



Orijinal Araştırma / Original Research

ENDÜSTRİYEL ELEMANIN SAYISAL MODELLEMESİ (2. BÖLÜM): TASARIM VE İŞLETME DEĞİŞKENLERİNİN ELEME PERFORMANSI ÜZERİNE ETKİLERİ

NUMERICAL MODELLING OF INDUSTRIAL SCREENING (PART 2): EFFECTS OF DESIGN AND OPERATIONAL VARIABLES ON SCREENING PERFORMANCE

E. Caner Orhan^{a,*}, Ahad Aghlmandi Harzanagh^{a,**}, Ş. Levent Ergün^{a,***}

^a Hacettepe Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü, Ankara, TÜRKİYE

Geliş Tarihi / Received : 16 Ağustos / August 2018

Kabul Tarihi / Accepted : 23 Kasım / November 2018

ÖZ

Anahtar Sözcükler:

Modelleme,
Simülasyon,
Ayrık elemanlar yöntemi,
Endüstriyel eleme.

Cevher hazırlama tesislerinde yaygın olarak kullanılan eleme işlemi, kırma devrelerinin etkin çalışmasında çok önemli bir yere sahiptir. Eleklerin seçiminde, performanslarının ve ürün boyut dağılımlarının tahmininde yaygın olarak konvansiyonel ampirik ya da yarı-ampirik modeller kullanılmaktadır. Bu modeller, başlıca parametrelerin etkilerini dikkate almakla beraber, bazı tasarım-işletme değişkenlerinin (örn., eleğin eğimi, titreşim sıklığı, yönü ve genliği) ve malzeme özelliklerinin (örn. tane şekli) ürün özelliklerine etkisini sayısal olarak ifade etmekte yetersiz kalmaktadır. Taneli malzemelerin hareketini modelleme amacıyla cevher hazırlama alanında da yaygın olarak kullanılan Ayrık Elemanlar Yöntemi (AEY), eleklerin tasarım ve işletme değişkenlerinin yanı sıra, malzeme ile ilgili değişkenlerin (tane boyu dağılımı, tane şekli, vb.) de ürünlerin özellikleri üzerine etkisini başarıyla tahmin edebilmektedir. Bu çalışma kapsamında, AEY kullanılarak, pilot ölçekli bir eleme işleminde, çeşitli tasarım ve işletme değişkenlerinin eleme performansı ve ürünler üzerine etkileri incelenmektedir.

ABSTRACT

Keywords:

Modelling,
Simulation,
Discrete element modelling,
Industrial screening.

Screening operation, which is widely used in mineral processing plants, is essential in efficient operation of crushing circuits. In the selection of screens and the estimation of screening performance and product size distributions, conventional empirical or semi-empirical models are being widely used. Although these models take into account the effects of major parameters, they are insufficient in numerically expressing the effects of some design-operating variables (such as screen slope, vibration frequency, direction and amplitude) and material characteristics (such as particle shape). Discrete Element Modelling (DEM), which has been widely used also in mineral processing field for the modelling of the motion of the particulate materials, can successfully predict the effects of design and operating parameters and material related variables (size distribution, particle shape, etc.) on the product characteristics. In this study, the effects of various design and operating parameters on screening performance and products are investigated using DEM.

* Sorumlu yazar / Corresponding author: eco@hacettepe.edu.tr • <https://orcid.org/0000-0003-2741-0782>

** ahad@hacettepe.edu.tr • <https://orcid.org/0000-0003-3475-7338>

*** lergun@hacettepe.edu.tr • <https://orcid.org/0000-0002-6500-7540>

GİRİŞ

Eleme işlemi, cevher hazırlama tesislerinde, çeşitli amaçlarla, bir malzemenin içerdiği belirli bir boyuttan ince ya da iri fraksiyonların ayrılması amacını gütmektedir. Eleklerin, 3 boyutta hassas olarak ifade edilebilen bir geometriye sahip olması ve besleme malzemesini oluşturan tanelerin elek üzerinde çoğunlukla temel fiziksel prensiplerle (Newton'un hareket kanunları) hareket ediyor olması, eleme işleminin ayrık elemanlar yöntemi (AEY) ile modellenebilmesini mümkün kılmaktadır.

AEY'in eleme işlemine yönelik ilk uygulamalarından biri Shimosaka vd. (2000)'nin çalışmalarına dayanmaktadır. Bu çalışmada, az sayıda (400 adet) tane içeren ve sürekli olmayan üç boyutlu bir sistem ele alınmakta ve genelleştirilmiş bir model elde etmek amacıyla simülasyonlar gerçekleştirilmektedir. Daha sonraki çalışmalarda ise, sürekli bir eleme işleminde tane boyu ve elek yüzeyinin üzerindeki yatak kalınlığının etkileri modellenmeye çalışılmıştır (Chen ve Tong, 2009; Li vd., 2003). Diğer taraftan küçük çaplı üç boyutlu ve periyodik sınır koşullu bir çalışma Cleary (2004) tarafından gerçekleştirilmiştir. Dong vd. (2009), Alkhalidi ve Eberhard (2007) ve Chen vd. (2010) büyük ölçekli (yüksek kapasiteli) eleme işlemine yönelik modelleme çalışmaları yapmıştır. Literatürde bulunan çalışmaların çoğunluğunda, simülasyonu yapılan tanelerin şekli küresel olarak kabul edilmektedir. Sınırlı sayıdaki çalışmalarda farklı boylardaki kürelerin kombinasyonu sonucunda elde edilen daha karmaşık şekillere sahip küre-kümelere (sphere clumps) temel alınarak daha gerçekçi simülasyonlar yapıldığı görülmektedir (Cleary vd., 2009a; Cleary vd., 2009b; Delaney vd., 2012; Kruggel-Emden ve Elskamp, 2014; Aghlmandi Harzanagh vd., 2018).

Eleme işleminin ayrıntılarıyla incelenmesi doğrultusunda, farklı parametrelerin eleme işlemine etkileri ve optimum koşulların belirlenmesi amacıyla son yıllarda AEY'e dayalı çalışmalara rastlanmaktadır. Zhao vd. (2011) dairesel titreşim şeklinin eleme işlemi üzerine etkilerini incelemiştir. Aynı çalışmada, titreşim genliği ve elek eğimi parametreleri de incelenerek optimum eleme koşulları yorumlanmıştır. Tung vd. (2011) ise farklı tel örgü elek yüzeyleri kullanarak sürekli olmayan (kesikli) bir eleme işleminin simülasyonunu

gerçekleştirmiştir. Diğer çalışmalarda ise muz eleklerin simülasyonu (Liu vd., 2013) ve eleme işlemi etkileyen önemli faktörlerden biri olan titreşim şeklinin (eliptik, dairesel veya doğrusal) eleme işlemi üzerine olan etkileri ortaya konmuştur (Xiao ve Tong, 2012; Dong vd., 2013; Xiao ve Tong, 2013).

Yakın zamanda, tane/akışkan etkileşimi ve sıvı köprüleri nedeniyle ortaya çıkan yapışma kuvvetlerini incelemeye çalışan araştırmalar da gerçekleştirilmiştir (Dong ve Yu, 2012; Fernandez vd., 2011; Hilden, 2007). Jahani vd. (2015) ise açık kaynak kodlu LIGGGHTS uygulamasını kullanarak iki katlı muz eleği modellemekte ve çeşitli tasarım ve işlem değişkenlerinin etkilerini incelemektedir. Jafari ve Saljooghi Nezhad (2016) ise ana hatlarıyla elek yüzeyinde meydana gelecek aşınmanın sayısal olarak ifade edilebilmesi amacıyla çeşitli simülasyon çalışmaları gerçekleştirmiştir. Çizgisel ve dairesel titreşim şekillerinin aksine, Yin vd. (2016) eliptik titreşim şekline sahip olan eleklerin performansını araştırmıştır. Elek yüzeyinde bulunan açıklıkların şekil farkının etkisi ise Dong vd. (2016) tarafından incelenmiştir.

Diğer taraftan, AEY ile modellenen eleme işlemine yönelik çalışmalarda, simülasyon sonuçlarının deneysel verilerle karşılaştırıldığı ve üretilen modellerin gerçeğe uygunluğunun sınındığı çalışmalara literatürde ender olarak rastlanmaktadır. Simülasyon sonuçlarının gerçek verilerle karşılaştırıldığı az sayıdaki çalışmadan bazıları Hilden (2007), Kruggel-Emden ve Elskamp (2014), Zhao vd. (2016) ve Aghlmandi Harzanagh vd. (2018) tarafından gerçekleştirilmiştir.

Yazılı literatürde bulunan doğrulama çalışmalarının yanı sıra, bu çalışmanın 1. Bölümü'nde (Orhan vd., 2019) yapılan model sına deneyleri, eleme işleminin modellenmesi çalışmalarında, tasarım ve işletme değişkenlerinin etkilerinin AEY ile kapsamlı olarak incelenebildiğini ve tanelerin hareketi konusunda oldukça ayrıntılı bilgi elde edilebildiğini göstermektedir. AEY'in kullanımı sayesinde, bilgisayar ortamında çeşitli tasarım ve işletme parametrelerinin eleme performansındaki etkilerini araştırmak mümkün olmaktadır.

