

**SİMÜLASYON YARDIMIYLA ENDÜSTRİYEL ELEME
İŞLEMİNİ ETKİLEYEN PARAMETRELERİN İNCELENMESİ**

**SIMULATION AIDED INVESTIGATIONS ON THE
PARAMETERS AFFECTING INDUSTRIAL SCREENING**

AHAD AGHLMANDI HARZANAGH

PROF. DR. Ş. LEVENT ERGÜN

Tez Danışmanı

Dr.E. CANER ORHAN

Eş Danışman

Hacettepe Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin
Maden Mühendisliği Anabilim Dalı İçin Öngördüğü

DOKTORA TEZİ

Olarak Hazırlanmıştır.

2020

Sevgili Eşim'e

ÖZET

SİMÜLASYON YARDIMIYLA ENDÜSTRİYEL ELEME İŞLEMİNİ ETKİLEYEN PARAMETRELERİN İNCELENMESİ

Ahad Aghlmandi Harzanagh

Doktora, Maden Mühendisliği Bölümü

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Ş. Levent ERGÜN

Eş Danışmanı: Dr. E. Caner ORHAN

Ağustos 2020, 112 Sayfa

Eleme işlemi cevher hazırlama tesislerinde en yaygın kullanılan birim işlemlerden biridir. Eleklerin en yaygın kullanım yeri olan kırma devrelerinde, eleklerin doğru seçilmesi ve boyutlandırılması, optimizasyonu ve mümkün olan en yüksek verim değerlerinde çalışması, gerek kırma devresinin gerekse tüm tesisin verimliliği ve karlılığı açısından önem arz etmektedir.

Eleklerin seçimi, boyutlandırılması ve doğru çalışma aralıklarının belirlenmesi amacıyla kullanılan çeşitli yaklaşımlar ve modeller bulunmaktadır. Bu doğrultuda kullanılan elek modelleri çoğunlukla ampirik ve/veya yarı ampirik eşitliklerden oluşmaktadır. Ancak bu modellerin başarılı bir şekilde kullanımı, farklı tesislerden elde edilmiş büyük miktarda endüstriyel veriden oluşan bir veri tabanına ve kapsamlı tecrübeye dayanmaktadır. Bu eşitlikler kullanılırken yapılan hesaplamalar ve varsayımlar sırasında hata payının büyük olması durumunda, boyutlandırılan eleklerin kullanılacağı tesiste kapasite ve/veya verimlilik sorunlarının ortaya çıkması kaçınılmaz olmaktadır.

Taneli malzemelerin hareketinin modellenmesi ve simülasyonu amacıyla Ayrık Elemanlar Yöntemi'nin (AEY) cevher hazırlama alanında kullanımı özellikle 1990'lı

yıllardan itibaren yaygınlaşmaya başlamıştır. Pek çok birim işlemin (öğütme, stoklama, malzeme taşıma, manyetik ayırma vb.) modellenmesinde başarıyla kullanılan AEY, çeşitli tasarım ve işlem değişkenlerinin etkilerini sayısal olarak belirlenmesi ve işlemlerin optimize edilmesi çalışmalarında önemli katkılar sağlamaktadır. Bununla beraber, ülkemizde bu yöntemin kullanıldığı az sayıda çalışmaya rastlanmaktadır.

Bu tez kapsamında, AEY kullanılarak eleme işlemi modellenmiştir. Bu sayede, çeşitli işlem ve tasarım değişkenlerinin eleme verimi ve elde edilen ürünlerin özellikleri üzerine etkileri incelenmiştir. Aynı zamanda, pilot ölçekli bir endüstriyel elek ile eleme testleri gerçekleştirilerek, simülasyonlardan elde edilen veriler ile aynı koşullarda pilot ölçekli testlerden elde edilen verilerin karşılaştırılması sayesinde simülatörün tahmin gücü sınanmıştır. Elde edilen sonuçlar, simülasyon sonuçlarının pilot ölçekli test sonuçları ile oldukça yüksek uyum sergilediğini göstermektedir.

Sonuç olarak, ekipman seçimi ve boyutlandırılması, tasarımı, eleme veriminin değerlendirilmesi ve optimizasyonu gibi çalışmalarda kullanılabilecek bir mühendislik aracı elde edilmiştir. Ayrıca bu tez, AEY konusunda ülkemizde yapılan az sayıdaki çalışmadan birisi olması sebebiyle, bu konuda yapılacak daha sonraki çalışmalara da ışık tutacaktır.

Anahtar Kelimeler: Eleme, Ayrık Elemanlar Yöntemi, Modelleme, Simülasyon, Verimlilik

ABSTRACT

SIMULATION AIDED INVESTIGATIONS ON THE PARAMETERS AFFECTING INDUSTRIAL SCREENING

Ahad Aghlmandi Harzanagh

Doctor of Philosophy, Department of Mining Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Ş. Levent ERGÜN

Co-Supervisor: Dr. E. Caner ORHAN

August 2020, 112 Pages

Screening is one of the most widely used unit operations in mineral processing plants. In crushing circuits which is the most frequent area of use of screens, the proper selection and sizing, optimization and their operation as efficient as possible is essential in terms of the performance and profitability of the crushing circuit and the whole plant.

There are various approaches and models used for the selection, sizing and proper operating ranges of screens. The screen models that are used in this context are mainly composed of empirical or semi empirical equations. However, the successful use of these models relies on a database of substantial amount of data obtained at various plants and extensive experience. In case of a high margin of error during calculations and assumptions while using these equations, the rise of capacity and/or efficiency issues becomes inevitable.

