



Orijinal Araştırma / Original Research

## BİR KIRMA ELEME TESİSİNİN PERFORMANSININ DEĞERLENDİRİLMESİ VE OPTİMİZASYONU

### PERFORMANCE EVALUATION AND OPTIMIZATION OF A CRUSHING-SCREENING PLANT

Özgür Özcan<sup>a,\*</sup> Nurettin Alper Toprak<sup>a,\*\*</sup> İbrahim Göktaş<sup>a,\*\*\*</sup>

<sup>a</sup> Hacettepe Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü, ANKARA

Geliş Tarihi / Received : 19 Aralık / December 2017

Kabul Tarihi / Accepted : 2 Nisan / April 2018

#### Anahtar Sözcükler:

Kırma,  
Eleme,  
Agrega,  
Modelleme,  
Optimizasyon.

#### ÖZ

Bu çalışmada, Türkiye'de yer alan bir kırma eleme devresinde performans değerlendirme ve optimizasyona yönelik detaylı örnekleme çalışmaları yürütülmüştür. Performans değerlendirme çalışmalarının sonuçlarına göre devrede yer alan dik milli darbeli kırıcı ortalama boyut indirgeme değerlerinde çalışmaktadır. Ancak, devrede yer alan konik kırıcının indirgeme oranı düşüktür. Kapalı ağız açıklığının düşürülmesi konik kırıcı indirgeme oranını arttırmaktadır. Elek verimleri ise üzerine gelen malzeme miktarı arttıkça düşmektedir. Bu çalışmanın ardından devrede yer alan tüm ekipmanlar uygun model yapıları ile ayrı ayrı modellenmiştir. Model sonucu elde edilen tonaj ve tane boyu dağılımları madde denkliği sonuçları ile çok yakındır. Modelleme çalışmalarının ardından iki farklı simülasyon çalışması yürütülmüştür. İlk çalışmanın sonuçları konik kırıcı kapalı ağız açıklığının düşürülmesinin hem konik kırıcı indirgeme oranının hem de konik kırıcı elek grubu performansını arttırdığını göstermiştir. İkinci çalışmanın sonucunda ise devrede yer alan ince elek açıklıklarının 5 mm'den 6 mm'ye çıkarılması sonucunda ürün kalitesinde herhangi bir bozulma olmadan tesis kapasitesinin %15 arttırılabileceğini göstermiştir.

#### ABSTRACT

In this study, extensive sampling campaign was performed around the crushing-screening circuit of an aggregate plant in Turkey in order to performance evaluation and optimization. According to results of performance evaluation studies, vertical shaft impactor (VSI) is running within average reduction ratio values. But, the reduction ratio of the cone crusher was lower. Decreasing close side setting (CSS) of cone crusher increases the reduction ratio. Screen performances were decreasing by increasing feed capacity. Then, all equipment in the circuit were modelled individually by using the appropriate model structures. Model and mass balance results were very close to each other. After modelling, two different simulation studies were performed separately. As a result of first simulation study, the reduction ratio of cone crusher increases by decreasing CSS, therefore; the cone crusher screen group performance also increases. As a result of second simulation study, the plant capacity can be increased 15% by changing fine screen aperture from 5 mm to 6 mm without any deterioration in the product quality.

#### Keywords:

Crushing,  
Screening,  
Aggregate,  
Modelling,  
Optimization.

\* Sorumlu yazar: [ozgurozcan@hacettepe.edu.tr](mailto:ozgurozcan@hacettepe.edu.tr) • <https://orcid.org/0000-0001-6177-4585>

\*\* [natoprak@hacettepe.edu.tr](mailto:natoprak@hacettepe.edu.tr) • <https://orcid.org/0000-0003-0172-2198>

## GİRİŞ

Agrega, sanayileşme ve kentleşmenin bir sonucu olarak ortaya çıkan konut ihtiyacını karşılamaya çalışan ve son yıllarda ülkemizin en önemli sektörlerinden biri haline gelen, inşaat sektörünün temel hammaddeleri arasındadır. Yol, altyapı malzemesi, bina inşaatları, köprü inşaatı vb. alanlarda çok yoğun bir şekilde kullanılmaktadır (Yılmaz vd., 2003). Agregaya; beton yapımında çimento ve su karışımından oluşan bağlayıcı madde yardımı ile bir araya getirilen, organik olmayan, kum, çakıl, kırmataş gibi doğal kaynaklı veya yüksek fırın cürufu, geliştirilmiş perlit, geliştirilmiş kil gibi yapay kaynaklı olan taneli malzemedir (Doğan vd., 2003).

Kırma-eleme tesisleri hem maden sektöründe üretilen cevherlerin işlendiği, hem de inşaat sektörünün ihtiyaç duyduğu kırma taş üretiminin (asfalt, beton, yol malzemesi vs.) gerçekleştirildiği elektro-mekanik tesislerdir.

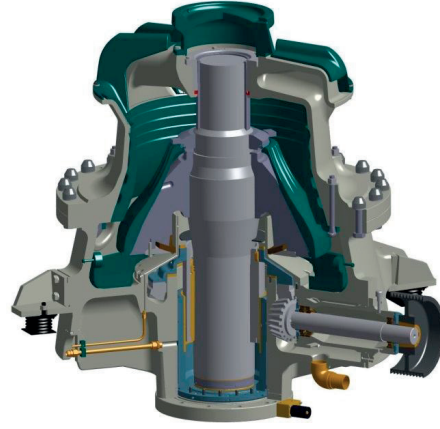
Taş ocakları veya derelerden delme-patlatma ve/veya direkt kazıcı yükleyiciler ile çıkarılarak tesise getirilen malzeme genellikle üç farklı kırma işlemine tabi tutulur. Birincil, ikincil ve üçüncül olarak adlandırılan bu kırma süreçleri sonucunda, malzeme eleklerden geçirilerek istenilen boyutlarda sınıflandırılır ve kırma taş (agrega) üretiminin son aşaması tamamlanmış olur. Elde edilen ürün yol yapımı için asfalt tesislerine, betonarme yapılar için ise beton santrallerine gönderilir.

Birincil kırıcılar; çeneli ve rotorlu kırıcılar olmak üzere iki çeşittir. Ülkemizde birincil kırıcı olarak genellikle çeneli kırıcı kullanılmaktadır (Arman, 2014).

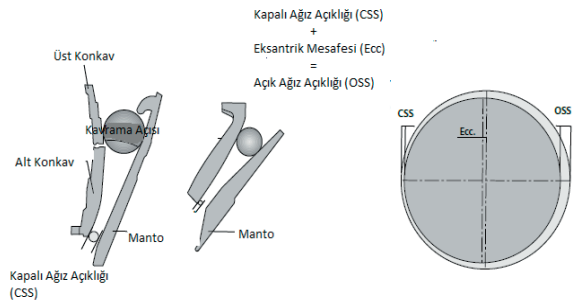
Konik kırıcılar ise granit, bazalt ve andezit gibi sert ve aşındırıcı dere ve ocak malzemelerini kırmak için tasarlanmış olup ikincil ve üçüncül kırıcı olarak kullanılmaktadır. Konik kırıcıların çalışma prensibi malzemeleri sıkıştırma, kesme ve bükme etkisiyle kırmaktır. Malzemeyi sıkıştırarak kırdıkları için düşük toz ve aşınma oranları sunmaktadır. İşletmelerde ikincil ve üçüncül kırıcı olarak kullanılan bu tip kırıcıların indirgeme oranı 3-7:1 'dir (Wills ve Napier-Munn, 2006). Konik kırıcıya ait kesit görünümü ile kırma mekanizması sırasıyla Şekil 1 ve Şekil 2'de verilmektedir.

Dik milli darbeli kırıcılar kum ocakları, taş ocakları, hazır beton ve madencilik sektöründe kullanılabilen, avantajları ve maliyetleri düşük olan kırıcılardır. Üçüncül kırıcılara alternatif olarak

üretilen, orta irilikteki bazalt, granit gibi sert veya aşındırıcı her türlü malzemeyi kırarak 0-5 mm kum elde etmek için kullanılan, kum ve kübiklik oranı yüksek kırıcılardır (Wills ve Napier-Munn, 2006).