Bu çalışmanın 1. Bölümü'nde (Orhan vd., 2019) ayrıntıları verilen AEY model alt yapısı kullanılarak, çeşitli parametrelerin eleme performansındaki etkileri araştırılmıştır.

1. SİMÜLASYON KOŞULLARI

Çeşitli işletme ve tasarım parametrelerinin eleme performansındaki etkilerini araştırmak için yapılan simülasyon çalışmalarında kullanılan malzeme özellikleri ve model parametreleri (tane şekli, boyut dağılımı, tanelerin yoğunluğu, sürtünme katsayısı, zaman aralığı, eleğin titreşim şekli, vb.) Çizelge 1’de sunulmaktadır.

Çizelge1. Simülasyonlarda kullanılan ortak veriler

Tane boyu (mm)	26,6 20,6 15,7 12,1 9,5 6,7 4,7 2,8
Tane boyu dağılımı (%)	10 10 20 8 14 14 14 10
Besleme yüksekliği (mm)	275
Titreşim tipi	Doğrusal
Elek açıklığı (mm)	10,5 ve 13,0
Elek yüzeyinin boyutları (mm)	300×900 (genişlik x uzunluk)
Tanelerin yoğunluğu (kg/m ³)	2700
Tanelerin şekli	Küresel ve küresel olmayan
Elastisite modülü (N/m ²)	5×10 ⁷
Poisson oranı	0,45
Geri sıçrama katsayısı	0,3
Sürtünme katsayısı	0,5
Sürtünme katsayısı (yuvarlanma)	0,01
Zaman aralığı (s)	5×10 ⁻⁶
Simülasyon süresi (s)	25-35 s aralığında

Gerçekleştirilen simülasyon çalışmaları kapsamında, eleme işlemi verimini etkileyen aşağıdaki değişkenler incelenmiştir.

Tasarım Değişkenleri:

- Elek eğimi
- Titreşim genliği
- Titreşim sıklığı (frekans)
- Titreşim yönü

İşlem Değişkenleri:

- Besleme akış hızı
- Besleme tane boyu dağılımı

- Tane şekli
- Tane yoğunluğu

Simülasyon çalışmalarında incelenen değişkenlerin değer aralıkları Çizelge 2’de özetlenmektedir. Bazı simülasyonlarda küresel taneler ve diğerlerinde ise küresel olmayan taneler kullanılmıştır. Küresel olmayan taneler, küre kümeleri kullanılarak modellenmiştir.

Çizelge 2. Simülasyonlarda kullanılan parametrelerin değerleri

İşlem değişkeni	Test edilen aralıklar
Besleme hızı	5, 10, 15, 20 ton/saat
Elek eğimi	5°, 10°, 15°, 20°
Titreşim genliği	3, 4, 5, 6 mm
Titreşim frekansı	15, 20, 25, 30 Hz
Titreşim açısı	30°, 45°, 60°, 90°, 120°, 150°
Tane şekli	Küresel ve Küresel olmayan

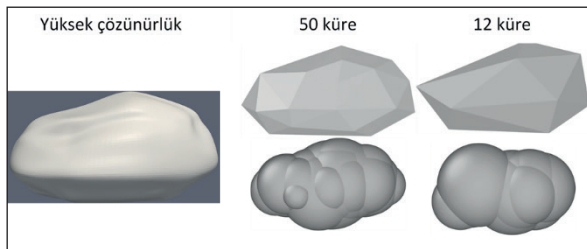
Besleme tane boyu dağılımının etkilerinin incelenmesi amacıyla farklı besleme tane boylarına sahip malzemeler için simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Bu simülasyonlar sırasında Çizelge 1’de verilen boyut dağılımından farklı olarak, elek altına geçmesi gereken fraksiyonların dağılımları farklı olacak şekilde tane boyu dağılımları belirlenmiştir. Bu sayede özellikle, elek açıklığına yakın malzeme miktarının eleme işlem verimine etkileri incelenmiştir (Çizelge 3).

Çizelge 3. Simülasyonlarda kullanılan tane boyu dağılımları

Tane boyu (mm)	Dağılım 1 (%)	Dağılım 2 (%)	Dağılım 3 (%)	Dağılım 4 (%)
26,6	15,0	15,0	15,0	15,0
20,72	10,0	10,0	10,0	10,0
15,72	15,0	15,0	15,0	15,0
11,68	10,0	10,0	10,0	10,0
9,72	50,0	40,0	30,0	20,0
8,49	0	2,5	5,0	7,5
7,48	0	2,5	5,0	7,5
6,48	0	2,5	5,0	7,5
4,9	0	2,5	5,0	7,5
Toplam	100,0	100,0	100,0	100,0

Şekilsiz (küresel olmayan) tanelerin oluşturulmasında LIGGGHTS yazılımının desteklediği çoklu küreler (küre kümeleri, “multispheres” ya da “sphere clumps”) yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntem, küreleri birleştirerek, yeni ve küresel olmayan tane şablonlarının oluşturulması prensibine dayanmaktadır. Küre kümelerini oluşturabilmek için kürelerin merkezlerinin koordinatları ve yarıçaplarını içeren bir metin dosyasının LIGGGHTS’a tanımlanması gerekmektedir.

Küresel olmayan taneler gerçeğe daha yakın sonuçlar sağlamakla beraber, bu tane oluşturulan küre kümesinde bulunan küre sayısının çok olması durumunda simülasyonların tamamlanması haftalar mertebesinde süre almaktadır. Dolayısıyla bir şekilsiz tane ifade eden küre kümesinde bulunan küre adedinin de optimize edilmesi gerekmektedir. Buradaki amaç, şekilsiz bir tanenin mümkün olduğunca az sayıda küre ile ifade edilebilmesidir. Bu doğrultuda, optimum sayıda küreyle istenen parçacık şablonlarının oluşturulması amacıyla bir bilgisayar programı hazırlanmıştır. Bu program, gösterilen ayrıntılı ve yüksek çözünürlüklü 3B bir tane modelini alarak, istenen çözünürlüğe ve ayrıntıya göre köşe sayılarını azaltmakta ve daha sonra elde edilen modelin içini kürelerle doldurmaktadır. Bu program algoritmasında, sadeleşmiş tane şeklinin herhangi bir köşesinde bir küre yaratılmakta ve bu küre herhangi diğer bir köşeye temas edene kadar genişletilmekte ve bu işlem bütün köşeler için tekrar edilmektedir. Sonuç olarak istenilen derecede sadeleştirilmiş ve farklı çaplardan oluşan şekilsiz tane şablonu elde edilebilmektedir. Algoritma, ürettiği kürelerin koordinat ve yarıçap bilgisini içeren bir metin dosyasını LIGGGHTS programa uyumlu bir formatta kaydetmektedir. Yüksek çözünürlüklü bir tanenin basitleştirilmesi ve bir küre kümesine dönüştürülmesi Şekil 1’de gösterilmektedir.



Şekil 1. Yüksek çözünürlüklü bir tane şeklinden daha basit bir şekilsiz tanenin elde edilme süreci

Yukarıda belirtildiği üzere, şekilsiz bir tanenin küre kümeleri yöntemi ile oluşturulmasının ardından koordinat-yarıçap dosyası üretilmektedir. Bu dosya LIGGGHTS'ta kullanılırken elde edilen küre-kümesi istenilen ölçüde ölçeklendirilebilmektedir. Bu sayede farklı tane boylarına sahip küre-kümeleri aynı şablon ile üretilebilmektedir. Ancak, bu aşamada ortaya çıkan önemli bir konu, bir küre kümesinin elek boyutunun (sieve diameter) belirlenmesi aşamasıdır. Bu tanenin elek boyutunu doğrudan hesaplamayı sağlayacak bir model ya da yaklaşım bulunmaması sebebiyle, bu çalışma kapsamında yeni bir yaklaşım geliştirilmiştir. Bu yaklaşım, temel olarak, laboratuvarında uygulanan elek analizi işleminin AEY ile simülasyonuna dayanmaktadır. Diğer bir deyişle, oluşturulan bir küre-kümesi AEY ile bilgisayar ortamında elenmiştir. Bu doğrultuda, öncelikle Tyler serisindeki 22,6, 19,0, 13,0, 11,2, 8, 5,6, 4,0, 2,0 mm göz açıklığına sahip ve her biri 10 adet göz içeren eleklerin 3 boyutlu modelleri hazırlanmıştır. Farklı ölçeklerde oluşturulmuş olan bir küre-kümesi bu boyutlu eleklerden AEY kullanılarak bilgisayar ortamında elenmiş ve bu tanenin hangi ölçek değerinde elek altına geçtiği belirlenmiştir. Bu işlem çeşitli ölçek değerleri için tüm elek boylarında tekrar edilerek, bu tane için hangi ölçek değerinin, Tyler serisindeki hangi eleğe denk geldiği hassas bir şekilde belirlenmiştir. Bu sayede endüstriyel eleme işleminin simülasyonu aşamasında, küre-kümeleri arzu edilen tane boyu dağılımında oluşturulabilmektedir.