The use of Discrete Element Modelling (DEM) for the modelling and simulation of particulate material in the area of mineral processing started to widespread since 1990s. DEM, which has been successfully used in modelling of many unit operations (grinding, storage, material handling, magnetic separation, etc.), provides significant contributions to the studies for the quantification of the effects of various design and operating conditions and optimization of operations. Nevertheless, in Turkey, only a small number of studies are encountered where this method is utilized.

In this thesis, screening operation is modelled using DEM. By this means, the effects of various design and operating variables on the screening efficiency and on the product characteristics were investigated. Additionally, by conducting screening tests with a pilot scale industrial screen, the predicting capability of the simulator was verified by comparing the data obtained from the simulations with the pilot scale tests at the same conditions. The results show that the simulation results present very good agreement with the pilot-scale test results.

As a result, an engineering tool is obtained that could be used in studies such as equipment selection, sizing, design and the evaluation and optimization of screen efficiency. Additionally, as this thesis is one of the very few studies on DEM in Turkey, it will be enlightening for the future studies on this subject.

Key words: Screening, Discrete Element Method, Modeling, Simulation, Efficiency

TEŞEKKÜR

Hayatımın her aşamasında sevgileri ve destekleriyle yanımda olan hiçbir teşekkürün yetmeyeceği sevgili babam Akbar AGHLMANDI HARZANAGH ve annem Roghayyeh Frutan'a

Doktora ve yüksek lisans öğrenim hayatım boyunca ve bu tez çalışmalarımın her aşamasında çok değerli sabırları, özverileri ve değer biçilemeyecek klavuzluklarıyla yolumu aydınlatan, tekrar hiçbir teşekkürün yetmeyeceğini düşündüğüm danışman hocalarım Prof. Dr. Ş. Levent ERGÜN ve Dr. E. Caner ORHAN'a

Tez süresince değerli katkıları ve önerileriyle yol gösteren Tez izleme komitesi hocalarım Prof. Dr. N. Emre Altun ve Doç. Dr. Metin Can'a, Ayrıca yanlarında çalışmamın çok büyük şans olduğunu düşündüğüm Prof. Dr. Zafir EKMEKÇİ, Doç. Dr. İlkay B. CAN, Dr. Öğr. Üyesi Özlem BIÇAK'a

Başta sevgili Dr. Özgür ÖZCAN olmak üzere bu zaman süresince desteklerini hiç esirgemeyen Dr. Öğr. Üyesi Ergin GÜLCAN, Dr. Damla İZERDEM, Yük. Müh. İlhan EHSANİ, Dr. N. Alper TOPRAK, Dr. Süleyman Yasin KILLIOĞLU'ya

Tezin dneysel çalışmalarında katkılarından dolayı sevgili Yüksek Müh. Ertuna Çakır, Müh. Cem Sarıkaya ve Müh. Taylan Berkkam'a

Sevgili oda arkadaşlarım Masoud ROSTAMI, Seda ÖZÇELİK, Büşra SOFU, Ecem ve Erdem KARAHAN, Sarp ZİNCİRCİ, Tahsin Onur DİZDAR, Gizem KOCAUSTA, Büşra ÖZSOY, Behnaz DİBAVAR, Emre YILDIZ'a

"Endüstriyel Elemenin Sayısal Modellemesi" (215M368) Başlıklı projeye desteklerinden dolayı Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK)'a

Son olarak bütün bölüm personeline sağladıkları her türlü yardım ve güzel ortam için,

En içten duygularım ve minnertarığım ile teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	iii
TEŞEKKÜR.....	v
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELER.....	ix
ŞEKİLLER.....	x
1 GİRİŞ	1
2 LİTERATÜR ÖZETİ	3
2.1 ELEKLERİN MODELLEMESİ	3
2.1.1 KONVANSİYONEL MODELLER	3
2.1.2 SAYISAL MODELLER.....	6
2.2 AYRIK ELEMANLAR YÖNTEMİ (AEY)	7
2.2.1 AEY Model Yapısı	8
2.2.2 AEY Yazılımları	10
2.2.3 Açık Kaynak Kodlu AEY Yazılımlarının Avantajları.....	10
2.2.4 LIGGGHTS.....	10
2.3 ELEKLERİN MODELLEMESİNDEKİ AEY UYGULAMALARI	13
3 YÖNTEM.....	15
3.1 AYRIK ELEMANLAR YÖNTEMİ MODEL YAPISININ GELİŞTİRİLMESİ... ..	15
3.2 3-BOYUTLU ELEK MODELLERİNİN HAZIRLANMASI	19
3.3 SİMÜLASYON KOŞULLARI VE PARAMETRELERİN BELİRLENMESİ....	21
3.4 SİMÜLASYONLARDA KULLANILAN TANELERİN ŞEKLİ	25
4 SİMÜLASYON SONUÇLARI VE VERİLERİN DEĞERLENDİRİLMESİ	28
4.1 ELEK EĞİMİNİN ETKİLERİNİN İNCELENMESİ.....	29
4.2 TİTREŞİM GENLİĞİNİN ETKİLERİNİN İNCELENMESİ	32
4.3 TİTREŞİM FREKANSININ ETKİLERİNİN İNCELENMESİ.....	35
4.4 TİTREŞİM YÖNÜNÜN ETKİLERİNİN İNCELENMESİ.....	38
4.5 ELEK YÜZEYİ BOYUTLARININ ETKİLERİNİN İNCELENMESİ.....	42