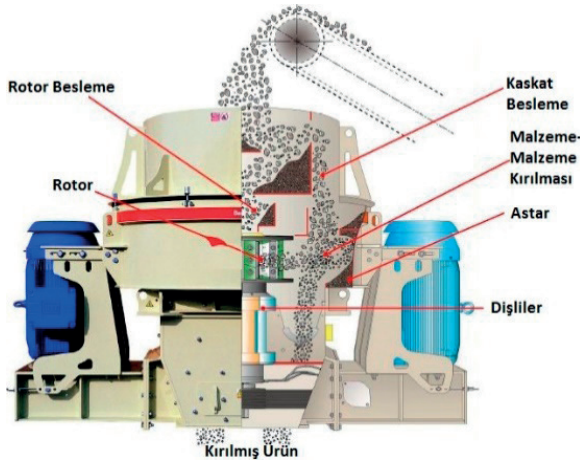


Şekil 1. Konik kırıcının kesit görünümü



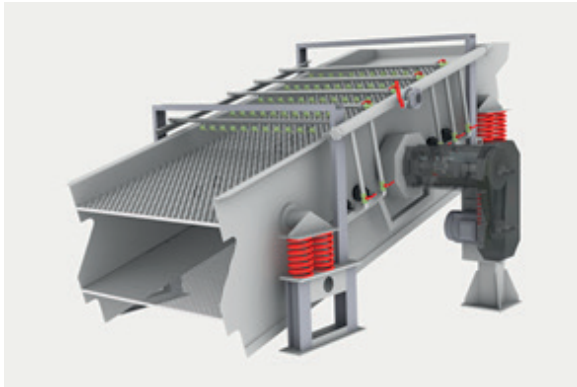
Şekil 2. Konik kırıcı kırma mekanizması

Dik milli kırıcılar diğer kırıcı tiplerinden farklı olarak, malzemeyi iki plaka arasında sıkıştırmak yerine içerisinde bulunan rotor aracılığıyla malzemeleri hızlandırarak hem birbirlerine hem de astara çarptırılması sonucu kırma işlemi gerçekleştirmektedir. Malzeme konveyör aracılığı ile kırıcının üst kısmına taşınmakta ve en üst noktada kırıcı haznesine beslenmektedir. Burada tüm malzeme iki kola ayrılmaktadır. Bir kısmı rotor haznesine doğru yol alırken (rotor besleme), diğer kısmı kırıcı kenarından (kaskat besleme) hazneye giriş yapmaktadır. Rotor haznesine gelen taneler, cidarlara doğru ivmelendirilmektedir. Kenara savrulduklarında, hem astara hem de kaskat besleme noktasından gelen diğer tanelere çarparak kırılma işlemine maruz bırakılmaktadır (Şekil 3). Bu tip kırıcıların indirgeme oranları 2:1-5:1 aralığında değişmektedir (Marcotte, 2017).



Şekil 3. Dik milli darbeli kırıcı kırma mekanizması

Kırma işleminin ardından ürün boyutundaki malzeme eleme yöntemi ile elde edilir (Şekil 4). Eleme işlemi; tanelerin belirli boyutlardaki açıklıklardan geçebilme ihtimali esasına dayanan bir sınıflandırma işlemidir. Eleme, kuru veya yaş olarak yapılabilmektedir. Kuru eleme göreceli olarak daha ucuz ve yaygın kullanılan bir yöntem olmasına rağmen özellikle dere ya da denizden çıkarılan ve yüksek nem içeren malzemelerin elenmesinde yaş (su ile) eleme ihtiyacı ortaya çıkmaktadır. Yaş eleme esnasında eleğe beslenen malzeme ile birlikte, yüksek oranda su verilerek ince taneciklerin iri taneler üzerinden temizlenmesi ve elek altına geçirilmesi kolaylaştırılmaktadır. Elek üzerine su verme işlemi uygun yerlere yerleştirilen boru tesisi ve su püskürtücüleri ile sağlanmaktadır (Wills ve Napier-Munn, 2006).



Şekil 4. Titreşimli elek

Eleğe beslenen malzeme, eleğin arka yüzeyine temas eder etmez, ön tarafa doğru hızlandırılır.

Bu hareket yüzeydeki malzeme yüksekliğinin hızla azalarak malzemenin elek yüzeyine homojen bir şekilde dağılmasını sağlar. Bu esnada ince malzemenin büyük bir kısmı ilk bir metre içerisinde hızla alta geçer, böylece eleğin en yüklü olan başlangıç bölgesinin yükü, hızla dağıtılmış ve dengelenmiş olur. Bu aşamadan sonra elek yüzeyine dağıtılmış malzeme, yavaşlatılarak etkin bir şekilde elenir (Arman, 2014).

Kırma eleme tesislerinde üretim aşamasındaki maliyet oranları incelendiğinde, maliyetin yaklaşık olarak yarısının kırma-eleme-yıkama devrelerinde olduğu görülmektedir (Çizelge 1).

Çizelge 1. Kırmataş üretim aşamasına ait maliyet analizleri (Arman, 2014)

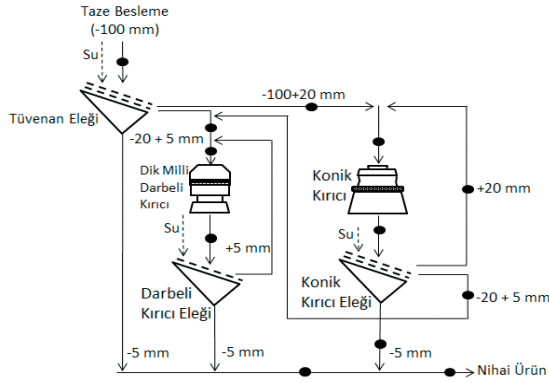
Üretim aşaması	Maliyet Oranı (%)
Delme-patlatma	18-21
Gevşetme, ufalama ve yükleme	15-17
Taşıma/nakliye	14-16
Kırma-eleme-yıkama	46-53

Bu sonuç, kırma eleminin, dolayısıyla doğru tesis tasarımlarının ne kadar önemli olduğunu göstermektedir.

Bu çalışmanın amacı, bir kırma eleme devresinin normal çalışma koşulları altında performansının belirlenmesi, tesis çalışmalarından elde edilen veriler ve uygun model yapıları kullanılarak devrede yer alan kırıcı ve eleklerin modellenmesi son aşamada ise simülasyon yolu ile devrenin normal çalışma koşullarının tahmini ve devrede yapılacak olan değişikliklerin devre performansı üzerine etkilerinin araştırılmasıdır. Devrede yapılacak olası bir iyileştirme kırma taş üretiminde önemli bir tasarrufa olanak sağlayacaktır.

## 1. TESİS ÇALIŞMALARI

Sakarya ili sınırları içerisinde yer alan ve hammaddesini Sakarya nehrinden karşılayan bir kırma eleme tesisinin performans değerlendirme ve optimizasyonuna yönelik detaylı numune alma çalışmaları yürütülmüştür. Kırma eleme tesisinin basitleştirilmiş akım şeması ve numune alma noktaları Şekil 5'te verilmektedir.



Şekil 5. Kırma eleme devresinin basitleştirilmiş akım şeması ve numune alma noktaları

Tesis akım şemasında ilk olarak 20 mm ve 5 mm açıklıklı çift katlı tüvenan eleğe gelen -100 mm besleme malzemesi -100+20 mm, -20+5 mm ve -5 mm olarak üç farklı fraksiyona ayrılmaktadır. -100+20 mm fraksiyonu konik kırıcıya, -20+5 mm fraksiyonu ise dik milli darbeli kırıcıya beslenmektedir. Tüvenan elekten alınan -5 mm fraksiyonu ise nihai ürüne eklenmektedir. Konik kırıcı ürünü 20 mm ve 5 mm açıklıklı çift katlı konik kırıcı eleğine beslenmektedir. Bu elekten alınan +20 mm fraksiyonu tekrar konik kırıcıya, -20+5 mm fraksiyonu ise dik milli darbeli kırıcıya beslenmektedir. Konik kırıcı eleğinden elde edilen -5 mm fraksiyonu ise nihai ürüne eklenmektedir. Dik milli darbeli kırıcı ürünü 5 mm açıklığa sahip darbeli kırıcı eleğine beslenmektedir. Bu eleğin üstü konik kırıcı eleği -20+5 mm fraksiyonu ile birleşerek tekrar dik milli darbeli kırıcıya beslenmektedir. Dik milli darbeli kırıcı eleğinden alınan -5 mm malzeme ise nihai ürüne eklenmektedir. Tüvenan eleği, konik kırıcı eleği ve dik milli darbeli kırıcı eleğinden elde edilen -5 mm fraksiyonlarının toplamı ise nihai ürünü oluşturmaktadır. Devrede yer alan ekipmanlara ait teknik özellikler orijinal kataloglarından temin edilmiştir. Konik kırıcı, dik milli darbeli kırıcı ve eleklerle ait teknik özellikler sırasıyla Çizelge 2, Çizelge 3 ve Çizelge 4'te sunulmaktadır.