2. SİMÜLASYON SONUÇLARI VE VERİLERİN DEĞERLENDİRMESİ

Simülasyonlar sonucunda sağlanan veriler, simülasyonun her zaman adımında her tanenin konumu, hızı, açılma hızı, vb. büyük miktarda verinin elde edilmesini sağlamak ve bu veriler uygun yazılımlar vasıtasıyla görselleştirilebilmektedir. Bu proje kapsamında, bu amaçla OVITO ve PARAVIEW yazılımları kullanılmıştır. Bu yazılımlar, ayrık elemanlar yöntemi, hesaplamalı akışkanlar dinamiği, vb. yöntemlerle gerçekleştirilen simülasyonlardan elde edilen verilerin değerlendirilmesi amacıyla kullanılabilir.

AEY ile gerçekleştirilen simülasyonlar sonucunda üretilen zamansal verilerden elek-altı ve elek-üs-

tüne giden ürünlerin tane boyu dağılımları ve konularına ait verilerin üretilebilmesi için MS Visual Studio yazılımı kullanılarak bir program kodu hazırlanmıştır. Bu program sayesinde, simülasyonda üretilen veriler kullanılarak sistemin kararlı duruma gelip gelmediği, bir tanenin alt akıma mı yoksa üst akıma mı gittiği, alt akım ve üst akımların tane boyu dağılımları ve her bir tanenin elek üzerinde kalma süresi gibi ayrıntılı bilgiler elde edilmektedir.

Elde edilen bu veriler değerlendirilirken, eleme işleminin genel verimliliği Eşitlik 1 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$E = \frac{c - f}{c(1 - f)} \quad (1)$$

Burada, beslemede bulunan kesme boyundan iri malzeme miktarını, ve üst akımda bulunan kesme boyundan iri malzeme miktarını göstermektedir.

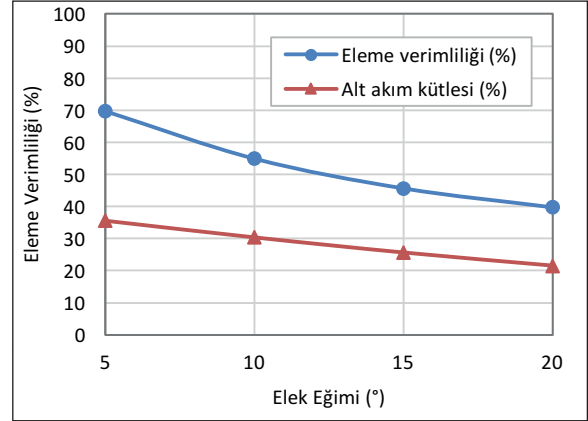
Ayrıca, fraksiyonel bazda eleme işleminin değerlendirilmesi amacıyla, her koşul için partiyon eğrileri oluşturulmuştur. Partiyon katsayısı, beslemeden üst akıma giden tanelerin yüzdesi olarak belirlenir ve partiyon eğrisi eleğin kesme boyunun yanı sıra eleme işleminin verimliliğini de göstermektedir.

Buna ek olarak, alt akıma geçen tanelerin elek yüzeyinde ortalama kalma süreleri (OKS) de hesaplanmıştır.

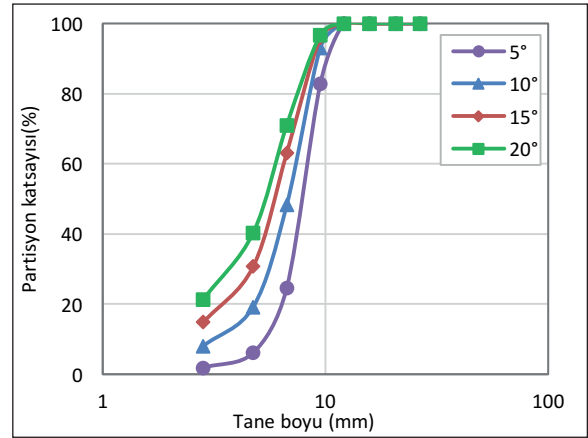
2.1. Elek Eğiminin Etkilerinin İncelenmesi

Elek eğiminin eleme performansı ve ilgili faktörlere olan etkilerini incelemek amacıyla 5°, 10°, 15° ve 20° elek eğimlerinde (Şekil 2) simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Bu simülasyonlarda, cevher özellikleri, eleme geometrisi, eleme hareketi, vb. diğer simülasyon parametreleri sabit tutulmuştur (Çizelge 1).

Şekil 2’te, elek eğimindeki değişimin, elek performansı ve alt akıma giden tanelerin yüzdesi üzerine etkileri gösterilmektedir. Ayrıca Şekil 3’te farklı elek eğimlerinde elde edilen partiyon eğrileri verilmektedir.



Şekil 2. Elek eğiminin elek verimliliği ve alt akımın kütlesi üzerine etkileri

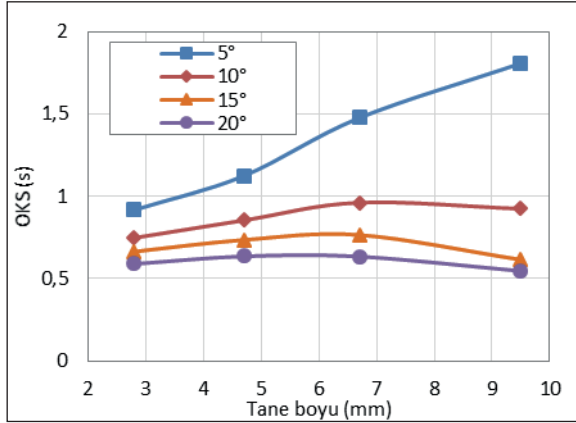


Şekil 3. Farklı elek eğimlerinde elde edilen partiyon eğrileri

Şekil 3’te görüleceği üzere, elek verimliliği ve alt akımın kütlesi elek eğiminin artışıyla azalmaktadır. Şekil 3’te verilen partiyon eğrileri incelendiğinde, eleğin kesme noktasının düşük elek eğimlerinde daha yüksek olduğu ve eleğin daha keskin bir ayırım gerçekleştirdiği görülmektedir. Buna ek olarak, elek açıklığına yakın boyutlu (9,5mm) tanelerin ayırım veriminin, elek eğimi arttıkça azalması, elek eğiminin elek açıklığına yakın boyutta olan tanelerin elenmesinde oldukça etkili olduğunu göstermektedir.

Şekil 4, elek altına geçen tanelerin farklı elek eğimindeki ortalama kalma sürelerini göstermektedir. Beklendiği gibi düşük elek eğimleri, özellikle 5° lik elek eğiminde tanelerin ortalama kalma süreleri (OKS) değerleri daha yüksektir. Bu

da alt akıma geçen tanelerin düşük elek eğimlerinin de elek yüzeyine çarpma ve elek altına geçmek için yeterli zamana sahip olmaları anlamına gelmektedir. Ayrıca elek açıklığına yakın boyutlu tanelerin yüksek OKS'ye sahip olması, bu tanelerin eleğin son kısımlarına dek elek yüzeyinde bulduklarını göstermektedir.



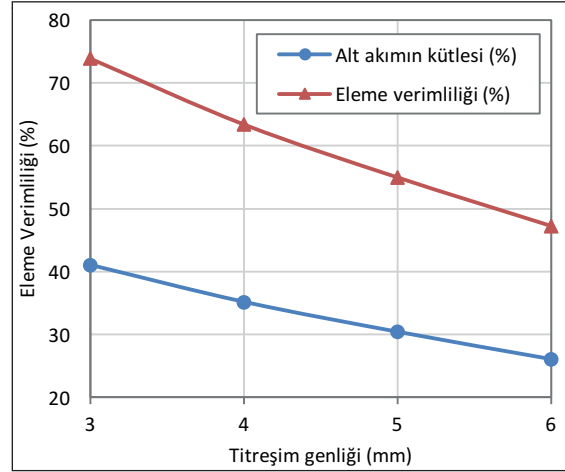
Şekil 4. Tanelerin farklı elek eğimlerinde ortalama kalma süreleri

2.2. Titreşim Genliğinin Etkilerinin

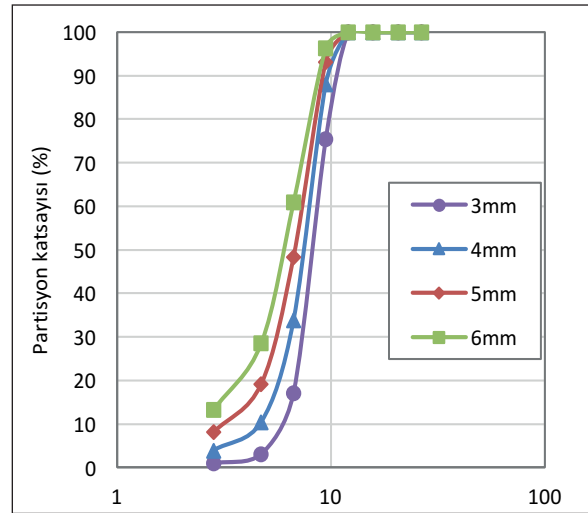
İncelenmesi

Titreşim genliğinin eleme performansı ve ilgili faktörlere olan etkilerini incelemek amacıyla 3, 4, 5 ve 6mm'lik titreşim genliklerinde simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Şekil 5'te titreşim genliğinin eleme performansı ve alt akıma giden tanelerin miktarı üzerine etkileri verilmekte ve Şekil 6'da ilgili partiyon eğrileri gösterilmektedir.