4.6 ELEK AÇIKLIĞI BOYUTUNUN ETKİSİNİN İNCELENMESİ	45
4.7 ELEK AÇIKLIĞI ŞEKLİNİN ETKİLERİNİN İNCELENMESİ.....	47
4.8 ELEK YÜZEYİ AÇIKLIK ORANININ ETKİLERİNİN İNCELENMESİ	53
4.9 BESLEME AKIŞ HIZININ ETKİLERİNİN İNCELENMESİ	57
4.10 BESLEME TANE BOYU DAĞILIMININ ETKİLERİNİN İNCELENMESİ	60
4.11 TANE ŞEKLİNİN ETKİLERİNİN İNCELENMESİ	65
4.12 TANE YOĞUNLUĞUNUN ETKİLERİNİN İNCELENMESİ	68
5 PİLOT ÖLÇEKLİ TEST ÇALIŞMALARI	73
5.1 BESLEME AKIŞ HIZI.....	73
5.2 ELEK AÇIKLIĞI	76
5.3 TİTREŞİM FREKANSI	78
6 SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ VE TARTIŞMA	80
7 SONUÇ VE ÖNERİLER.....	82
KAYNAKLAR.....	86
EKLER	92
EK 1 SİMÜLASYON KODLARI.....	92
EK 2 TEZDEN TÜRETİLMİŞ YAYINLAR.....	111
EK 3 TEZDEN TÜRETİLMİŞ BİLDİRİLER.....	111
EK 4 TEZDEN ÜRETİLMİŞ PROJELER VE BÜTÇESİ.....	111
ÖZGEÇMİŞ	112

ÇİZELGELER

Sayfa

Çizelge 2.1.	Bazı AEY yazılımlarının karşılaştırılması.....	11
Çizelge 3.1.	Simülasyonlarda kullanılan ortak veriler	22
Çizelge 3.2.	Simülasyonlarda kullanılan parametrelerin değerleri.....	23
Çizelge 3.3.	Simülasyonlarda kullanılan tane boyu dağılımları	24
Çizelge 4.1.	Elek eğimine bağlı eleme kesme boyutları ve Imperfection değerleri	30
Çizelge 4.2.	Titreşim genliğine bağlı eleme kesme boyutları ve Imperfection değerleri	34
Çizelge 4.3.	Titreşim frekansına bağlı eleme kesme boyutları ve Imperfection değerleri	37
Çizelge 4.4.	Titreşim yönüne bağlı eleme kesme boyutları ve Imperfection değerleri	40
Çizelge 4.5.	Çeşitli elek uzunluklarına hesaplanan kesme noktaları ve Imperfection değerleri.....	45
Çizelge 4.6.	10.5 ve 13mm elek açıklıklarına eleme kesme noktaları ve Imperfection değerleri.....	46
Çizelge 4.7.	Çeşitli elek açıklığı en/boy oranlarında kesme noktaları ve Imperfection değerleri.....	53
Çizelge 4.8.	Çeşitli elek yüzeği açıklık oranlarında kesme noktaları ve Imperfection değerleri.....	56
Çizelge 4.9.	Çeşitli besleme akış hızları için hesaplanan eleme kesme noktaları ve Imperfection değerleri	59
Çizelge 4.10.	Farklı miktarda yakın boyutlu fraksiyon içeren beslemeler için hesaplanan eleme kesme noktaları ve Imperfection değerleri	63
Çizelge 5.1.	Doğrulama deneylerinde kullanılan besleme akış hızları	74

ŞEKİLLER

Sayfa

Şekil 3.1.	LIGGGHTS için hazırlanan örnek bir simülasyon kodu.....	18
Şekil 3.2.	Simülasyon sonucu elde edilen veri dosyaları	19
Şekil 3.3.	LIGGGHTS yazılımının sağladığı dosyaların içeriğinden bir örnek .	20
Şekil 3.4.	Pilot ölçekli elek ve besleme sistemi	21
Şekil 3.5.	Pilot ölçekli eleğin 3 boyutlu çizimi (üst), elek yüzeyindeki hücre yapısı (alt)	22
Şekil 3.6.	Simülasyon sonucu üretilen bir animasyon örneği	24
Şekil 3.7.	12 farklı küreden oluşan bir şekilsiz taneye ait metin dosyası.....	26
Şekil 3.8.	Yüksek çözünürlüklü bir tane şeklinden daha basit bir şekilsiz tanenin elde edilmiş süreci.....	26
Şekil 4.1.	Elek eğiminin elek verimliliği ve alt akımın kütlesi üzerine etkileri ...	29
Şekil 4.2.	Farklı elek eğimlerinde elde edilen partiyon eğrileri	30
Şekil 4.3.	Tanelerin farklı elek eğimlerindeki ortalama kalma süreleri	31
Şekil 4.4.	Çeşitli elek yüzeyi eğimleriyle yapılan simülasyonların 15. saniyedeki ekran görüntüleri	32
Şekil 4.5.	Titreşim genliğinin eleme verimliliği ve alt akımın kütlesine etkileri .	33
Şekil 4.6.	Farklı titreşim genliklerinde elde edilen partiyon eğrileri.....	34
Şekil 4.7.	Tanelerin farklı titreşim genliklerindeki ortalama kalma süreleri	34
Şekil 4.8.	Farklı titreşim genliklerinde yapılan simülasyonların 20. saniyedeki ekran görüntüleri	35
Şekil 4.9.	Titreşim frekansının eleme verimliliği ve alt akımın kütlesine etkileri	36
Şekil 4.10.	Farklı titreşim sıklıklarında elde edilen partiyon eğrileri.....	37
Şekil 4.11.	Elek açıklığından ince tanelerin farklı titreşim sıklıklarında elek üzerinde ortalama kalma süreleri	37
Şekil 4.12.	Farklı titreşim frekanslarında yapılan simülasyonların 20. saniyedeki ekran görüntüleri	38
Şekil 4.13.	Titreşim yönünün şematik gösterimi.....	39