Çizelge 2. Devrede yer alan konik kırıcıya ait teknik özellikler

Besleme Kapalı Ağız Açıklığı (mm)		Motor Gücü (kW)	Kırıcı Kapasitesi (t/s)	
En büyük	En küçük		En büyük	En küçük
22	15	-	262	199

Çizelge 3. Devrede yer alan dik milli darbeli kırıcıya ait teknik özellikler

Besleme Tonajı (t/s)	Rotor Çapı (mm)	Rotor Hızı (rpm)	Rotor Çevresel Hızı (m/s)	Motor Gücü (kW)
710	850	1250-1800	45-75	520

Çizelge 4. Devrede yer alan eleklerle ait teknik özellikler

Elek Açıklığı (mm)	Boy x En (m x m)	Tel Kalınlığı (mm)
20	6 x 2	5
5	6 x 2	2

Devrede yer alan konik kırıcının maksimum besleme tane boyu 200 mm'dir. Aynı zamanda kapalı ağız açıklığı 8 mm'ye kadar düşürülebilmektedir. Ancak kırıcıda kullanılan astar, ağız açıklığının 15 mm'ye kadar düşürülmesine izin vermektedir. Devrede yer alan dik milli darbeli kırıcı maksimum besleme boyu 50 mm'dir.

### 1.1. Numune Alma Çalışmaları

Numune alma çalışmaları üç farklı koşulda gerçekleştirilmiştir. Test 1 kapsamında tesisin normal çalışma koşullarında konik kırıcı kapalı ağız açıklığı 22 mm'de iken tüm devre etrafından numuneler alınmıştır. Test 2 kapsamında konik kırıcı ağız açıklığı 18 mm'ye düşürülerek kırıcı beslemesi ve ürününden numuneler alınmıştır. Test 3 kapsamında ise konik kırıcı kapalı ağız açıklığı en düşük değeri olan 15 mm'ye düşürülerek kırıcı beslemesi ve ürününden numuneler alınmıştır.

Test 1'in amacı tesisin normal çalışma koşulları altındaki performansını belirlemektir. Test 2 ve Test 3'ün amacı ise devrede ana kırma ekipmanı olarak yer alan konik kırıcı kapalı ağız açıklığının hem ekipman performansı hem de devre performansı üzerine etkilerini araştırmaktır. Test 2 ve Test 3 sırasında devre etrafı numunesi alınmamıştır. Tesiste yer alan dik milli darbeli kırıcı boyut indirgememin yanı sıra ürünün kübiklik derecesini arttıracak şekilde çalıştırıldığı için bu kırıcıdan farklı koşullarda numune alınmamıştır.

Numune alma çalışmalarına başlamadan önce normal çalışma koşullarında devrenin kararlı durumda olup olmadığının takip edilmesi amacıyla kontrol odasında besleme tonajı, kırıcı motor akımı, kırıcı yatak sıcaklığı, gibi parametrelerin zamana bağlı değişimi gözlemlenmiştir.

Test 1 esnasında devrenin tamamen kararlı durumda olduğuna karar verildikten sonra ani duruş ile tüm ekipman ve bant konveyörlerin aynı anda durması sağlanmıştır. Daha sonra Şekil 5'te verilen noktalardaki konveyörlerden bantın belirli bir mesafesini tamamen sıyırmak suretiyle temsili numuneler alınmıştır. Ayrıca numune alınan tüm konveyör bantların hızları takometre yardımı ile ölçülmüştür. Alınan numuneler nem içeriklerinin belirlenebilmesi amacıyla yaş şekilde tartılmıştır. Daha sonra tane boyu dağılımlarının belirlenmesi amacıyla Hacettepe Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümü'ne gönderilmiştir. Tesiste numune alınan bant konveyörlerden bazılarının görüntüsü Fotoğraf 1'de verilmektedir.



Fotoğraf 1. Numune alma çalışmaları

Test 1'in tamamlanmasının ardından Test 2 ve Test 3 kapsamında konik kırıcının kapalı ağız açıklığı değiştirilerek kırıcı beslemesi ve ürününden numuneler alınmıştır. Kapalı ağız açıklığı kırıcı ürününün en iri tane boyunu, tane boyu dağılımını, kırıcı kapasitesi ve kırıcı güç tüketimini etkileyen en önemli parametredir (Yıldız, 2010).

Ağız açıklığı kırıcı boş halde çalışırken içerisine çapı sabit kurşun bilye atılarak ölçülmüştür. Konik kırıcı etrafında yapılan her bir örnekleme sırasında öncelikle kırıcı boş halde çalıştırılarak kapalı ağız açıklığı ayarlanmıştır. Devrede kararlı çalışma koşullarının sağlanmasının ardından ani duruş ile tüm bantlar durdurulmuştur. Konik kırıcı beslemesi ve ürününden alınan numunelerin tane boyu dağılımları belirlenerek kapalı ağız açıklığının ürün inceliği üzerine olan etkisi belirlenmiştir. Konik kırıcı testlerine ait koşullar Çizelge 5'te sunulmaktadır.

Çizelge 5. Konik kırıcı test koşulları

	Test 1*	Test 2	Test 3
Kapalı Ağız Açıklığı (mm)	22	18	15
Açık Ağız Açıklığı (mm)	54	50	47
Kapasite (t/s)	207	202	193

\*Devre etrafı numune alınan koşul

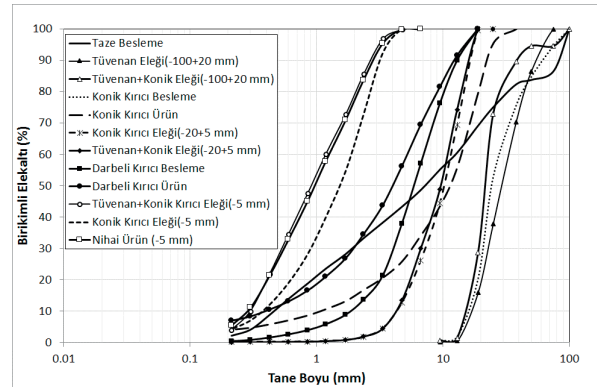
## 2. LABORATUVAR ÇALIŞMALARI

Laboratuvar çalışmaları kapsamında tüm numunelerin tane boyu dağılımı en iri boydan 212  $\mu$ m'e kadar  $\sqrt{2}$  elek serisi kullanılarak yaş eleme yöntemi ile belirlenmiştir. Elek analizi sırasında kullanılan elek boyları Çizelge 6'da sunulmaktadır.

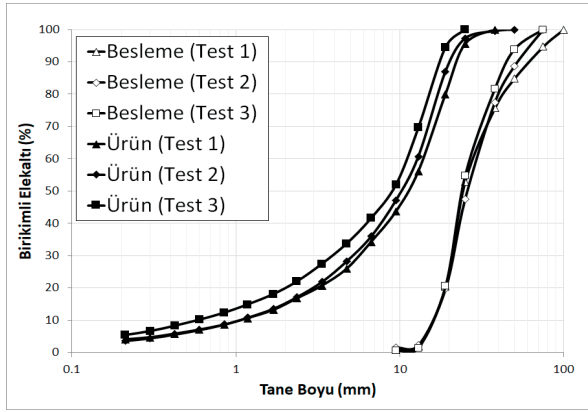
Çizelge 6. Elek analizlerinde kullanılan elek boyları

Elek Boyu (mm)	
75,0	3,35
50,0	2,36
38,0	1,70
25,0	1,18
19,0	0,85
13,2	0,60
9,50	0,425
6,70	0,300
4,75	0,212

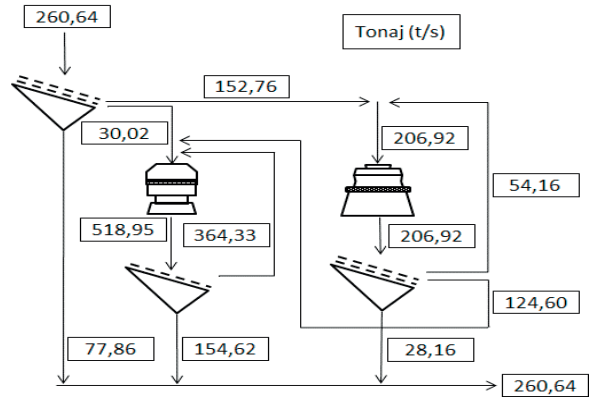
Test 1'e ait devre etrafı ölçülen tane boyu dağılımları Şekil 6'da, konik kırıcı kapalı ağız açıklığının değiştirilmesi ile elde edilen kırıcı beslemesi ve ürünlerine ait tane boyu dağılımları ise Şekil 7'de verilmektedir.