Şekil 5 ve Şekil 6'da görüleceği üzere, eleme verimliliği ve alt akımın miktarı titreşim genliğiyle azalmaktadır. Yüksek titreşim genliklerinde tanelerin elek yüzeyiyle çarpışma olasılığı düşmekte ve bu nedenle alt akıma geçmesi gereken tanelerin bir kısmı elenmeksizin elek yüzeyini terk etmekte, dolayısıyla eleme verimliliğini düşürmektedir. Partiyon eğrilerinde görüldüğü üzere kesme noktası düşük titreşim genliklerinde daha yüksektir ve daha keskin bir eleme gerçekleşmektedir. Ayrıca elek açıklığına yakın boyutlu tanelerin üst akımdaki verimi düşük titreşim genliklerinde daha düşük olmaktadır. Bu da titreşim genliğinin elek açıklığına yakın boyutlu tanelerin verimli elenmesinde oldukça önemli olduğunu

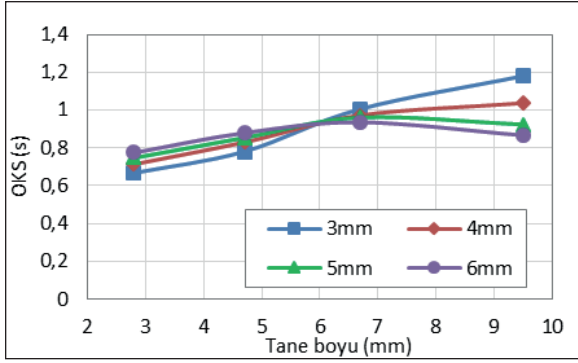


Şekil 5. Titreşim genliğinin eleme verimliliği ve alt akımın kütlesine etkileri



Şekil 6. Farklı titreşim genliklerinde elde edilen partiyon eğrileri

Şekil 7'de, tanelerin farklı titreşim genliklerinde ortalama kalma süreleri verilmektedir. Görüleceği üzere, ince tanelerin (2,8, 4,7 ve 6,7 mm) ortalama kalma süreleri arasında çok yüksek bir fark bulunmamaktadır. Ancak düşük titreşim genliğiyle elenen tanelerin ortalama kalma süresi iri tanelerde (9,5mm) daha yüksektir. Bu da titreşim genliğinin bir tasarım parametresi olarak eleklerin daha verimli çalıştırılması konusunda oldukça önemli olduğunu göstermektedir.

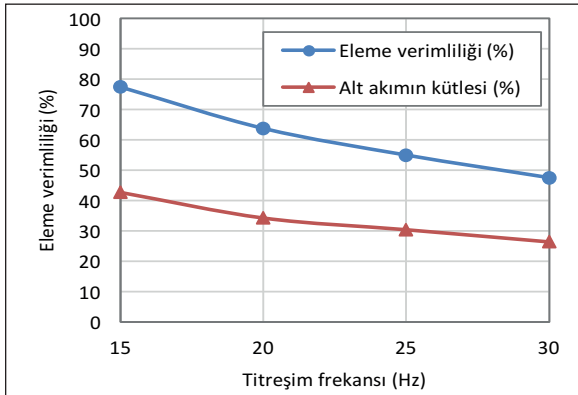


Şekil 7. Tanelerin farklı titreşim genliklerindeki ortalama kalma süreleri

2.3. Titreşim Frekansının Etkilerinin

İncelenmesi

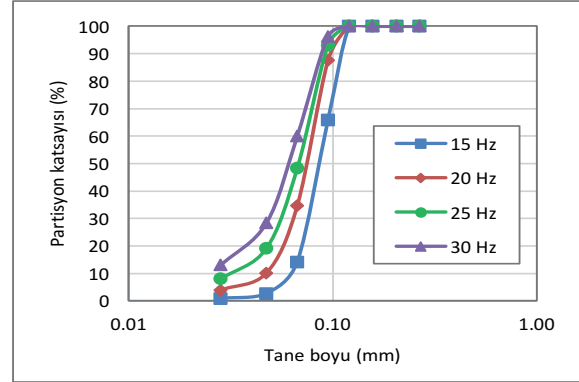
Titreşim sıklığının eleme performansı ve ilgili faktörlere olan etkilerini incelemek amacıyla 15, 20, 25 ve 30 Hz'lik titreşim sıklıklarında, diğer parametreler sabit tutularak (Çizelge 1) simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Şekil 8 eleme verimliliği ve alt akımın kütesinin titreşim frekansına bağlı olarak değişimini göstermektedir. Şekil 9'da ise farklı titreşim sıklıklarında yapılan eleme işlemlerinin partiyon eğrileri verilmektedir.



Şekil 8. Titreşim frekansının eleme verimliliği ve alt akımın kütesine etkileri

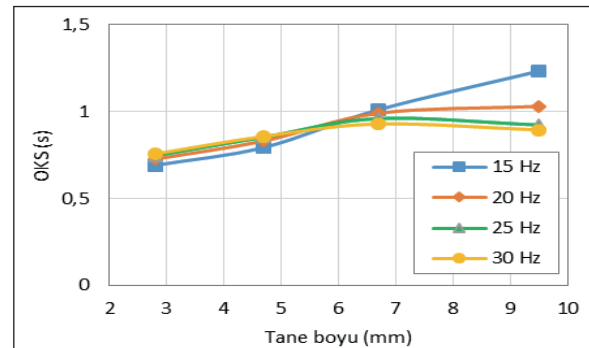
Şekil 8 ve Şekil 9'da görüleceği üzere eleme verimliliği ve alt akımın kütesi titreşim sıklığının artışıyla düşmektedir. Yüksek titreşim sıklıklarında tanelerin elek yüzeyiyle çarpışma olasılığı düşmektedir ve bu nedenle alt akıma geçmesi gereken tanelerin bir kısmı elenmeksizin elek yüzeyini terk etmektedir. Sonuç olarak eleme ve

rimliliğinde azalma ortaya çıkmaktadır. Partiyon eğrileri, kesme noktasının düşük titreşim sıklıklarında daha yüksek olduğunu ve daha keskin bir eleme işleminin gerçekleştiğini göstermektedir. Ayrıca elek altına geçmesi gereken elek açıklığına yakın boyutlu tanelerin (9,5mm), üst akımdaki verimi düşük titreşim sıklıklarında daha düşüktür. Bu da titreşim genliğinin elek açıklığına yakın boyutlu tanelerin verimli elenmesinde oldukça önemli olduğunu göstermektedir.



Şekil 9. Farklı titreşim sıklıklarında elde edilen partiyon eğrileri

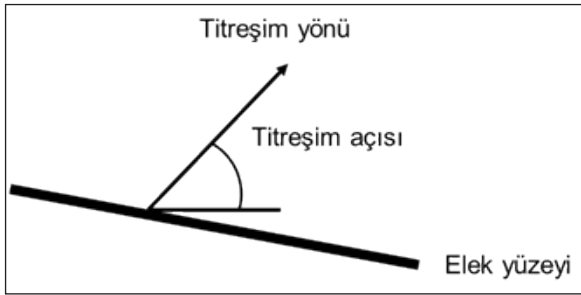
Şekil 10'de, elek açıklığından ince tanelerin farklı titreşim frekanslarında elek üzerinde ortalama kalma sürelerini göstermektedir. Görüldüğü gibi ince tanelerde (2,8, 4,7 ve 6,7 mm), tanelerin ortalama kalma süreleri arasında çok önemli bir fark bulunmamaktadır. Ancak özellikle iri tanelerde (9,5 mm), düşük titreşim sıklığında elenen tanelerin ortalama kalma süresi daha yüksektir. Bu da titreşim sıklığının bir tasarım parametresi olarak elekleri daha verimli çalıştırmak konusunda etkin olduğunu göstermektedir.



Şekil 10. Elek açıklığından ince tanelerin farklı titreşim sıklıklarında elek üzerinde ortalama kalma süreleri

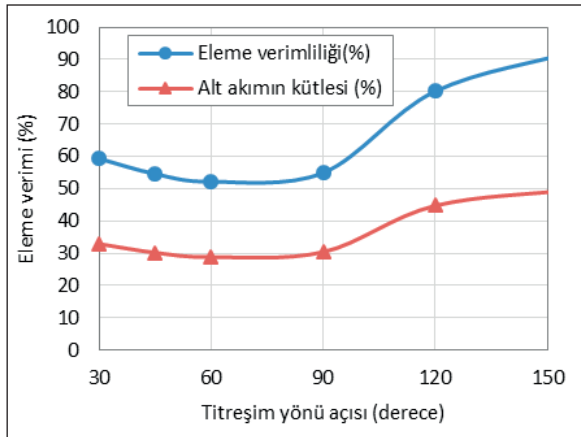
2.4. Titreşim Yönünün Etkilerinin İncelenmesi

Titreşim yönü, tanelere uygulanan kuvvetlerin yönünü ve dolayısıyla tanelerin hızını ve kalma sürelerini kontrol etmesi bakımından, titreşimli eleklerin tasarımında önemli bir parametre olarak ortaya çıkmaktadır. Titreşim yönünün eleme performansındaki etkilerinin incelenmesi amacıyla yatay eksene göre 30°, 45°, 60°, 90°, 120° ve 150° açıyla uygulanan 6 farklı titreşim yönünde simülasyonlar gerçekleştirilmiştir (Şekil 11). Bu simülasyonlarda eleğin titreşim hareketi doğrusal olarak uygulanmıştır.