Şekil 4.14.	Titreşim yönünün eleme verimliliği ve alt akımın kütledeki etkileri..	39
Şekil 4.15.	Farklı titreşim yönlerinde yapılan simülasyonlardan elde edilen partiyon eğrileri	40
Şekil 4.16.	Tanelerin farklı titreşim yönlerindeki ortalama kalma süreleri.....	41
Şekil 4.17.	Farklı titreşim yönlerinde yapılan simülasyonların 20. saniyedeki ekran görüntüleri	42
Şekil 4.18.	Farklı uzunluklara sahip elek yüzeyleri	43
Şekil 4.19.	Elek uzunluğunun eleme verimliliği ve alt akımın kütle sine etkileri .	44
Şekil 4.20.	Farklı elek uzunluklarında yapılan simülasyonlardan elde edilen partiyon eğrileri	44
Şekil 4.21.	Farklı elek uzunluklarında yapılan simülasyonlarda elek üstü ve elek altı akıma giden tanelerin elek yüzeyinde ortalama kalma süreleri (OKS).....	45
Şekil 4.22.	Farklı elek açıklığına sahip eleklerin partiyon eğrileri	46
Şekil 4.23.	Farklı elek açıklıklarında yapılan simülasyonlarda elek üstü ve elek altı akımlara giden tanelerin elek yüzeyinde ortalama kalma süreleri (OKS)	47
Şekil 4.24.	Farklı boyut ve en/boy oranlarına sahip olan elek yüzeylerinin şematik görünümü	48
Şekil 4.25.	1/2 ve 2/1 en/boy oranlı elek açıklıklarına sahip olan simülasyonların partiyon eğrileri	49
Şekil 4.26.	1/2 ve 2/1 en/boy oranlı elek açıklıklarına sahip olan simülasyonlarda elek üstü ve elek altı akımlarına giden tanelerin elek yüzeyinde ortalama kalma süreleri	49
Şekil 4.27.	1/3 ve 3/1 en/boy oranlı elek açıklıklarına sahip olan simülasyonların partiyon eğrileri	50
Şekil 4.28.	1/3 ve 3/1 en/boy oranlı elek açıklıklarına sahip olan simülasyonlarda elek üstü ve elek altı akımlarına giden tanelerin elek yüzeyinde ortalama kalma süreleri	51
Şekil 4.29.	1/4 ve 4/1 en/boy oranlı elek açıklıklarına sahip olan simülasyonların partiyon eğrileri	52
Şekil 4.30.	1/4 ve 4/1 en/boy oranlı elek açıklıklarına sahip simülasyonlarda elek üstü ve elek altı akıma giden tanelerin elek yüzeyinde ortalama kalma süreleri ..	52
Şekil 4.31.	Farklı elek açıklığı oranlarına sahip olan elek çizimlerinin şematik görünümü	54

Şekil 4.32.	Farklı açıklık oranlarına sahip eleklerde eleme verimliliği ve alt akım kütleleri	55
Şekil 4.33.	Farklı açıklık oranlarında elde edilen partiyon eğrileri	55
Şekil 4.34.	Farklı elek açıklığı oranlarında, alt ve üst akımlara giden tanelerin elek yüzeyinde ortalama kalma süreleri	57
Şekil 4.35.	Besleme hızının elek verimliliği ve alt akımın kütlesi üzerine etkileri	58
Şekil 4.36.	Farklı besleme hızlarında elde edilen partiyon eğrileri	58
Şekil 4.37.	Tanelerin farklı besleme hızlarında elek üzerinde ortalama kalma süreleri	59
Şekil 4.38.	Farklı besleme hızlarında yapılan simülasyonların 20. saniyedeki ekran görüntüleri	60
Şekil 4.39.	Farklı yakın boyutlu malzeme içeren beslemelerin tane boyu dağılımları	61
Şekil 4.40.	Farklı yakın boyutlu malzeme içeren beslemelerin eleme verimlilikleri ve alt akım kütleleri.....	62
Şekil 4.41.	Farklı miktarda yakın boyutlu fraksiyon içeren beslemeler için partiyon eğrileri	63
Şekil 4.42.	Farklı oranlarda yakın boyutlu malzeme içeren beslemelerde alt ve üst akıma giden tanelerin elek yüzeyinde ortalama kalma süreleri	64
Şekil 4.43.	Farklı oranlarda yakın boyutlu tane içeren beslemeler için yapılan simülasyonların 20. saniyedeki ekran görüntüleri.....	65
Şekil 4.44.	Farklı boy/en oranlarına sahip tane şekilleri.....	66
Şekil 4.45.	Farklı boy/en oranlarına sahip olan tanelerle yapılan simülasyonların eleme verimlilikleri	66
Şekil 4.46.	Farklı boy/en oranlarına sahip beslemeden alt ve üst akıma giden tanelerin elek yüzeyinde ortalama kalma süreleri.....	67
Şekil 4.47.	Farklı boy/en oranlarına sahip tanelerle yapılan simülasyonların 20. saniyesinde alınan ekran görüntüleri.....	68
Şekil 4.48.	Farklı yoğunluklara sahip olan tanelerle yapılan simülasyonların eleme verimliliği ve alt akım kütleleri	69
Şekil 4.49.	Farklı yoğunluklara sahip olan tanelerle yapılan simülasyonların performans eğrileri	70
Şekil 4.50.	Farklı yoğunluklara sahip olan tanelerle yapılan simülasyonlarda elek üstü ve elek altı akıma giden tanelerin elek yüzeyinde ortalama kalma süreleri ..	71