Şekil 6. Kırma eleme devresi ölçülen tane boyu dağılımları (Test 1)



Şekil 7. Konik kırıcı etrafı ölçülen tane boyu dağılımları



Şekil 8. Kırma eleme devresi madde denklığı sonucu elde edilen kuru tonaj değerleri (Test 1)

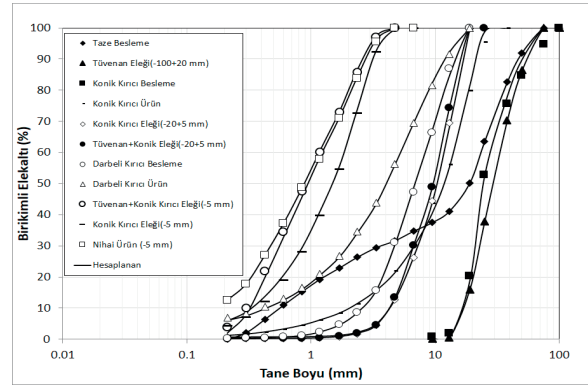
### 3. MADDE DENKLİĞİ ÇALIŞMALARI

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

Kırma eleme tesisinden alınan tüm numunelerin tane boyu dağılımları ve kontrol odasında kaydedilen ve bant hızı ölçümü ile elde edilen tonaj değerleri kullanılarak madde denklığı çalışmaları yürütülmüştür. Bu çalışmalar sırasında madde denklığı algoritması kullanılmıştır. Madde denklığı sonucunda devre etrafı tane boyu dağılımları istatistiksel olarak hatalardan arındırılarak düzeltilmiş ve bu değerler kullanılarak Test 1 için devredeki tüm kolların akış değerleri, Test 2 ve Test 3 için ise konik kırıcı besleme ve ürün akış değerleri (tonajları) hesaplanmıştır.

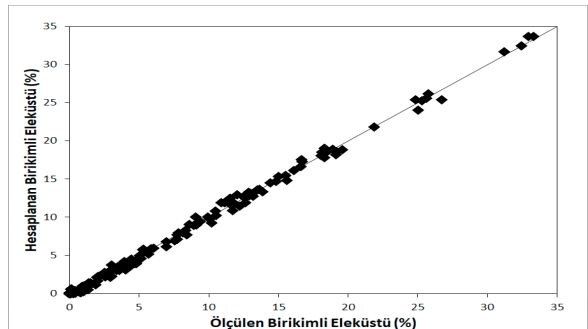
Madde denklığı sonucunda düzeltilen tane boyu dağılımları ve hesaplanan devre etrafı akış değerlerinin yanı sıra, örnekleme fiziksel koşullar sebebiyle yapılamadığı akışlar da bu çalışma ile hesaplanmıştır.

Madde denklığı çalışmaları, taze beslemeye ait nem değeri (%5,30) kullanılarak hesaplanan kuru tonaj değeri baz alınarak yürütülmüştür. Madde denklığı sonucu kırma eleme devresinde Test 1 için hesaplanan kuru tonaj değerleri Şekil 8'de, hesaplanan tane boyu dağılımları ise ölçülen değerlerle birlikte Şekil 9'da verilmektedir. Şekil 9'da her bir veri noktası ölçülen değerleri, düz çizgiler ise hesaplanan (düzeltilmiş) değerleri ifade etmektedir.



Şekil 9. Kırma eleme devresi ölçülen ve madde denklığı sonucunda hesaplanan devre etrafı tane boyu dağılımları (Test 1)

Numune alma çalışmalarından elde edilen tane boyu dağılımları ile madde denklığı sonucu elde edilen tane boyu değerlerinin "y=x" doğrusu üzerinde birleştiği net bir şekilde görülmektedir. Bu durum devre etrafı örnekleme işinin doğru yapıldığını teyit etmektedir (Şekil 10).



Şekil 10. Ölçülen hesaplanan birikimli elek üstü değerleri (Test 1)

#### 4. PERFORMANS DEĞERLENDİRME ÇALIŞMALARI

##### 4.1. Kırıcı Performanslarının Değerlendirilmesi

Bu bölümde kırma eleme devresinde yer alan kırıcıların indirgeme oranları her bir test için ayrı ayrı hesaplanmıştır. İndirgeme oranı kırıcıya giren malzemenin %80'inden geçen tane boyunun ( $F_{80}$ ) kırıcı ürününün %80'inden geçen tane boyuna ( $P_{80}$ ) bölünmesi ile hesaplanır (Wills ve Napier-Munn, 2006).

Devrede yer alan konik ve dik milli darbeli kırıcının hesaplanan besleme ve ürün tane boyu dağılımları kullanılarak elde edilen kırıcı indirgeme oranları tüm testler için Çizelge 7'de sunulmaktadır.

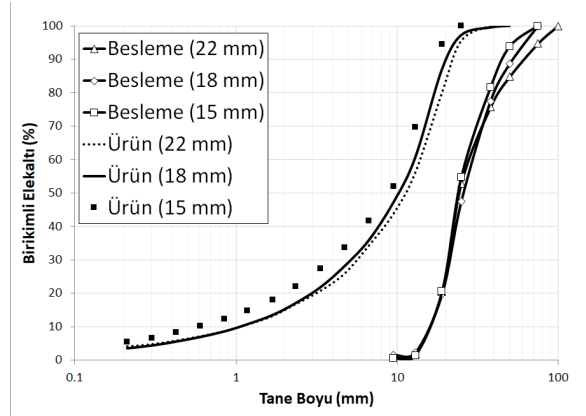
Çizelge 7. Kırıcılara ait indirgeme oranları

Test	Kırıcı	$F_{80}$ (mm)	$P_{80}$ (mm)	İndirgeme Oranı
1	Darbeli	12,08	8,96	1,35:1
	Konik	39,96	18,76	2,13:1
2	Konik	40,74	17,43	2,34:1
3	Konik	37,22	15,50	2,40:1

Çizelge 7 incelendiğinde devrede yer alan dik milli darbeli kırıcının indirgeme oranı 1,35:1 olarak hesaplandığı görülmektedir. Dik milli darbeli kırıcıların genel kullanım amaçları ve indirgeme oranları incelendiğinde performansının kapasitesi ile uyumlu olduğu görülmektedir.

Devrede yer alan konik kırıcı performansı incelendiğinde normal çalışma koşullarındaki indirgeme oranının 2,13:1 olduğu görülmektedir. Konik kırıcıların genel indirgeme oranları 3-7:1 civarındadır. Konik kırıcının teknik özellikleri incelendiğinde 22 mm kapalı ağız açıklığı için kapasitesinde herhangi bir sorun olmadığı gözlenmektedir. Ancak konik kırıcı besleme tane boyu dağılımının ince olması  $F_{80}$  değerini düşürmekte, bu nedenle indirgeme oranı ortalama değerlerin altında kalmaktadır. Konik kırıcılar 200 mm'ye kadar beslemeyi kabul edebilmektedirler.

Konik kırıcı kapalı ağız açıklığının düşürülmesi ise kırıcı indirgeme oranını 2,13:1'den 2,40:1 değerine kadar yükseltmiştir. Konik kırıcı kapalı ağız açıklığının düşürülmesi hem kırıcı beslemesi hem de kırıcı ürün tane boyu dağılımlarını inceltmiştir (Şekil 11).



Şekil 11. Konik kırıcı farklı ağız açıklıklarında elde edilen ürün tane boyu dağılımları

Şekil 11 incelendiğinde kapalı ağız açıklığının düşürülmesi kırıcıdan çıkan en iri boyun da incelmeye neden olmaktadır. Bu durumun sonucu olarak, 20 mm'lik konik kırıcı eleğinin üzerinde kalarak tekrar kırıcıya dönen malzemenin de özellikle iri boylardaki dağılımı incelenmektedir. Konik kırıcı ağız açıklığının düşürülmesi ürün inceliğinin artmasının yanı sıra kırıcı ürünü içerisindeki -5 mm'lik malzeme miktarında da bir iyileşmeye neden olmaktadır. Konik kırıcı kapalı ağız açıklığının 22 mm'den 15 mm'ye düşürülmesi sonucunda kırıcı ürünü içerisindeki 5 mm'den ince malzeme yüzdesi %26,95'ten, %34,74'e kadar yükselmiştir.

##### 4.2. Elek Performanslarının Değerlendirilmesi

Elekler en temel anlamda üzerinde belirli boyutlarda açıklıklar bulunan yüzeylerdir. Bu yüzeye temas eden taneler ise açıklıktan iri veya ince olmalarına göre ya elek altına geçerler ya da elek üzerinde kalırlar. Eleklerde performans ise değişik yöntemler kullanılarak belirlenmektedir. Performans hesaplamalarında elek beslemesinde, elek açıklığından daha ince boyda olan malzemenin ne kadarının elek altına geçtiği hesaplanarak elek verimliliği değerlendirilebilir (Whiten, 1972).