Şekil 11. Titreşim yönünün şematik gösterimi

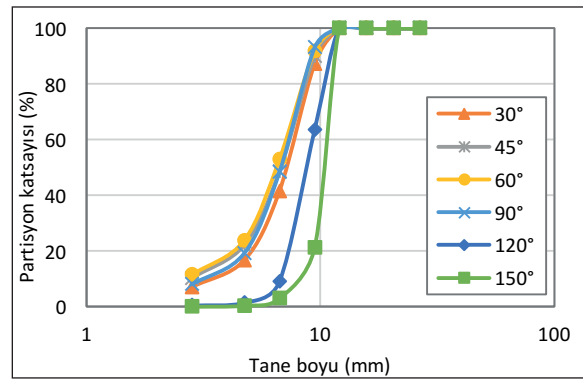
Eleme veriminin ve alt akımın kütesinin titreşim yönüne bağlı olarak değişimi Şekil 12’te verilmektedir. Şekil 13’te ise farklı titreşim yönlerinde yapılan eleme işlemlerinin partiyon eğrileri sunulmaktadır.



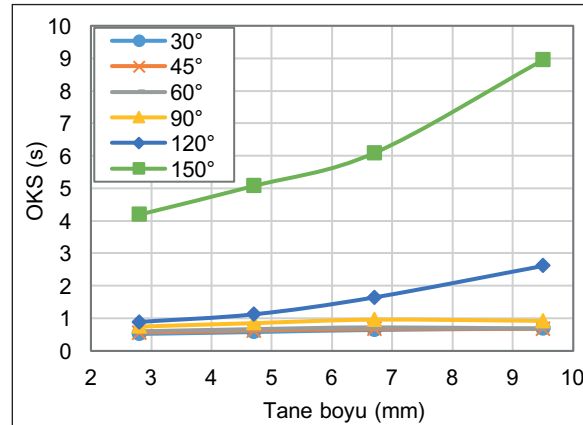
Şekil 12. Titreşim yönünün eleme verimliliği ve alt akımın kütesindeki etkileri

Görülebileceği üzere, 30° ve 90° titreşim yönü aralığında elek verimliliği, alt akımın kütesi ve kesme

noktası değerleri arasında küçük farklılıklar gözlenmekle beraber daha yüksek açılarda (120° ve 150°) bu değerlerde keskin bir artış gözlenmektedir. Yüksek titreşim açılarında, elek üzerindeki tanelere akışa ters yönde bir kuvvet etki etmekte ve taneler elek yüzeyinde daha uzun süre kalmaktadır. Elek üzerinde durma zamanının artması sonucu taneler elek yüzeyi ile daha fazla temas şansı bulmakta ve eleme verimi artmaktadır. 150°’lik açı değerinde yapılan simülasyonun partiyon eğrisi ideal eleme eğrisine yaklaşmakta ve elek açıklığına yakın boyutlu tanelerin yaklaşık %80’i elek altına geçmektedir.

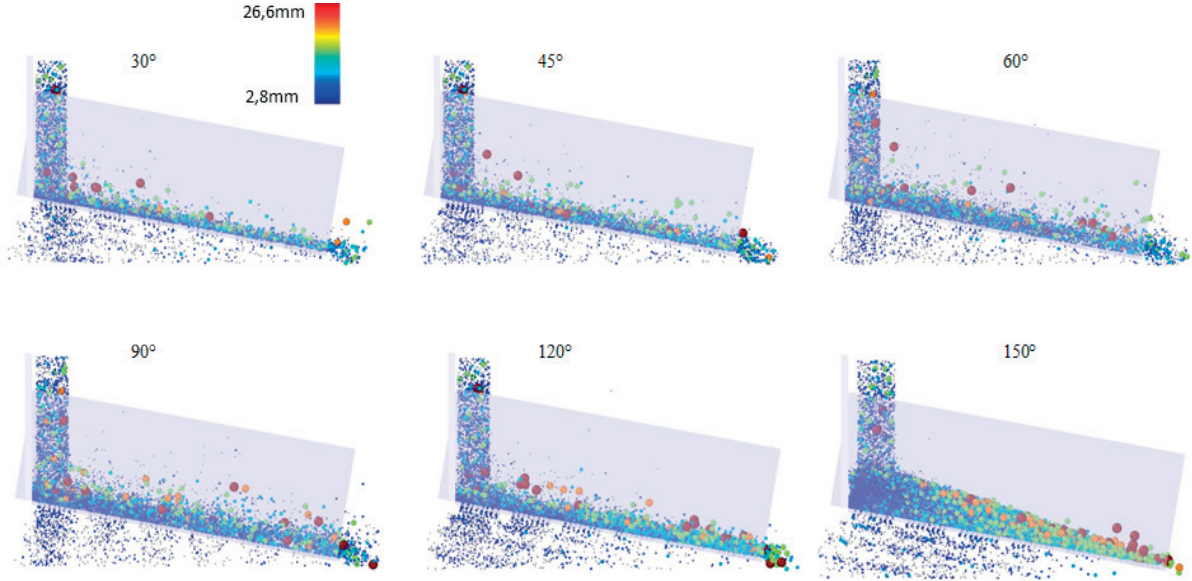


Şekil 13. Farklı titreşim yönlerinde yapılan simülasyonlardan elde edilen partiyon eğrileri



Şekil 14. Tanelerin farklı titreşim yönlerindeki ortalama kalma süreleri

Şekil 14’te elek açıklığından ince tanelerin farklı titreşim yönü değerlerinde elek üzerinde ortalama kalma süreleri verilmektedir. Görüldüğü gibi düşük açılarda (30° - 90°) birbirine yakın olan ortalama



Şekil 15. Farklı titreşim yönlerinde yapılan simülasyonlarda, sistemin dengeye ulaşmasının ardından elde edilen ekran görüntüleri

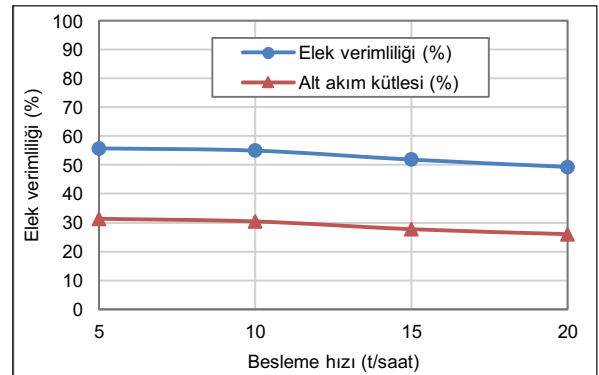
ma kalma süresi değerleri, daha yüksek açılarda (120° ve 150°) oldukça yükselmektedir. 150° açılı simülasyonda iri tanelerin yanı sıra, ince tanelerin de ortalama kalma süreleri diğer simülasyonlara kıyasla oldukça yüksektir. Uzun kalma süresi, eleme performansını artırmasına rağmen eleme kapasitesini düşürmektedir ve eleklerin tasarlanmasında bu iki parametrenin birlikte değerlendirilmesi gerekmektedir.

Şekil 15'de, farklı titreşim yönlerinde yapılan simülasyonlarda, sistemin dengeye gelmesinden sonra elde edilen ekran görüntüleri verilmektedir. Eleme verimliliği, partiyon eğrileri ve tanelerin elek yüzeyinde ortalama kalma süreleri ile uyumlu olarak yatak kalınlığı 120° ve 150° titreşim yönlerinde diğer yönlerle kıyasla daha yüksek olmaktadır. Yatak kalınlığının artışıyla taneler elek yüzeyinde daha fazla süre kalmakta ve alt akıma geçme olasılıkları artmaktadır. Her ne kadar test edilen besleme hızı değerinde, 150°'lik titreşim yönü en yüksek verimliliğe sahip olsa da, daha yüksek kapasitelerde yatak kalınlığının çok fazla artmasına paralel olarak elek veriminin azalması kaçınılmaz olacaktır. Sonuç olarak, titreşim yönünün seçiminde verimlilik ve kapasite ölçütlerinin birlikte değerlendirilmesi önem arz etmektedir.

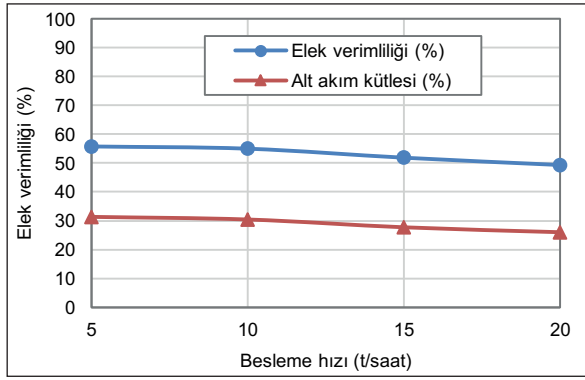
2.5. Besleme Akış Hızının Etkilerinin İncelenmesi

Besleme akış hızındaki değişim, tanelerin arasındaki etkileşimin dinamiği, yatak derinliği gibi parametreleri değiştirmesi sebebiyle eleme işleminin performansını etkilemektedir. Besleme hızının eleme performansı ve ilgili faktörlere olan etkilerini incelemek amacıyla 5, 10, 15 ve 20 ton/saat besleme hızlarında simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Cevher özellikleri, elek geometrisi, eleme hareketi ve benzeri diğer simülasyon parametreleri sabit tutulmuştur.