Şekil 4.51. Elek altı üründeki farklı yoğunluğa sahip olan tanelerin dağılımı	71
Şekil 4.52. Çeşitli yoğunluklara sahip olan tanelerden oluşan besleme ile yapılan simülasyonda alt akıma giden tanelerin elek yüzeyinde ortalama kalma süreleri	72
Şekil 5.1. Çeşitli besleme akış hızlarında gerçekleştirilen pilot test ve simülasyonların eleme verimlilikleri	75
Şekil 5.2. Çeşitli besleme hızlarında yapılan pilot testler ve simülasyonların partiyon eğrileri	76
Şekil 5.3. Farklı elek açıklıklarında yapılan deneyler ve simülasyonların partiyon eğrileri	77
Şekil 5.4. Çeşitli titreşim frekanslarında pilot ölçekli testler ve simülasyonlar için hesaplanan eleme verimliliği ve alt akım kütlesi	78
Şekil 5.5. Pilot testler ve simülasyonların çeşitli titreşim frekanslarındaki partiyon eğrileri	79

1 GİRİŞ

Eleme işlemleri cevher hazırlama tesislerinde en yaygın uygulanan birim işlemlerden birini oluşturmaktadır. Cevherin maden sahasından üretilmesi ile başlayan ve belirli bir süreç sonucu kullanılmaya uygun hale getirilmesi süreci içinde değişik amaçlarla kullanılmaktadır. Eleklerden, boyuta göre sınıflandırma, kırıcılara girecek malzeme boyut aralığını sınırlandırma, susuzlandırma, şlam temizleme, katı kazanımı, yıkama, vb. pek çok amaç için faydalanılmaktadır [1].

Eleme işlemleri cevher hazırlama ve diğer pek çok alanda (gıda, tekstil, vb.) yaygın olarak uygulanmaktadır. Eleklerin tasarımı, boyutlandırılması ve ayırım etkinliği, bir cevher hazırlama tesisinde hedef ürünlerin miktar ve özellikleri, toplam güç tüketimi ve kırıcıların etkin olarak çalışması ve sonuç olarak tesisin karlılığına doğrudan etki etmektedir. Bu nedenle, eleklerin modellenmesi ile ilgili geçmişte çok sayıda çalışma yapılmıştır. Ancak, ekipmanın performansını ve ürün özelliklerini etkileyen çok sayıda değişken olması, bazı değişkenlerin birbirleriyle ilişkili olması gibi sebeplerle, büyük bir kısmı ampirik veya yarı-ampirik olan modeller geliştirilebilmiştir. Günümüzde kullanılmakta olan elek modelleri, çok sayıda tesis verisinden elde edilmiş performans verilerinden oluşan bir veri tabanına ihtiyaç duyan ve doğru uygulanması oldukça fazla tecrübe gerektiren modellerdir [2]. Bu nedenle, modelleme tekniklerinin ekipman boyutlandırma amacıyla uygulanması kısıtlı kalmaktadır.

Sayısal bilgisayar destekli simülasyonların kullanımı, eleklerin yanı sıra pek çok proses ekipmanlarında tane davranışlarının modellenmesinde gün geçtikçe yaygınlaşmaktadır [3]. Eleklerin modellenmesi için, işlem ve tasarım değişkenlerinin ayrıntılı olarak modellenmesinde konvansiyonel modeller yetersiz kalmaktadır. Bu nedenle konvansiyonel modellerin yanı sıra sayısal modelleme yöntemleri kullanılmaya başlanmıştır.

Taneli malzemelerin hareketlerini hesaplamaya yönelik olarak yaygın bir kullanım alanına sahip olan Ayrık Elemanlar Yöntemi (AEY); madencilik, cevher hazırlama, gıda, malzeme nakli, metalürji, vb. pek çok alanda; taneli malzemelerin hareketleri, birbirleri ve temas ettiği yapılar üzerindeki etkiler (örn. aşınma), mekanik etkiler (örn.

tork), elektrostatik etkileşimler, ısı transferleri, vb. hesaplamaların yapılmasını mümkün kılmaktadır. Bu sayede, işlemlerin optimizasyonu, ekipman tasarımı, etkileşimlerin ayrıntılı incelenmesi, vb. çalışmalarda yardımcı bir mühendislik aracı olarak kullanılmaktadır.

Cevher hazırlama alanında AEY'in kullanımına yönelik olarak, dünya literatüründe oldukça çok sayıda çalışma bulunmasına karşın, eleme ile ilgili sayılı çalışma bulunmaktadır. AEY uygulamalarının en büyük zorluklarından olan deneysel doğrulama elekler için de az raslanmaktadır.