Eleklerde elek açıklığı ve kesme boyu aynı değeri almaktadır. Ancak pratik uygulamalarda eleğin kesme boyu daima elek açıklığından daha düşük olmaktadır. Elek yüzeyinde herhangi bir aşınma veya delik yoksa iri ürünün elek altına geçmesi de olası bir durum değildir. Bu nedenle elek verimi genelde elek altına geçmesi gerekirken elek üstünde kalan malzeme miktarına göre hesaplanmaktadır (Whiten, 1972).

Bu durumda elek verimi basitçe Eşitlik 1'deki şekilde ifade edilmektedir.

$$V = \frac{x}{a} \quad (1)$$

Burada, V, elek verimini, x, elek altına geçen malzeme miktarını (t/s), a ise elek altına geçmesi gereken malzeme miktarını (t/s) ifade etmektedir.

Tesislerde genellikle %95 elek verimi hedeflenmektedir (Yıldız, 2010). Elemede %100'lük bir verim elde etmek için ise kapasitenin büyük oranda düşürülmesi gerekmektedir. Bu nedenle kapasite ve elek verimi birlikte değerlendirilmesi gereken iki işletme parametresidir (Yıldız, 2010). Devrede yer alan eleklerle ait verim değerleri Çizelge 8'de sunulmaktadır.

Çizelge 8. Devrede yer alan eleklerle ait verim değerleri

Elek Adı ve Açıklığı	Besleme Tonajı (t/s)	Verim (%)
Tüvenan Elek (20 mm)	260,64	78,09
Konik Kırıcı Eleği (20 mm)	207,07	87,94
Tüvenan Elek (5 mm)	107,88	93,12
Konik Kırıcı Eleği (5 mm)	152,91	61,09
Darbeli Kırıcı Eleği (5 mm)	518,81	51,39

Çizelge 8 incelendiğinde, 20 mm elek açıklığına sahip tüvenan eleğin veriminin %78, konik kırıcı eleğinin veriminin ise yaklaşık olarak %88 olduğu görülmektedir. Elek boyutları, elek yüzey alanları, genlik ve titreşimleri ile yıkama suyu miktarları aynı olmasına rağmen tüvenan elek grubunda yer alan 20 mm açıklıklı elek konik kırıcı grubunda yer alan eleğe göre daha verimsiz bir ayırım yapmaktadır. Bu eleklerin üzerlerine gelen malzeme miktarları incelendiğinde ise 20 mm açıklıklı tüvenan eleğine 260 t/s, 20 mm açıklıklı konik kırıcı eleğine ise 207 t/s besleme yapıldığı görülmektedir. Aynı yüzey alanında daha fazla malzeme eleven tüvenan eleğin üzerinde konik kırıcı eleğine göre daha kalın bir malzeme yatağı oluşmaktadır. Bu yatak, elek üzerindeki tanelerin elek yüzeyi ile temasını zorlaştırmakta ve daha zor elenmelerine yol açmaktadır. Tanelerin daha zor elenmesi sonucunda ise elek verimi düşmekte ve elek altı tane boyu dağılımı bir başka deyişle eleğin kesme boyu incelmektedir.

Bu sonuç, aynı özelliklere sahip eleklerde eleğe beslenen malzeme miktarının elek performansı üzerinde önemli bir etken olduğunu göstermektedir.

dir. Besleme tonajının elek üzerindeki yatak kalınlığını dolayısıyla elek kesme boyunu ve verimini etkilediği de düşünülmektedir.

Tüvenan ve konik kırıcı elek grubu 5 mm açıklıklı eleklerin üzerine gelen malzeme miktarları sırasıyla 107,88 t/s ve 152,91 t/s olarak hesaplanmıştır. Her iki eleğin verim değeri incelendiğinde ise 20 mm açıklıklı eleklerle benzer şekilde üzerine daha fazla yük gelen eleğin verimi daha düşüktür (Çizelge 8).

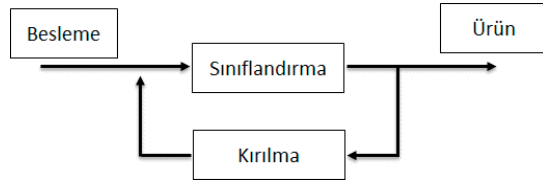
Darbeli kırıcı elek grubunda yer alan 5 mm açıklıklı elek en düşük verim değerine sahiptir. Darbeli kırıcı eleğinin diğer eleklerle aynı özelliklere sahip olmasına rağmen üzerine gelen tonajın çokluğu nedeniyle elek verimi yaklaşık olarak %51 değerinde kalmaktadır.

## 5. MODELLEME VE SİMÜLASYON ÇALIŞMALARI

### 5.1. Kırıcı Modeli

Modelleme çalışmalarında devrede bulunan kırıcılar ve elekler uygun ekipman modelleri kullanılarak ayrı ayrı modellenmiş, modelin tahmin gücü ise madde denkliği ile hesaplanan değerlerin model ile tahmini yoluyla sınanmıştır.

Devrede yer alan kırıcılar için Whiten (1972) kırıcı modeli kullanılmıştır (Şekil 12).



Şekil 12. Whiten kırıcı modelinin basitleştirilmiş akım şeması

Whiten kırıcı modeli kırma işlemi için basit bir madde denkliği kurularak geliştirilmiştir (Whiten, 1972).

Kırıcı içerisine giren besleme ya doğrudan kırıcıdan çıkmakta ya da kırıcı içerisinde kırılarak alt boylara dağılmaktadır. Kapalı ağız açıklığından ince taneler kırıcıdan kırılmadan çıkarken, ağız açıklığından iri taneler ise kırıcıdan çıkmadan önce mutlaka kırılarak alt boylara dağılmaktadır. Bu iki boy arasında yer alan taneler ise belirlili olasılıklarda kırılarak alt boylara dağılmakta ve kırıcıdan çıkmaktadır.



Bu işlem için madde denkliği eşitlikleri yazılabilmektedir. Bu eşitliklerden ilki kırıcıda kırılacak olan tanelerin oranını belirleyen ve çapraz bir matristen oluşan sınıflandırma matrisi, ikincisi ise kırıcıda kırılan tanelerin alt boylara nasıl dağıldığını gösteren kırılma matrisidir. Sınıflandırma ve kırılma matrisini gösteren eşitlikler sırasıyla Eşitlik 2 ve Eşitlik 3'te verilmektedir.

$$X = p + Cx \quad (2)$$

$$X = f + BCx \quad (3)$$

Burada,

X kırıcıya giren tane boyu dağılımı, C sınıflandırma matrisi, B kırılma matrisi, f besleme tane boyu dağılımını ifade eden vektör ve p, ürün tane boyu dağılımını ifade eden vektördür.

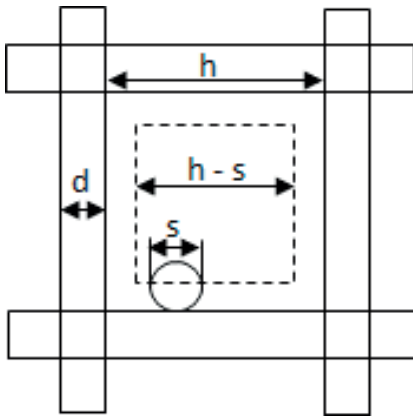
Bu iki eşitlik basit bir şekilde tek bir eşitliğe dönüştürülebilmektedir (Eşitlik 4).

$$p = (I - C). (I - BC)^{-1}. f \quad (4)$$

Burada, I birim matrisi ifade etmektedir. Bu eşitlik besleme tane boyu dağılımının bilindiği durumlarda ürün tane boyu dağılımının hesaplanmasında kullanılabilir.

## 5.2. Elek Modeli

Devrede yer alan eleklerin modellenmesinde olasılık modeli kullanılmıştır. Bu model yapısında s boyutundaki bir tanenin tek bir denemede elek altına geçme olasılığı Şekil 13'te gösterilen terminoloji kullanılarak hesaplanabilmektedir.



Şekil 13. Titreşimli elek olasılık modelinin terminolojisi (Napier-Munn vd., 1996)

Model yapısında elek alanı (açıklık + tel)  $(h+d)^2$  olarak hesaplanmaktadır. Burada, h elek açıklığını, d ise tel kalınlığını ifade etmektedir. Elek beslemesinde yer alan s boyutundaki bir tane tel üzerinde zıplamadan elek altına geçebilmek için  $(h-s)^2$  lik bir alana düşmek zorundadır. Bu durumda bir tanenin elek altına geçme olasılığı Eşitlik 5'te verilmektedir.

$$[(h - s)/(h + d)]^2 \quad (5)$$

S boyutundaki bir tanenin m deneme sonrası elek altına geçememe olasılığı ise Eşitlik 6'da verilmektedir. Bu eşitlik elek için gerekli performans eğrisini sağlamaktadır.

$$[1 - \{(h - s)/(h + d)\}^2]^m \quad (6)$$

Herhangi bir tanenin elek altına geçmesi için gerekli deneme sayısı m, bir verim katsayısı  $(k_1)^2$ , eleğin uzunluğu ve yük faktörü (f) ile orantılıdır (Eşitlik 7).

$$k_1^2 \cdot l \cdot f \quad (7)$$

Yük faktörü düşük besleme tonajlarında tek bir değer alırken besleme tonajı arttıkça azalmakta ve sifıra gitmektedir. Yapılan literatür çalışmalarında verim katsayısının tonaj ile birlikte değişmesine izin verildiğinde tahmin edilen ve ölçülen elek verimi arasındaki ilişkinin çok daha yakın olduğu görülmüştür (Napier-Munn vd., 1996).