Şekil 16'de besleme hızının elek performansı ve alt akıma giden tanelerin miktarı üzerine etkisi verilmektedir. Ayrıca, Şekil 17'de farklı besleme hızları için oluşturulmuş partiyon eğrileri verilmektedir.



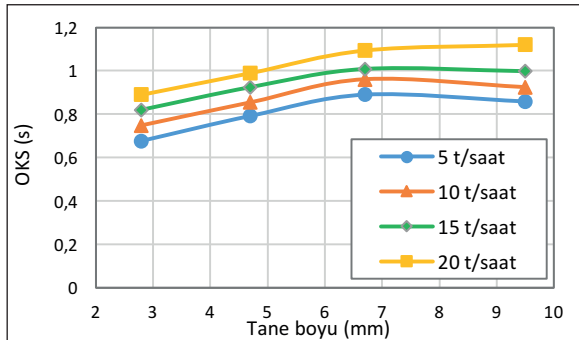
Şekil 16. Besleme hızının elek verimliliği ve alt akım kütlesi üzerine etkileri



Şekil 17. Farklı besleme hızlarında elde edilen partiyon eğrileri

Görüldüğü gibi, 5 ve 10 ton/saat'lik besleme hızlarında önemli bir farklılık gözlenmemekle beraber, daha yüksek tonajlarda elek verimliliği ve alt akımın kütlesi besleme hızının artışıyla azalmaktadır. Partiyon eğrileri incelendiğinde, besleme hızının artmasıyla, elde edilen kesme boyunun azaldığı görülmektedir.

Alt akıma geçen tanelerin ortalama kalma süresinin (OKS) incelenmesi, OKS'nin besleme hızıyla artışını göstermektedir (Şekil 18). Beklendiği üzere, besleme akış hızının artmasına paralel olarak, tanelerin elek yüzeyine çarpma ve elek-altına geçme olasılığı azalmaktadır. Ayrıca, OKS'nin tane boyu irileştikçe arttığı görülmektedir.



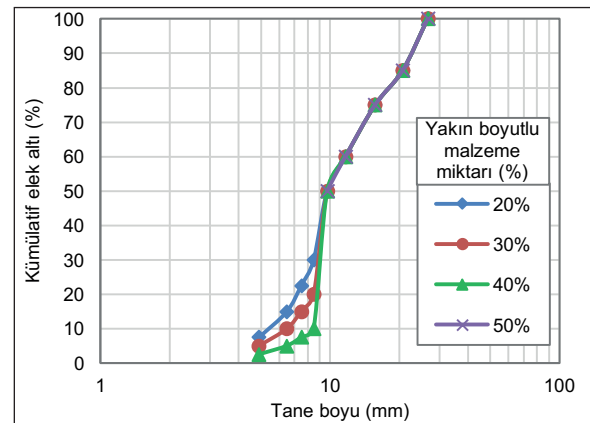
Şekil 18. Tanelerin farklı besleme hızlarında elek üzerinde ortalama kalma süreleri

2.6. Besleme Tane Boyu Dağılımının Etkilerinin İncelenmesi

Önemli işletme parametrelerinden biri olan besleme tane boyu dağılımı eleme performansında etkin bir role sahiptir. Özellikle, elek açıklığına yakın boylara sahip olan tanelerin (near-mesh) miktarının, eleme işleminin verimliliğini önemli

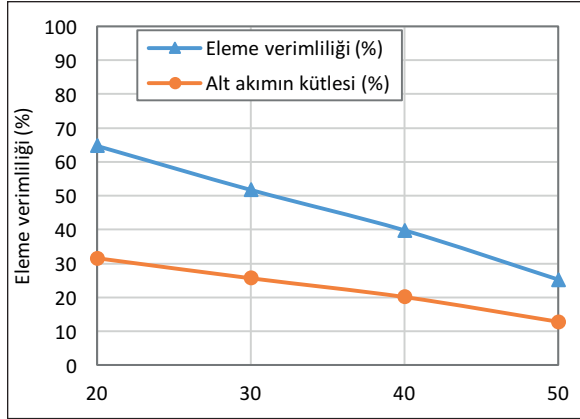
ölçüde etkilediği bilinmektedir. Bu parametrenin etkilerini sayısal olarak araştırmak amacıyla besleme tonajı, besleme fiziksel özellikleri, titreşim özellikleri, yüzey eğimi ve yüzey boyutları gibi tasarım ve işlem değişkenleri sabit tutularak (Çizelge 1), besleme tane boyu dağılımının etkilerinin incelenmesi amacıyla farklı besleme tane boylarına sahip malzemeler için simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Simülasyonlar sırasında kullanılan tane boyu dağılımları, elek altına geçmesi gereken fraksiyonların dağılımları farklı olacak şekilde belirlenmiştir. Bu sayede özellikle, elek açıklığına yakın malzeme miktarlarının eleme işlem verimine etkileri incelenmiştir (Çizelge 3).

Çizelge 3'te belirlenen tane boyu dağılımlarına sahip 4 farklı besleme ile simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Besleme tane boyu dağılımlarında elek açıklığına yakın boya sahip olan tanelerin (9,7 mm) etkisini belirgin olarak incelemek amacıyla, bu tanelerin beslemedeki miktarı sırayla %50, 40, 30 ve 20 olarak varsayılmış ve +9,7 mm'lik tanelerin yüzdesi sabit tutulmuştur. Şekil 19'de hipotetik beslemelerin tane boyu dağılımları verilmektedir.



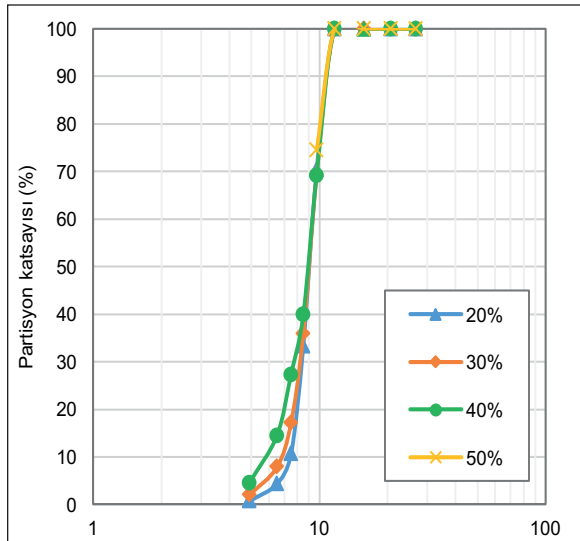
Şekil 19. Farklı yakın boyutlu malzeme içeren beslemelerin tane boyu dağılımları

Simülasyon sonuçlarına göre eleme verimliliği ve alt akımın kütlesi elek açıklığına yakın boya sahip olan tanelerin beslemedeki miktarının artışıyla ciddi bir şekilde azalmaktadır (Şekil 20). Bu tanelerin beslemedeki miktarı arttığı zaman elek gözlerini tıkayarak diğer ince tanelerin de gözlerden geçmesini engellemektedir.



Şekil 20. Farklı yakın boyutlu malzeme içeren beslemelerin eleme verimlilikleri ve alt akım kütleleri

Partisyon eğrileri dikkate alındığında (Şekil 21), elek açıklığına yakın boyutlu tanelerin miktarı arttıkça eğrilerin eğiminin azaldığı, dolayısıyla eleme etkinliğinin azaldığı görülmektedir. Eğriler arasındaki farklılık özellikle ince tane boylarında (4,90, 6,48, 7,48 ve 8,49 mm) ortaya çıkmaktadır. Bu da elek açıklığına yakın boyutlu tanelerin miktarının, ince tanelerin elenmesine de etki ettiğini göstermektedir.

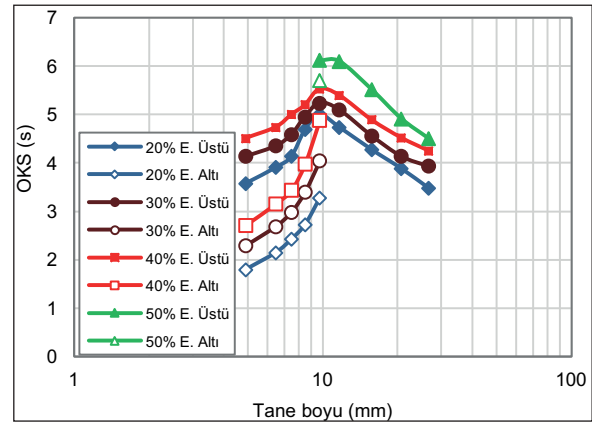


Şekil 21. Farklı miktarda yakın boyutlu malzeme içeren beslemeler için partisyon eğrileri

Farklı elek açıklığına yakın boyutlu taneler içeren beslemelerle yapılan simülasyonlarda, alt ve üst akımlara giden tanelerin, elek yüzeyinde ortalama kalma süreleri Şekil 22’te verilmektedir. Üst

akıma giden tanelerde, elek açıklığına yakın boya sahip olan tanelerin miktarı arttıkça bütün boylardaki tanelerin elek yüzeyinde ortalama kalma süreleri artmaktadır. Ortalama kalma sürelerinin artışı ise elek tonajı ve performansını olumsuz olarak etkilemektedir.