Bu tez kapsamında, cevher hazırlama tesislerinde oldukça yaygın olarak kullanılan eleklerin sayısal modellenmesi amaçlanmaktadır. Tanelerin boyutlarına göre ayrılması olarak özetlenebilecek eleme işleminde, ayırımın büyük oranda temel fiziksel prensipler çerçevesinde gerçekleşmesi, eleklerin AEY ile modellenmesini mümkün kılmaktadır.

Bu bilgiler ışığında, endüstriyel eleme işleminin AEY ile modellenmesi doğrultusunda, çok sayıda ayrıntılı modelleme ve simülasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Elde edilen simülasyon sonuçlarının doğruluğunu ve fiili durumu ne ölçüde yansıttığını belirlemek amacıyla pilot ölçekli testler yapılmış ve simülasyon sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

2 LİTERATÜR ÖZETİ

Cevher hazırlamanın en önemli birim işlemlerinden biri olan eleme işlemlerinin matematiksel modellemesi doğrultusunda yapılmış çok sayıda çalışma bulunmaktadır. Çoğunlukla ampirik ve yarı ampirik eşitliklerden oluşan konvansiyonel modeller, halen yaygın olarak tesis tasarımı ve eleklerin boyutlandırılması çalışmalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Diğer taraftan eleklerin modellenmesi konusunda görece yeni bir yaklaşım olan sayısal modelleme teknikleri tasarım ve optimizasyon konularında kullanılabilme açısından potansiyel arz etmektedir. Bu bölümde eleklerin modellemesi amacıyla kullanılmakta olan konvansiyonel ve sayısal yöntemler özetlenmekte ve bu tez kapsamında uygulanan AEY model yapısı, AEY'in kullanım alanları ve bu doğrultuda yapılmış olan önceki çalışmalar özetlenmektedir.

2.1 Eleklerin Modellemesi

Besleme tane boyu dağılımı, besleme tonajı ve eleğin işlem parametrelerini temel alarak, modeller eleme işleminden elde edilen ürünlerin miktarı, tane boyu dağılımı ve eleğin performansını tahmin etmeye çalışan araçlardır.

Yazılı literatürü temel alarak, elek modellerini konvansiyonel ve sayısal modeller olmak üzere iki başlık altında değerlendirmek mümkündür.

2.1.1 Konvansiyonel Modeller

- **Olasılık modelleri:**

Gaudin'in modeli [4] literatürde bulunan olasılık modellerinin çoğunun temelini oluşturmaktadır. Küresel bir tanenin elek açıklığından geçme olasılığını (p) hesaplayan bu modelde küresel tanenin çapı x , elek açıklığı h ve örgü telin çapı d olduğunda, p değeri;

$$p = \frac{(h-x)^2}{(h+d)^2} \quad (1)$$

ve eğer d göz ardı edildiğinde,

$$p = \left[1 - \frac{x}{h}\right]^2 \quad (2)$$

şeklinde hesaplanmaktadır. Bir tanenin üst akıma gitme olasılığı ise, n adet denemeden sonra alt akıma gidememe olasılığına eşittir ve şu şekilde gösterilmektedir.

$$\text{Üst akıma gitme olasılığı} = (1 - p)^n \quad (3)$$

Eş. 3, (Whiten, 1972) [5] ve (Subasinghe vd. 1989) [6] modelleri gibi pek çok olasılık modelinin temelini oluşturmaktadır.

Eleklerin yanı sıra hidrosiklonlarda da partiyon eğrisini hesaplamak amacıyla (Whiten, 1966) verim eğrisi modeli kullanılmaktadır [7];

$$E_{OA} = C \left[\frac{(1 + \beta \cdot \beta^* \cdot x)(e^\alpha - 1)}{e^{(\alpha \cdot \beta^* \cdot x)} + e^\alpha - 2} \right] \quad (4)$$

Burada;

E_{OA} : Beslemede belirli boy aralığındaki malzemenin ince ürüne giden miktarı (%)

C : Beslemenin ayırma maruz kalan yüzdesi (100 – Bypass) (%)

α : Ayrım keskinliği parametresi

β : Balık oltası (fish-hook) parametresi

β^* : İterasyon parametresi

x : Normalize edilmiş tane boyu değeri (d / d_{50c})

İfade etmektedir. Bu eşitlik ile gerek kuru gerekse yaş eleme işlemlerinde partiyon verileri hesaplanabilmektedir. Bununla beraber gerçek bir eleme ya da sınıflandırma işlemi için model parametrelerinin alması gereken değerlerin hassas ve uygun bir şekilde belirlenebilmesi ancak çok sayıda tesis ölçekli veri ve bu alanda uzmanlaşma gerektirmektedir [8].

- **DeneySEL modeller:**

Karra (1979) normalize verim eğrisine dayalı bir model yapısı önermiştir [9]. Bu model yapısı da x_{50} değerini temel almakta olup Rosin-Rammler dağılımına benzer bir fonksiyon ortaya koymaktadır (Eş. 5).

$$E_i = 100 \left[1 - \exp\left(-0.693 \left[\frac{x_i}{x_{50}} \right]^{5.846} \right) \right] \quad (5)$$

Burada;

E_i : iri ürüne giden i boyutundaki tanenin ağırlık yüzdesi

x_i : geometrik ortalama boyut

x_{50} : E_i 'nin %50 olduğu boyut değeri

Hatch ve Mular (1979) tarafından önerilen model ise ince taneler üzerinde uygulanan bir istatistiksel çalışma ile oluşturulmuştur ve sınıflandırma fonksiyonunu hesaplamaktadır [10].

$$E_i = C_i + \frac{(1-C_i)}{1 + \frac{\exp(x_{50}^3 - x_i^3)}{k}} \quad (6)$$

Burada, k besleme hızı, elek açıklığı ve beslemenin tane boyu dağılımına bağlı olan bir katsayıdır. C_i ise, i boyutundaki tanelerin iri ürüne kaçak oranıdır.