## 5.3. Model Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Modelleme çalışmasının başarısını değerlendirmek üzere tüvenan beslemenin tane boyu dağılımı ve tonajı ile kırıcı ve elek model parametreleri girilerek Test 1 koşulları için tüm devredeki akış kollarına ait tane boyu dağılımları ve tonajlar hesaplanmıştır.

Madde denkliği sonucunda hesaplanan tonaj değerlerinin modelleme çalışmaları sonunda elde edilen değerlerle karşılaştırması Çizelge 9'da sunulmaktadır.

Çizelge 9 incelendiğinde madde denkliği ile hesaplanan akış tonajlarının model tarafından başarılı bir şekilde tahmin edildiği görülmektedir. Şekil 14'te madde denkliği ile hesaplanan ve model tarafından tahmin edilen tane boyu dağılımlarının karşılaştırılması verilmektedir. Şekil 14'te her bir veri noktası hesaplanan değerleri, düz çizgiler tahmin edilen değerleri ifade etmektedir. Elde

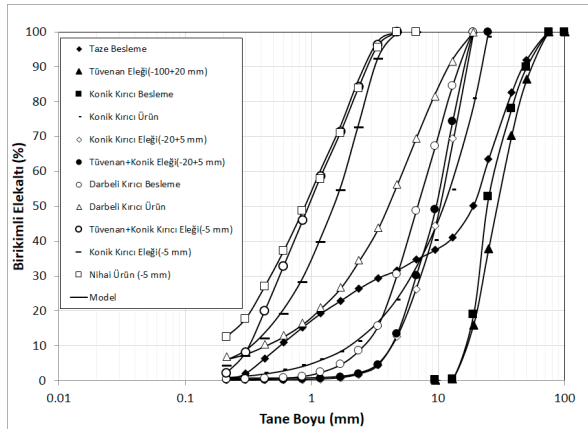
edilen sonuçlar, modelin devre etrafı tane boyu dağılımlarını belirlemede başarılı olduğunu göstermektedir.

Çizelge 9. Madde denklığı ve model sonuçlarının karşılaştırılması (Test 1 koşulu)

Akış Adı	Tonaj (t/s)	
	Madde Denklığı	Model
Tüvenan Besleme	260,64	260,64
Tüvenan Elek -100+20 mm	152,76	152,18
Tüvenan Elek -20+5 mm	30,02	28,16
Tüvenan elek -5 mm	77,86	80,31
Konik Kırıcı Besleme	206,92	209,13
Konik Kırıcı Eleği -100+20 mm	54,16	54,95
Konik Kırıcı Eleği -20+5 mm	124,60	123,57
Konik Kırıcı Eleği -5 mm	28,16	30,61
Darbeli Kırıcı Besleme	518,95	517,78
Darbeli Kırıcı Eleği -20+5 mm	364,33	367,28
Darbeli Kırıcı Eleği -5 mm	154,62	150,49
Nihai Ürün	260,64	260,64

Çizelge 10. Devrede yer alan kırıcılara ait hesaplanan model parametreleri

Tane Boyu (mm)	Kırılma Matrisi	Sınıflandırma Matrisi	
		Konik Kırıcı	Darbeli Kırıcı
75	0,29	1,00	0,56
50	0,22	1,00	0,54
38	0,14	1,00	0,53
25	0,11	0,87	0,51
19	0,07	0,69	0,49
13	0,05	0,58	0,48
9,5	0,03	0,47	0,47
6,7	0,03	0,39	0,45
4,75	0,02	0,32	0,44
3,35	0,01	0,26	0,42
2,36	0,01	0,21	0,41
1,7	0,01	0,17	0,40
1,18	0,004	0,14	0,39
0,85	0,003	0,12	0,37
0,6	0,002	0,10	0,36
0,425	0,001	0,08	0,35
0,3	0,001	0,06	0,34
0,212	0,001	0,05	0,33



Şekil 14. Madde denklığı ile hesaplanan ve model ile tahmin edilen devre etrafı tane boyu dağılımları

Kırıcılar ve elekler için hesaplanan model parametreleri sırasıyla Çizelge 10 ve Çizelge 11'de sunulmaktadır. Çizelge 10'da yer alan kırılma ve sınıflandırma matrisleri, kırıcı beslemesi ve ürüne ait tane boyu dağılımları kullanılarak geri hesaplama yöntemi ile belirlenmiştir.

Çizelge 11. Devrede yer alan eleklerle ait hesaplanan model parametreleri

Parametre	Tüvenan Eleği		HP3 Eleği		Barmac Eleği
	20 mm	5 mm	20 mm	5 mm	5 mm
d (mm)	5	2,5	5	2,5	2,5
h (mm)	20	5	20	5	5
l (m)	6	6	6	6	6
$k_1$	1	1	1	1	1
f	3,18	13,97	31,81	6,35	1,16
m	19,09	83,82	190,88	38,08	6,98

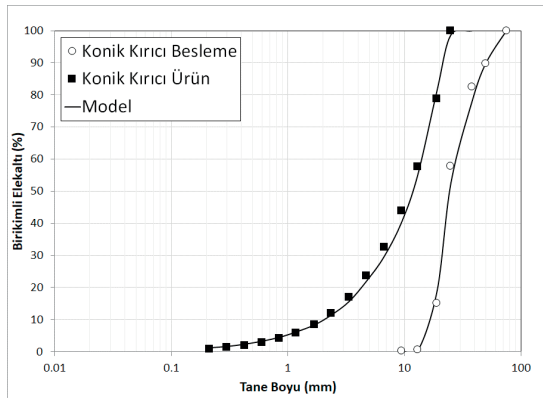
#### 5.4. Simülasyon Çalışmaları

Modelleme sonucu elde edilen parametre değerleri kullanılarak devrede kapasite ve verim artışı sağlayabilecek alternatifler simülasyon yoluyla değerlendirilmiştir. Çalışmalarda simülasyon yazılımına girdi olarak tesis besleme tonajı ve tane boyu dağılımı kullanılmıştır. Devrede yer alan ekipmanların model parametreleri ile birlikte bu veriler kullanılarak farklı kırıcı açıklıkları veya

farklı elek açıklıklarında elde edilecek ürünlerin tonajı ve tane boyu dağılımları ile ekipman verimleri Şekil 5'te yer alan akım şemasına göre belirlenmiştir.

#### 5.4.1. Konik Kırıcı Kapalı Ağız Açıklığının (KAA) Değiştirilmesi

İlk simülasyon senaryosunda devrede yer alan konik kırıcının kapalı ağız açıklığı 22 mm'den 15 mm'ye düşürülmüştür. Bu durumda konik kırıcının ürettiği 5 mm'den ince malzeme miktarındaki artışın konik kırıcı ve konik kırıcı elek grubu performansları üzerindeki etkileri tahmin edilmiştir. Bu senaryoda performans değerlendirme ve simülasyon sonucu elde edilen kırıcı ürünleri karşılaştırılmış ve tane boyu dağılımlarının birbirine çok yakın olduğu görülmüştür (Şekil 15.)



Şekil 15. Konik kırıcı ürünün simülasyon ile tahmini (KAA: 15 mm)

Bu sonuç modelin farklı ekipman parametrelerinde tahmin gücünün oldukça yüksek olduğunu da açıkça göstermektedir. Konik kırıcı kapalı ağız açıklığının 22 mm'den 15 mm'ye düşürülmesi sonrasında konik kırıcı ve darbeli kırıcı besleme tonajlarında düşüş görülmektedir. Ayrıca konik kırıcı ürününün daha ince bir tane boyu dağılımına sahip olması konik kırıcı elek grubunda iri malzeme miktarında azalışa, 5 mm'den ince malzeme miktarında ise artışa neden olmaktadır (Çizelge 12).

