışımı için bilya aşınma ölçümleri yapılmıştır. Ölçümler, ikili karışımların tercih edilmesi durumunda tek boyutlu seçime göre aşınmayı %50'ye kadar azaltmanın mümkün olduğunu kanıtlamıştır. Bu konu üzerine, ileride yapılacak kapsamlı çalışmalar, konunun endüstriyel ölçekte daha tutarlı bir ekonomik değerlendirmesini sağlayacaktır.

Çalışmada kazanılan bilginin sonraki zenginleştirme süreçleri veya son kullanım uygulamaları ile ilişkilendirilmesi tavsiye edilmektedir. Bu bağlamda, karışım bilya kullanılması durumunda önemli bir sonuç olan boyut dağılımının şeklinin çimento mukavemet özellikleri, fizikokimyasal süreçler veya diğer zenginleştirme yöntemleri üzerindeki etkilerinin incelenebileceği düşünülmektedir.

Kaynaklar

- Altun, O., Benzer, H., Enderle, U. 2013. Minerals Engineering, Effects of operating parameters on the efficiency of dry stirred milling, 43, 58-66.
- Austin, L.G., Klmpel, R.R., Luckie, P.T. 1984. Process engineering of size reduction: Ball milling. New York: Society of Mining Engineers of the AIME.
- Batterham, R. 2011. Trend in comminution driven by energy, Advanced Powder Technology 22, pp. 138 – 140.
- Cho, H., Kwon, J., Kim, K., Mun, M. 2013. Optimum choice of the make-up ball sizes for maximum throughput in tumbling ball mills. Powder Technology. 246, 62-634.
- Cleary, P.W., Sinnott, M.D., Pereira, G.G. 2015. Computational Prediction of Performance for a Full Scale Isamill: Part 1 - Media Motion and Energy Utilisation in a Dry Mill. Minerals Engineering. 79, 220-238.
- Çayırılı, S. 2017. Kalsitin karıştırılmalı bilyalı değirmende kuru mikronizer öğütülmesinde bazı işlem parametrelerinin etkisinin araştırılması. Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi. Cilt 6 Sayı 1, 166 - 173
- Çolak, S., Altun, O., Benzer, H., Gencer, Z., Koçak. 2018. Development of a preliminary media wear measurement test procedure for cement ball milling applications. Powder Technology 325, 678 – 686.
- El-Shall, H., Somasundaran, P. 1984. Physico-Chemical aspects of grinding: a review of use of additives. Powder Technology. 38, 275-293.
- Fadhel, H. and Frances, C. 2001. Wet batch grinding of alumina in a stirred bead mill. Powder Technology 119 (2-3), pp. 257-268.
- Farber, Y. B., Durant, B., Bedesi, N. 2011. Effect of media size and mechanical properties on milling efficiency and media consumption. Minerals Engineering 24 (3-4), pp. 367-372.
- Fuerstenau, D.W. 1995. Grinding aids. Kona. 13, 5-18.
- Gao, M., Young, M., Allum, P. 2002. IsaMill Fine Grinding Technology and Its Industrial Applications at Mount Isa Mines, Proc. 34th Annual Meeting of the Canadian Mineral Processors. The Canadian Mineral Processors, Ottawa, 171-188.
- Hasegawa, M., Kimata, M., Shimane, M., Shoji, T., Tsuruta, M. 2001. The effect of liquid additives on dry ultrafine grinding of quartz. Powder Technology. 114, 145-151.
- Huang, Y.H., Chang, Y.L., Fleiter, T. 2016. A critical analysis of energy efficiency improvement potentials in Taiwan's cement industry. Energy Policy. 96, 14-26.
- Jankovic, A. 2003. Variables affecting the fine grinding of minerals using stirred mills. Minerals Engineering. 16, 337-345.
- Jankovic, A. 2000. Mining, fine grinding in Australian minerals industry. Journal of Mining and Metallurgy 36, 51-61.
- Jayasundara, C.T., Yang, R.Y., Yu, A.B., Rubenstein, J. 2010. Effects of disc rotation speed and media loading on particle flow and grinding performance in a horizontal stirred mill. International Journal of Mineral Processing 96 (1) 27-35.
- Jeknavorian, A.A., Barry, E.F., Serafin, F. 1998. Determination of grinding aids in portland cement by pyrolysis gas chromatography-mass spectrometer. Cement and Concrete Research. 28, 1335-1345.
- Jeswiet, J., Szekeres, A. 2016. Energy consumption in mining comminution, Procedia CIRP 48, pp. 140 – 145.
- Kwade, A., Blecher, L., Schwedes, J. 1996. Motion and stress intensity of grinding beads in stirred media mill Part 2: Stress intensity and its effect on comminution. Powder Technology 86 (1), pp. 69-76.

- Madloul, N.A., Saidur, R., Hossain, M.S., Rahim, N.A. 2011. A critical review on energy use savings in the cement industries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 15, 2042-2060.
- Mankosa, M. J., Adel, G. T., Yoon, R. H. 1986. Effect of media size in stirred ball mill grinding of coal. *Powder Technology* 49 (1), pp. 75-82.
- Metso Inc. 2002. *Basics in Mineral Processing Handbook*.
- Northey, S.A., Mudd, G.M., Werner, T.T., Haque, N. 2019. Sustainable water management and improved corporate reporting in mining. *Water Resources and Industry* 21, pp. 100 – 104.
- Pilevneli, C.C., Kizgut, S., Toroglu, T., Cuhadaroglu, D., Yigit, E. 2004. Open and closed circuit dry grinding of cement mill rejects in a pilot scale vertical stirred mill. *Powder Technology* 139 (2) 165-174.
- Prziwara, P., Breitung-Faes, S., Kwade, A. 2018. Impact of the powder flow Behavior on continuous fine grinding in dry operated stirred media mills. *Minerals Engineering* 128, 215-223.
- Rosin, P., Rammler, E. 1933. The laws governing the fineness of powdered coal. *Journal of the Institute of Fuel*. 7, 29-36.
- Roveri, E., Chaves, A.P. 2011. Mecanismos de desgaste de corpos moedores em moinhos de bolas. *Technologia em Metalurgia, Materiais e Mineração*. 8(4), 261-266.
- Sayadi, A.R., Khalesi, M.R., Borji, M.K. 2014. A parametric cost model for mineral grinding mills. *Minerals Engineering*. 55, 96-102.
- Taylor, L., Skuse, D., Blackburn, S., Greenwood, R. 2020. Stirred media mills in the mining industry: material grindability, energy-size relationships, and operating conditions. *Powder Technology*. 369, 1-16.
- Toprak, N.A., Altun, O., Benzer, H. 2018. The effects of grinding aids on modelling of air classification of cement. *Construction and Building Materials*. 160, 564-573.
- Zheng, J., Harris, C. C., Somasundaran, P. 1996. A study on grinding and energy input in stirred media mills. *Powder Technology* 86 (2), pp. 171-178.