Benzer şekilde, elek açıklığına yakın boya sahip olan tanelerin miktarı arttıkça alt akıma giden tanelerde de ortalama kalma süreleri artış göstermektedir. Elek açıklığına yakın boya sahip tanelerin miktarı arttıkça, elek altına geçmesi gereken taneler, elek altına geçmek için elek yüzeyinde daha uzun süre harcamaktadır. Bu durum, bu koşullarda eleme işleminin zorlaştığını ve ayırım etkinliğinin azaldığını ortaya koymaktadır.

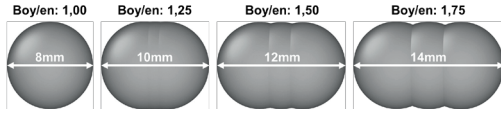


Şekil 22. Farklı oranlarda yakın boyutlu malzeme içeren beslemelerde alt ve üst akıma giden tanelerin elek yüzeyinde ortalama kalma süreleri

2.7. Tane Şeklinin Etkilerinin İncelenmesi

Eleme işleminde, beslemeyi oluşturan tanelerin şeklinin eleme verimi üzerinde etkili olduğu bilinmektedir. Tanelerin şeklinin eleme performansındaki etkilerinin incelenmesi amacıyla, 10mm açıklığa sahip olan elekten elenmek üzere, dört farklı tane şekli tasarlanmıştır. Birinci tane 8mm çapına sahip bir küre ve ikinci tane 3 adet 8mm çaplı küreden oluşturulmuştur. Aynı yönde dizilen bu kürelerin merkezlerinin arasındaki mesafe 1mm olduğunda, elde edilen eliptik şeklin büyük çapı 10mm ve küçük çapı 8mm olmaktadır (Şekil 23). Aynı yaklaşımla oluşturulan üçüncü ve dördüncü tanelerde de kürelerin arasındaki mesafe sırasıyla 2 ve 3mm olarak belirlenmiştir. Bu sayede, elek çapı (sieve diameter) 8mm olan, ancak fark-

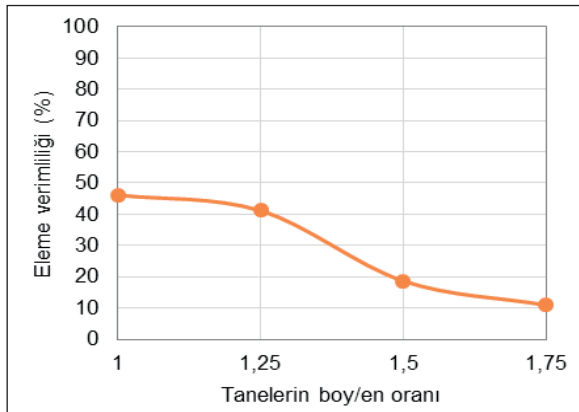
lı boy/en oranlarına sahip taneler elde edilmiştir. Elde edilen tanelerin boy/en oranları sırasıyla 1,0, 1,25, 1,5 ve 1,75 olmaktadır. Şekil faktörleri farklı olmasına rağmen elek çapı 8mm olan bu tanelerin, 10mm'lik elekte elenmesinde ortaya çıkacak sonuçlar AEY simülasyonlarıyla incelenmiştir.



Şekil 23. Farklı boy/en oranlarına sahip tane şekilleri

Tane şeklinin eleme performansındaki etkilerini araştırmak amacıyla gerçekleştirilen simülasyonlarda besleme tonajı, besleme tane boyu dağılımı, tanelerin fiziksel özellikleri, elek yüzeyi eğimi ve titreşim özellikleri gibi değişkenler sabit tutulmuştur (Çizelge 1).

Simülasyon sonuçlarına göre, tanelerin boy/en oranları arttıkça eleme verimliliği düşmektedir (Şekil 24). Boy/en oranı 1,0'den 1,25'e arttığında elek verimliliği yaklaşık %5 azalarak %46,17'den %41,16'ya düşerken, boy/en oranı 1,25'ten 1,5'e arttığında elek verimliliği sert bir düşüşle %18,66'ya gerilemektedir. Boy/en oranının 1,75'e olan çıkması durumunda ise eleme verimliliği %10,94'e düşmektedir (Şekil 24).

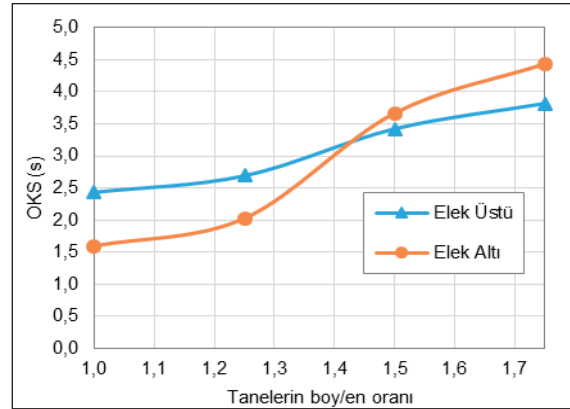


Şekil 24. Farklı boy/en oranlarına sahip olan tanelerin yapılan simülasyonların eleme verimlilikleri

Farklı yönlendirmelerde elek açıklığından geçme ihtimali eşit olan küresel tanelerin aksine, eliptik taneler sadece küçük boyları (elek çapları) yönünde elek açıklığından geçme ihtimaline sahiptir. Bu

yüzden boy/en oranının artışıyla tanelerin alt akıma geçme ihtimali ve dolayısıyla elek verimliliği düşmektedir.

Şekil 25, alt ve üst akımlara giden tanelerin elek yüzeyinde ortalama kalma sürelerini göstermektedir. Boy/en oranının artışıyla alt akıma geçen tanelerin elek yüzeyinde ortalama kalma süreleri artmaktadır. Küresel taneler (boy/en=1) kısa bir sürede elek altına geçerken eliptik taneler (boy/en>1) elek altına geçmek için elek yüzeyinde daha fazla zaman geçirmektedir. Boy/en oranının artışıyla artan ortalama kalma süresi verimlilik düşüğüyle benzer davranışlar göstermektedir. Boy/en oranı 1,0'den 1,25'e çıktığında OKS görece düşük bir artışla 1,6 s'den 2,03 s'ye artarken, boy/en oranı 1,25'ten 1,5'e çıktığında OKS sert bir artışla 3,67 s'ye çıkmaktadır. Boy/en oranının 1,75 olduğu tanelerde ise ortalama kalma süresi 4,44 s'ye çıkmaktadır. Bu benzerlik elek verimliliği ve ortalama kalma süresinin arasındaki ters orantıyı ortaya koymaktadır.



Şekil 25. Farklı boy/en oranlarına sahip beslemeden alt ve üst akıma giden tanelerin elek yüzeyinde ortalama kalma süreleri

SONUÇLAR

Bu çalışma kapsamında sayısal bir modelleme ve simülasyon yöntemi olan ayrık elemanlar yöntemi (AEY) ile endüstriyel eleme işleminin modellemesi amacıyla simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Elek yüzeyinin eğimi, titreşim genliği, titreşim frekansı (sıklığı), titreşim yönü gibi tasarım değişkenlerinin yanı sıra, besleme akış hızı, besleme tane boyu dağılımı, tane şekli gibi işlem değişkenlerinin eleme performansındaki etkilerinin incelenmesi

amacıyla her biri en az 2-3 gün süren (bazı koşullarda 1 haftayı bulan) 40'ı aşkın simülasyon gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışmalarda elde edilen bulgular aşağıda özetlenmektedir.

- Elek yüzeyinin eğiminin artışıyla eleme verimliliği ve alt akımın kütlesi azalmakta ve eleğin kesme boyu azalmaktadır. Daha düşük elek yüzeyi eğimlerinde elek açıklığına yakın boyutlu tanelerin daha verimli elendiği gözlemlenmiştir. Elek yüzeyinin eğimi ve eleme kapasitesinin arasında ters orantı olduğu düşünüldüğünde, belirli bir eleme verimi hedefi için optimum eğimin belirlenmesi mümkün olmaktadır.

- Titreşim genliğinin artması sonucunda, tanelerin elek yüzeyine temas etme olasılığı azalmakta ve eleme verimliliği, alt akımın kütlesi ve eleğin kesme boyu düşmektedir. Eleme verimliliğinde çok önemli olan bir nokta olan elek açıklığına yakın boyutlu tanelerin eleme verimi, titreşim genliğinin azalmasıyla artmaktadır. Diğer taraftan, belirli bir eleme verimi hedefi için, titreşim genliğinin düşük olması durumunda besleme akış hızının da düşük tutulması gerekmektedir. Dolayısıyla istenilen hedefe en uygun titreşim genliği belirlenebilmektedir.

- Titreşim frekansının artışıyla taneler ve elek yüzeyinin çarpışma olasılığının düşmesiyle birlikte eleme verimliliği, alt akımın kütlesi ve eleğin kesme boyu düşmektedir. Eleme verimliliğinde çok önemli olan elek açıklığına yakın boyutlu tanelerin eleme verimi, titreşim frekansının düşüşüyle artmaktadır.

- Titreşim eğiminin 30° ve 90° arasındaki değişimi eleme verimliliğini önemli bir ölçüde etkilemekle beraber, 120° ve 150° titreşim eğimlerinde eleme verimliliği, alt akımın kütlesi ve eleme kesme boyu belirgin oranda artmaktadır. Titreşim yönü açısının artışıyla tanelerin elek yüzeyinde kalma süreleri artmaktadır.