Çizelge 12. Konik kırıcı kapalı ağız açıklığının düşürülmesi ile tahmin edilen tonajlar

Akış Adı	Tonaj (t/s)	
	KAA 22 mm	KAA 15 mm
Tüvenan Besleme	260,64	260,64
Tüvenan Elek -100+20 mm	152,18	155,02
Tüvenan Elek -20+5 mm	28,16	26,69
Tüvenan elek -5 mm	80,31	78,92
Konik Kırıcı Besleme	209,13	193,88
Konik Kırıcı Eleği -100+20 mm	54,95	38,86
Konik Kırıcı Eleği -20+5 mm	123,57	110,57
Konik Kırıcı Eleği -5 mm	30,61	44,45
Darbeli Kırıcı Besleme	517,78	474,31
Darbeli Kırıcı Eleği -20+5 mm	367,28	331,64
Darbeli Kırıcı Eleği -5 mm	150,49	137,26
Nihai Ürün	260,64	260,64

Konik kırıcı kapalı ağız açıklığının düşürülmesi sonucunda konik kırıcı elek grubu eleklerinde tahmin edilen verim değerleri Çizelge 13'te, kırıcı ve elek kollarındaki incelik değerleri ise ( $P_{80}$ ) Çizelge 14'te sunulmaktadır.

Çizelge 13. Konik kırıcı kapalı ağız açıklığının düşürülmesi sonucu tahmin edilen konik kırıcı grubu eleklerine ait verim değerleri

Elek Verimi (%)	KAA 22 mm	KAA 15 mm
Konik 20 mm	87,94	94,07
Konik 5 mm	61,09	71,56

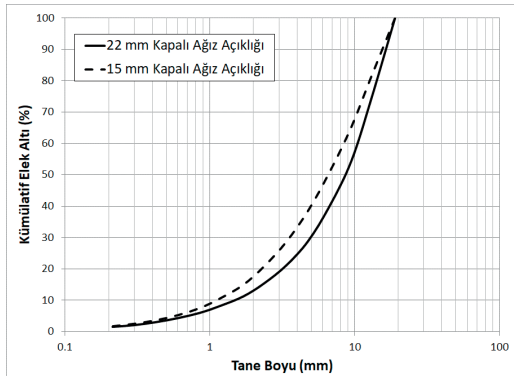
Bu simülasyon çalışması sonucunda tahmin edilen konik kırıcı elek grubu verimleri incelendiğinde her iki elek veriminde de artış olduğu görülmektedir. Kırıcı ağız açıklığının düşürülmesinin ardından 20 mm'lik elek üzerine gelen tonajın azalması, bunun yanı sıra elek besleme tane boyu dağılımının incelenmesi sonucunda elek verimlerinin önemli ölçüde arttığı düşünülmektedir.

Çizelge 14. Konik kırıcı kapalı ağız açıklığının düşürülmesi ile elde edilen incelik değerleri ( $P_{80}$ )

Akış Adı	$P_{80}$ (mm)	
	KAA 22 mm	KAA 15 mm
Tüvenan Besleme	36,24	36,24
Konik Kırıcı Besleme	36,72	41,23
Konik Kırıcı Ürün	19,36	18,24
Konik Kırıcı Eleği -100+20 mm	23,65	23,88
Konik Kırıcı Eleği -20+5 mm	15,17	14,43
Konik Kırıcı Eleği -5 mm	2,72	2,66
Darbeli Kırıcı Besleme	12,00	11,46
Darbeli Kırıcı Ürün	9,13	8,73
Darbeli Kırıcı Eleği -20+5 mm	10,66	10,17
Darbeli Kırıcı Eleği -5 mm	1,82	1,82
Nihai Ürün	2,01	2,04

Çizelge 14 incelendiğinde konik kırıcı kapalı ağız açıklığının düşürülmesi sonucunda konik kırıcı beslemesinin bir miktar irileştiği, konik kırıcı ürününün ise bir miktar incelendiği görülmektedir. Nihai ürün inceliği ele alındığında ise önemli bir değişiklik gözlenmemektedir.

5 mm'lik eleğin üzerine gelen tonaj 22 mm açıklıkta 153 t/s, 15 mm açıklıkta ise 155 t/s olarak hesaplanmıştır. Ancak konik kırıcının bu iki ürüne ait tahmin edilen tane boyu dağılımları incelendiğinde 15 mm açıklıkta elde edilen kırıcı ürününde -20 mm fraksiyonunun 22 mm açıklıkta elde edilenden çok daha ince olduğu belirlenmiştir.



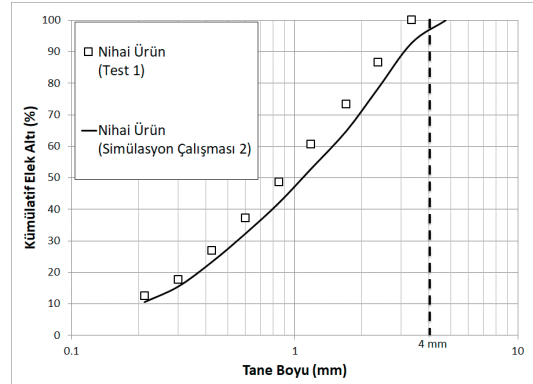
Şekil 16. Farklı kapalı ağız açıklıklarında tahmin edilen konik kırıcı ürünü -20 mm fraksiyonu

Şekil 16 incelendiğinde 22 mm kapalı ağız açıklığında kırıcı ürünü -20 mm fraksiyonunun yaklaşık olarak %30'u 5 mm'den inceyken, bu oran 15 mm kapalı ağız açıklığında %40 olmaktadır. Bu sonuç elek üzerine gelen tonajın yanı sıra besleme içe-

risinde elek açıklığından ince malzeme miktarının da elek performansını etkilediğini göstermektedir. Aynı elek besleme tonajında besleme içerisinde var olan elek açıklığından ince tanelerin artması elek verimini de arttırmaktadır.

#### 5.4.2. İnce Elek Açıklıklarının 5 mm'den 6 mm'ye Yükseltilmesi

Tesiste üretilen kırma taş kumu TS 706 EN 12620 standartlarına uygun olacak şekilde üretilmektedir. Bu standartlara göre ince agrega tane büyüklüğü 4 mm'den ince olan agregalardır. Ancak tesisteki elek performansları göz önüne alındığında tesiste üretilen ürünün en üst boyu 3 mm civarındadır. Bu durum 3-4 mm arasındaki tane boyu fraksiyonunun ürün yerine elek üstünde kalmasına ve tesis kapasitesinin düşmesine neden olmaktadır. İkinci simülasyon çalışmasında konik kırıcı kapalı ağız açıklığı 15 mm'de sabit tutulmuş, nihai ürün elek açıklıkları ise 5 mm'den 6 mm'ye çıkarılmıştır. Bu çalışmadaki amaç tesisten en üst boyu 4 mm'ye yakın bir nihai ürün alınmasıdır (Şekil 17).



Şekil 17. Normal çalışma koşullarında alınan nihai ürün ile ikinci simülasyon çalışması sonucunda elde edilen nihai ürüne ait tane boyu dağılımları

Şekil 17 incelendiğinde nihai ürün elek açıklıklarının 5 mm'den 6 mm'ye yükseltilmesi durumunda ürün tane boyu dağılımının bir miktar irileştiği görülmektedir. Ancak nihai üründe bulunan en üst boy 4,75 mm olmaktadır. Bu değer TS 706 EN 12620'de yer alan  $\pm 5\%$  tolerans değerini karşılamaktadır. Bu durum tesiste ürün boyutuna gelen ancak elek üstüne giden malzemenin elenerek ürüne dahil olmasını sağlamaktadır.

Elek açıklığının artırılması ise tüm elek gruplarında elek üstü malzeme miktarının azalmasına ve kırıcı besleme tonajlarının düşmesine neden

olmuştur. Bu durum ise devre performansının birinci simülasyon çalışmasından daha iyi değerlere çıkmasını sağlamıştır.

Ancak bu simülasyon çalışmasının amacı devre performansını birinci simülasyon çalışmasına yakın tutarak taze besleme tonajını arttırmaktır. Tüvenan besleme tonajı, kırıcı tonajları devre etrafı örnekleme yapılan koşula (Test 1) en yakın değere gelene kadar arttırılmıştır.

İkinci simülasyon çalışmasına ait sonuçlar Çizelge 15'te sunulmaktadır.

Çizelge 15 incelendiğinde elek açıklıklarının artırılması sonucunda ürün kalitesinde herhangi bir bozulma olmadan tesis kapasitesi 260 t/s'ten 300 t/s değerine çıkmaktadır. Tesis kapasitesindeki artış hali hazırda elenemeyen ürün boyutundaki tanelerin daha verimli elenmesi ile gerçekleşmiştir. Tesisteki kapasite artışı yaklaşık olarak %15'tir. Simülasyon çalışmaları bir bütün olarak ele alındığında konik kırıcı kapalı ağız açıklığının düşürülmesi sonucunda kırıcı ürünü incelmış, konik kırıcı elek grubu verim değerleri artmıştır. Aynı koşulda nihai ürün elek açıklıklarının arttırılması sonucunda ise benzer verim değerinde tesis kapasitesinde yaklaşık olarak %15'lik bir artış sağlanmıştır.