- **Kapasite modelleri:**

Bir tesis veya devre tasarımı çalışmasında, kullanılacak olan eleğin türü belirlendikten sonra, gerekli elek boyutlarının belirlenmesi amacıyla kapasite modelleri kullanılabilir [1].

$$A = \frac{F}{C.M.K.Q_1.Q_2.Q_3.Q_4.Q_5.Q_6.Q_7.Q_{mf}} \quad (7)$$

Burada;

A: gerekli eleme yüzey alanı (ft²)

F: besleme hızı (stph)

C: baz kapasite (stph/ft²). Elek açıklığına bağlı değişmektedir.

M: iri malzeme faktörü.

K: yarı boyutlu malzeme faktörü

Q₁: yığın yoğunluğu faktörü

Q₂: elek açıklığı şekli faktörü

Q₃: tane şekli faktörü

Q₄: açık alan faktörü

Q₅: yaş eleme faktörü

Q₆: yüzey nemi faktörü

- Q₇: çok katlı eleme faktörü
Q_{mf}: değişken eğimli elek yüzeyi faktörü
B: İri boyutlu malzemenin beslemedeki yüzdesi
C: Yarı boyutlu malzemenin beslemedeki yüzdesi
D: Elek katı sayısını ifade eden parametre
E: Yaş eleme katsayısı
F: Malzemenin kaba yoğunluğu
G: Açık alanın yüzdesi
H: Elek açıklığının şekil katsayısı

Napier-Munn (1996) kapasiteye dayalı modellerin tasarım ve ekipman seçimi çalışmalarında yol gösterici olarak kullanılmakta olduğunu belirtmekle beraber, dikkatli kullanılmaları gerektiğini ifade etmektedir [8]. Günümüzde ekipman seçimi ve boyutlandırılması amacıyla en yaygın olarak kullanılan yaklaşım olan kapasite modellerinin içerdiği katsayılar çoğunlukla ampirik/yarı-ampirik eşitliklerden ve/veya değerlerden oluşması sebebiyle farklı özelliklere sahip malzemelere uygulanmasında önemli hataların yapılması söz konusudur.

2.1.2 Sayısal Modeller

Sayısal bilgisayar destekli simülasyonların kullanımı elekler dahil olmak üzere pek çok proses ekipmanlarında tane davranışlarının modellenmesinde gün geçtikçe yaygınlaşmaktadır [3]. Eleklerin modellenmesinde ve eleme işlemi sonucunda elde edilecek ürün miktar ve özelliklerinin tahmin edilmesinde, işlem ve tasarım değişkenlerinin eleme işlemi üzerine etkilerinin sayısal olarak ortaya konulmasında konvansiyonel modeller bazı durumlarda yetersiz kalmaktadır. Bu nedenle konvansiyonel modellerin yanı sıra sayısal modelleme yöntemleri kullanılmaya başlanmıştır. Sayısal modelleme yaklaşımlarından biri olan ve bu çalışma kapsamında da kullanılmış olan Ayrık Elemanlar Yöntemi'nin (AEY) model yapısı ve kullanım alanlarının yanı sıra güçlü ve zayıf yönleri aşağıda ayrıntılarıyla verilmektedir.

2.2 AYRIK ELEMANLAR YÖNTEMİ (AEY)

Ayrık elemanlar yöntemi (AEY) ilk olarak Cundall ve Strack (1979) tarafından önerilen sayısal modelleme yöntemlerinden biridir [11]. Taneli malzemelerin hareketlerinin belirlenmesi amacıyla ortaya çıkan bu modelleme yöntemi; boyut küçültme, sınıflandırma, zenginleştirme, vb. konuları kapsayan cevher hazırlama alanında kullanıldığı araştırmalar ise bilgisayar teknolojisindeki gelişmelere paralel olarak özellikle 90'lı yıllarda hız kazanmıştır. Cevher hazırlamada pek çok ekipmanın ve birim işlemin modellenmesinde bu yöntem kullanılabilir. Özellikle bilyalı değirmenlerde bilya hareketinin 2 ve 3 boyutta incelenmesi, değirmenin harcadığı gücün hesaplanması ve astarlarda meydana gelen aşınmanın incelenmesine yönelik oldukça çok sayıda çalışma bulunmaktadır [12]. Bunun yanı sıra literatürde, titreşimli değirmen [13], silo [14], jig [15], yörüngesel bilyalı değirmen [16], yığın [17], Hicom değirmen [18], tambur [19], akışkan yatak [20], kırıcılar [21], diğer değirmen çeşitleri [22] vb. gibi çeşitli ekipmanlarda tane veya bilya hareketlerinin ayrık elemanlar yöntemi kullanılarak incelendiği çalışmalar bulunmaktadır.

Eleme işlemi, büyük oranda taneli yapılardan oluştuğu için AEY'e oldukça uygundur. AEY eleme prosesinin daha iyi anlaşılmasını sağlayarak, model parametrelerinin uygunluğu doğrulandıktan sonra, geniş çaplı deneysel araştırma gerekmeden ekipman ve işlem parametrelerinin optimizasyonunun yapılmasına imkan sağlamaktadır.