- Çok düşük besleme akış hızlarında elek yüzeyinde malzeme yatağı oluşmaması sebebiyle eleme verimliliği çok düşük olmaktadır. Ancak besleme hızının artışıyla eleme verimliliği, alt akım kütlesi ve eleme kesme boyu artarak bir tepe noktasına ulaşmaktadır. Diğer taraftan, aşırı yüksek besleme akış hızlarında tanelerin elek yüzeyinde yığılmasıyla birlikte malzeme yatağının derinliği artarak elenmesi gereken tanelerin elek

açıklıklarına ulaşma ihtimali azalmakta ve elek verimliliği düşmektedir.

- Elek açıklığına yakın boyutlu tanelerin beslemedeki oranlarının eleme verimi üzerine etkisi incelendiğinde, yakın boyutlu tanelerin beslemedeki miktarının artmasıyla eleme verimliliği ve alt akım kütesinin azaldığı görülmektedir. Ancak eleme kesme boyunda belirgin bir farklılık gözlemlenmemektedir. Bu tanelerin beslemedeki miktarı arttıkça alt akım ve üst akıma giden tanelerin elek yüzeyinde ortalama kalma süreleri de artmaktadır. Dolayısıyla belirli bir verim hedefi için, beslemedeki elek açıklığına yakın boyutlu tanelerin oranının artması durumunda besleme hızının düşürülmesi kaçınılmaz olmaktadır.

- Çeşitli boy/en oranlarına sahip tanelerle yapılan simülasyon sonuçlarına göre, tanelerin boy/en oranının artmasıyla eleme verimliliği ve alt akım kütlesi azalmaktadır. Ayrıca yüksek boy/en oranına sahip tanelerle yapılan eleme işlemlerinde eleme kapasitesi düşmektedir.

Yapılan çalışmalar, AEY yaklaşımının eleme işleminin modellenmesinde yüksek tahmin gücüne sahip olduğunu göstermektedir. Özellikle, cevherleri oluşturan şekilsiz tanelerin küresel kabul edilmesi durumunda tahmin gücü azalmaktadır. Küresel olmayan tanelerin (küre-kümelere) kullanılması durumunda gerçeğe çok yakın sonuçlar elde edilebilmektedir (Orhan, 2019). Küre-kümelere yaklaşımının, cevheri oluşturan tanelerin şekilsizliğini birebir ifade etmekte yetersiz kalması ve bu yaklaşımda köşeli tanelerin oluşturulamaması, gerçek veriler ve simülasyon sonuçları arasında kalan düşük miktardaki farkın, en önemli etkeni olarak ortaya çıkmaktadır.

AEY'in toplam verim, partiyon eğrileri ve ürünlerin tane boyu dağılımlarını yüksek doğrulukla sağlayabilmesinin yanı sıra, herhangi bir tane veya tane boyu fraksiyonunun durma zamanının belirlenmesi, eleğin herhangi bir bölgesindeki yükün belirlenmesi amacıyla tanelerin izlenebilmesi, yatak malzemesinin ve tabakalanmanın incelenmesi, vb. pek çok değişkenin sayısal olarak belirlenmesini sağlamaktadır. Bu çalışma kapsamında geliştirilmiş olan model yapısının, tesis tasarımı, elek tasarımı, optimizasyonu ve performanslarının değerlendirilmesi çalışmalarında kullanılacak, yüksek tahmin gücü sağlayan bir araç olduğu ortaya konmaktadır.

TEŞEKKÜR

Yazarlar, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu'na (TUBİTAK), "Endüstriyel Elemenin Sayısal Modellemesi" (215M368) başlıklı projeye desteğinden dolayı teşekkür eder.

KAYNAKLAR

Aghlmandi Harzanagh, A., Orhan, E. C., Ergün, S. L., 2018. Discrete Element Modeling of Vibrating Screens. *Miner. Eng.*, 121, 107-21.

Alkhalidi, H., Eberhard, P., 2007. Particle Screening Phenomena in an Oblique Multi-Level Tumbling Reservoir: A Numerical Study using Discrete Element Simulation. *Granul. Matter*, 9, 415-429.

Chen, Y.H., Tong, X., 2009. Application of the DEM to Screening Process: A 3D Simulation. *Min. Sci. Technol.*, 19, 493-497.

Chen, Y.-S., Hsiao, S.-S., Lee, H.-Y., Chyou, Y.-P., Hsu, C.-J., 2010. Size Separation of Particulates in a Trommel Screen System. *Chem. Eng. Process. Process Intensif.*, 49, 1214-1221.

Cleary, P.W., 2004. Large Scale Industrial DEM Modeling. *Eng. Comput.*, 21, 169-204.

Cleary, P.W., Sinnott, M.D., Morrison, R.D., 2009a. Separation Performance of Double Deck Banana Screens - Part 1: Flow and Separation for Different Accelerations. *Miner. Eng.*, 22, 1218-1229.

Cleary, P.W., Sinnott, M.D., Morrison, R.D., 2009b. Separation Performance of Double Deck Banana Screens - Part 2: Quantitative Predictions. *Miner. Eng.* 22, 1230-1244.

Delaney, G.W., Cleary, P.W., Hilden, M., Morrison, R.D., 2012. Testing the Validity of the Spherical DEM Model in Simulating Real Granular Screening Processes. *Chem. Eng. Sci.*, 68, 215-226.

Dong, H., Liu, C., Zhao, Y., Zhao, L., 2013. Influence of Vibration Mode on the Screening Process. *Int. J. Min. Sci. Technol.*, 23, 95-98.

Dong, K., Esfandiary, A.H., Yu, A.B., 2016. Discrete Particle Simulation of Particle Flow and Separation on a Vibrating Screen: Effect Of Aperture Shape. *Powder Technology*, 317, 195-202.

Dong, K.J., Yu, A.B., 2012. Numerical Simulation of the Particle Flow and Sieving Behaviour on Sieve Bend/Low Head Screen Combination. *Miner. Eng.*, 31, 2-9.

Dong, K.J., Yu, A.B., Brake, I., 2009. DEM Simulation of Particle Flow on a Multi-Deck Banana Screen. *Miner. Eng.*, 22, 910-920.

Fernandez, J.W., Cleary, P.W., Sinnott, M.D., Morrison, R.D., 2011. Using SPH One-Way Coupled to DEM to Model Wet Industrial Banana Screens. *Miner. Eng.*, 24, 741-753.

Hilden, M.M., 2007. A Dimensional Analysis Approach to the Scale-Up and Modelling of Industrial Screens. PhD Thesis, University of Queensland.

Jafari, A., Saljooghi Nezhad, V., 2016. Employing DEM to Study the Impact of Different Parameters on the Screening Efficiency and Mesh Wear. *Powder Technol.*, 297, 126-143.

Jahani, M., Farzanegan, A., Noaparast, M., 2015. Investigation of Screening Performance of Banana Screens Using LIGGGHTS DEM Solver. *Powder Technol.*, 283, 32-47.

Krugger-Emden, H., Elskamp, F., 2014. Modeling of Screening Processes with the Discrete Element Method Involving Non-Spherical Particles. *Chem. Eng. Technol.*, 37, 847-856.

Li, J., Webb, C., Pandiella, S.S., Campbell, G.M., 2003. Discrete Particle Motion on Sieves - A Numerical Study using the DEM Simulation. *Powder Technol.*, 133, 190-202.

Liu, C., Wang, H., Zhao, Y., Zhao, L., Dong, H., 2013. DEM Simulation of Particle Flow on a Single Deck Banana Screen. *Int. J. Min. Sci. Technol.*, 23, 273-277.

Orhan, E.C., Aghlmandi Harzanagh, A., Ergün, L., 2019. Endüstriyel Elemenin Sayısal Modellemesi (1. Bölüm): AEY Modelinin Geliştirilmesi ve Sınanması. *Bilimsel Madencilik Dergisi*, 58 (1), 17-30.

Shimosaka, A., Higashihara, S., Hidaka, J., 2000. Estimation of the Sieving Rate of Powders using Computer Simulation. *Adv. Powder Technol.*, 11, 487-502.

Tung, K.L., Chang, T.H., Lin, Y.-F., Chyang, C.-S., 2011. DEM Simulation of a 3D Vertical Vibratory Screening Process: The Study of a Simulated Woven-Mesh Structure. *AIChE J.*, 57, 918-928.

Xiao, J., Tong, X., 2012. Particle Stratification and Penetration of a Linear Vibrating Screen by the Discrete Element Method. *Int. J. Min. Sci. Technol.*, 22, 357-362.

Xiao, J., Tong, X., 2013. Characteristics and Efficiency of a New Vibrating Screen with a Swing Trace. *Particology*, 11, 601-606.

Yin, Z., Zhang, H., Han, T., 2016. Simulation of Particle Flow on an Elliptical Vibrating Screen Using the Discrete Element Method. *Powder Technol.*, 302, 443-454.

Zhao, L., Zhao, Y., Liu, C., Li, J., Dong, H., 2011. Simulation of the Screening Process on a Circularly Vibrating Screen Using 3D-DEM. *Min. Sci. Technol.*, 21, 677-680.