Çizelge 15. İkinci Simülasyon çalışmasına ait sonuçlar

Akış Adı	Tonaj (t/s)	
	Test 1 Model (5 mm elek)	Simülasyon 2 (6 mm elek)
Tüvenan Besleme	260,64	300,00
Tüvenan Elek -100+20 mm	152,18	178,43
Tüvenan Elek -20+5 & 6 mm	28,16	27,01
Tüvenan elek -5 & 6 mm	80,31	94,56
Konik Kırıcı Besleme	209,13	210,17
Konik Kırıcı Eleği -100+20 mm	54,95	31,74
Konik Kırıcı Eleği -20+5 & 6 mm	123,57	121,57
Konik Kırıcı Eleği -5 & 6 mm	30,61	56,76
Darbeleri Kırıcı Besleme	517,78	496,29
Darbeleri Kırıcı Eleği -20+5 & 6 mm	367,28	344,02
Darbeleri Kırıcı Eleği -5 & 6 mm	150,49	148,68
Nihai Ürün	260,64	300,00

## SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, Sakarya ili sınırları içerisinde ham maddesini Sakarya nehrinden sağlayan bir kırma eleme tesisinin performans değerlendirme ve optimizasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

Tesiste yapılan çalışmalar kapsamında ana kırma ekipmanı olan konik kırıcı farklı kapalı ağız açıklıklarında çalıştırılmış ve numuneler toplanmıştır. Devrede yer alan diğer kırma ekipmanı olan dik milli darbeleri kırıcı ise boyut küçültme amacının yanında tanelerin kübiklik derecesini arttırmaya yönelik çalıştırıldığından simülasyon çalışmaları kapsamında model parametreleri sabit tutulmuştur.

Performans değerlendirme çalışmalarından elde edilen sonuçlara göre dik milli darbeleri kırıcı ortalama indirgeme oranından daha düşük bir değerde çalışmaktadır. Bu kırıcının indirgeme oranının düşük olmasının en önemli nedeni ise tanelerin kübiklik derecesini arttırmaya yönelik çalıştırılmasıdır. Devrede yer alan konik kırıcı da ortalama indirgeme oranlarından daha düşük bir indirgeme oranında çalıştırılmaktadır. Ancak bu durum ekipman verimsizliğinden değil besleme tane boyu dağılımının inceliğindedir. Konik kırıcı besleme tane boyu dağılımının ince olması  $F_{80}$  değerini, dolayısıyla indirgeme oranını düşürmektedir. Konik kırıcı ile farklı kapalı ağız açıklıklarında yapılan testler konik kırıcı kapalı ağız açıklığının düşürülmesinin kırıcı indirgeme oranını arttırdığını göstermektedir.

Devrede yer alan elek performansları değerlendirildiğinde ise elek açıklığından bağımsız olarak üzerine gelen malzeme miktarı fazla olan eleklerin verimlerinin düşük olduğu belirlenmiştir. Normal çalışma şartlarında konik kırıcı kapalı ağız açıklığının maksimum değer olan 22 mm'de tutulması her ne kadar kapasite kullanımı açısından tesisin yararına gibi görünse de elek verimsizliğine yol açmaktadır. Tesiste gerçekleştirilen testler esnasında konik kırıcı kapalı ağız açıklığının düşürülmesi sonucu konik kırıcı elek grubunda meydana gelen verim artışı bunu açıkça göstermektedir.

Devrede yer alan ekipmanlar uygun model yapıları kullanılarak modellenmiştir. Modelleme sonucu tahmin edilen tonaj değerleri ile devre etrafı tane boyu dağılımlarının madde denkliği sonucu

hesaplanan değerlere çok yakın olması modelin tahmin gücünün oldukça yüksek olduğunu göstermektedir.

Simülasyon çalışmaları kapsamında öncelikle ekipman verimlerini arttıracak bir çalışma yapılmıştır. Bu koşulda konik kırıcı kapalı ağız açıklığı 22 mm'den 15 mm'ye düşürülmüştür. Konik kırıcı kapalı ağız açıklığının düşürülmesi tesisin kapasitesi ve ürün kalitesini etkilememiştir. Ancak konik kırıcı indirgeme oranını 2,13:1 değerinden 2,40:1 değerine yükseltmiştir. Ayrıca konik kırıcıdan elde edilen ürün özelliklerinin değişmesi konik kırıcı elek grubundaki elek verimlerini de önemli ölçüde arttırmıştır. Elek verimlerinin artması elek boyundan ince tanelerin daha verimli elenmesine, kırıcıya geri dönen malzeme miktarının azalmasına ve daha verimli bir kırma işleminin gerçekleşmesinde olanak sağlamaktadır.

Simülasyon çalışmalarının ikinci aşamasında ise tesis kapasitesini arttırmaya yönelik çalışmalar yapılmıştır. Bu kapsamda devrede yer alan 5 mm'lik elek açıklıkları 6 mm'ye yükseltilmiştir. Literatürde her ne kadar elek açıklığı ile elek kesme boyu aynı sayılsa da eleme verimi göz önünde bulundurulduğunda elek kesme boyu daima elek açıklığından daha ince bir boyda olmaktadır. Elek açıklıklarının büyümesi sonucunda ürün kalitesini bozmayacak şekilde tesis kapasitesinde %15'lik bir artış öngörülmektedir.

Sonuç olarak, konik kırıcı kapalı ağız açıklığının 22 mm'den 15 mm'ye düşürülmesi ve bu sayede konik kırıcı ve konik kırıcı elek grubunda bir verim artışı sağlanması önerilmektedir.

İkinci olarak normal çalışma koşullarında elek açık alanlarının genellikle yetersiz olduğu görülmektedir. Bu sonuçtan yola çıkarak elek boyutlarının optimize edilmesi düşünülebilir. Ancak simülasyon çalışmaları elek açıklıklarının ürün kalitesini bozmayacak şekilde 5 mm'den 6 mm'ye çıkarılması sonucunda tesis kapasitesinde yaklaşık olarak %15 bir artış sağlandığını göstermektedir. Elek boyutlarının optimize edilmesi yerine elek panellerinin değiştirilmesinin hem zaman hem de maliyet açısından tasarruf sağlayacağı düşünülmektedir.

Kırma taş tesislerinde maliyetin yaklaşık yarısını

oluşturan kırma-eleme-yıkama devrelerinde basit ve ucuz yöntemlerle gerçekleştirilecek olan bu tür optimizasyonların hem sektöre hem de milli kaynaklarımızın kullanımına olumlu etkiler sağlayacağı unutulmamalıdır.

## TEŞEKKÜR

Yazarlar, tesis çalışmaları esnasında yardım ve desteklerini esirgemeyen çalışanlara teşekkürü bir borç bilir.

## KAYNAKLAR

Arman, Y., 2014. Kırma-Eleme ve Taşıma Makinaları Seminer Notları. s. 71.

Doğan, T., Karadoğan, A., Kahrıman A., Durdu, İ., 2003. İstanbul İli ve Çevresinde Bulunan Kırma-taş Ocaklarına Genel Bir Bakış. III. Ulusal Kırma-taş Sempozyumu, 167-178.

Marcotte, E., 2017. All You Need to Know About: Vertical Shaft Impactor (VSI) Primers, <https://www.stedman-machine.com/vsi-primer-article.html>. (Erişim tarihi: 31.01.2018)

Napier-Munn, T., Morrell, S., Morrison, R.D., Kojovic, T., 1996. Mineral Comminution Circuits: Their Operation and Optimization, published by JKRC, Ed Napier-Munn, s. 342.

Whiten, W.J. 1972. The Simulation of Crushing Plants with Models Developed Using Multiple Spline Regression, Journal of South African Institute of Mining and Metallurgy, 72 (10), 257.

Wills, B., Napier-Munn, T.J., 2006. Mineral Processing Technology, ISBN: 0750644508, 471.

Yıldız, N., 2010. Cevher Hazırlama ve Zenginleştirme (Genişletilmiş II. Baskı), ISBN:978-975-96779-2-3, s. 700.

Yılmaz, A.O., Kaya, R., Şentürk, M., Tatarhan, A., Çavuşoğlu, İ., Alp, İ., 2003. 50-130-250-500 ton/saat Kapasiteli Kırma-Eleme Tesislerinin Yatırım ve İşletme Maliyetlerinin Belirlenmesi. III. Ulusal Kırma-taş Sempozyumu, 277-284.