Eleklerin AEY kullanılarak modellenmesi konusunda dünya literatüründe çalışmalara rastlanmaktadır. Zhao vd. (2011) dairesel titreşimli eleklerin titreşim genliği, atım indeksi ve elek eğiminin elde edilen ürünler ve eleme verimi üzerine etkilerini incelemiştir [23]. Alkhaldi vd. (2008) ve Tung vd. (2011) AEY yöntemini kullanarak tel örgülü elek yüzeylerinin etkisini [24], [25] sonraki araştırmalarda elek titreşimleri çeşitlendirilerek, muz eleklerin [26] [27] ya da diğer elekler ile ilgili çalışmalar bulunmaktadır [28]. Bunların yanı sıra, tane sıvı etkileşiminden yararlanılarak diğer sayısal modellemelerle AEY birleştirilerek yaş eleme ilgili çalışmalar yapılmıştır [29].

Eleme işleminin AEY kullanılarak incelendiği çalışmalar bulunmakla birlikte, simülasyon sonucu elde edilen sonuçların deneysel verilerle karşılaştırıldığı çalışmaların oldukça sınırlı sayıda olması sebebiyle, çalışmaların çoğunluğunda simülasyon sonuçlarının gerçeğe uygunluğundan emin olunamamakta ve elde edilen sonuçların fiili durumu ne ölçüde yansıttığı şüpheli hale gelmektedir.

2.2.1 AEY Model Yapısı

Ayrık elemanlar yöntemi, tane hareketinin belirlenmesi amacıyla zamana bağlı olarak yer değiştiren tanelerin üzerine etkiyen kuvvetleri ve hareketlerini belirlemek için kullanılan bir model yapısına sahiptir. Bunun için ilk olarak sistemde bulunan tanelerin arasındaki uzaklıklar hesaplanarak temas halindeki taneler belirlenmektedir. Üç boyutlu uzayda (3D) r_a ve r_b yarıçaplarına sahip iki küresel tanenin temas etmesi Eş. 8'de verilen koşulun sağlanması ile mümkündür. Yöntemin teorisi ve fiziksel alt yapısı [30] ve [31] tarafından ayrıntılarıyla verilmektedir.

$$r_a + r_b > d_{ab} \quad (8)$$

Üç boyutlu uzayda iki tanenin merkezleri arasındaki uzaklık ise;

$$d_{ab} = \sqrt{(x_{b,1} - x_{a,1})^2 + (x_{b,2} - x_{a,2})^2 + (x_{b,3} - x_{a,3})^2} \quad (9)$$

ile hesaplanmaktadır. Burada, d_{ab} tanelerin merkezleri arasındaki uzaklığı, $x_{n,i}$ ise tanelerin merkezlerinin kartezyen koordinat sistemindeki konumunu göstermektedir. Daha sonra, tanelerin üzerine etkiyen normal ve teğetsel yöndeki kuvvetler hesaplanmaktadır.

Normal yönde yay ve tampon mekanizmalarından kaynaklanan kuvvet;

$$F_n = -k_n \Delta x + C_n v_n \quad (10)$$

ile hesaplanır. Burada k_n normal yöndeki katılık değeri (N/m) ve Δx temas mesafesidir [$= d_{ab} - (r_a + r_b)$] (m). Eş. 10'da verilen $k_n \Delta x$ ifadesi yay mekanizmasını temsil etmekte ve çarpışmanın elastik bileşenini oluşturmaktadır. $C_n v_n$ ifadesi ise tampon mekanizmasını temsil etmekte ve çarpışma sırasında enerjinin absorbe edildiği viskoz bileşeni oluşturmaktadır. Burada, C_n tampon katsayısıdır (Eş. 4) [32].

$$C_n = -2 \ln \varepsilon \sqrt{\frac{m_{ab} k_n}{\ln^2 \varepsilon + \pi^2}} \quad (11)$$

$$m_{ab} = \frac{m_a m_b}{m_a + m_b} \quad (12)$$

Burada, m_{ab} indirgenmiş kütle (kg) ve ε geri sıçrama katsayısı (restitution coefficient) olup çarpışma sonrası ve öncesi görece hızların oranı şeklinde tanımlanmaktadır [33].

Teğet yöndeki kuvvet ise;

$$F_s = \min \left\{ \begin{array}{l} k_s \int v_s dt + C_s v_s \\ \mu F_n \end{array} \right\} \quad (13)$$

ile hesaplanmaktadır [34].

Tane üzerine etkiyen AEY mekanizmalarından kaynaklanan bileşke kuvvetlerin hesaplanmasından sonra Newton'un ikinci yasasından sırasıyla yeni ivme (\ddot{x}), hız (\dot{x}), yer değiştirme (x), moment (M), açısal hız ($\dot{\theta}$) ve açısal yer değiştirme (θ) değerleri hesaplanmaktadır.

AEY'in bir sistemdeki kullanımını aşağıdaki genel adımları kapsamaktadır [35]:

- Taneler ve duvarların başlangıç koşullarının düzenlenmesi
- Temas denetimi
- Etkileşim yasalarının (güçlerin ve momentlerin hesaplanması) bütün tane-tane ve tane-duvar çarpışmalarına uygulanması
- Newton'un ikinci yasası kullanılarak tanelerin yer değişim, hız ve ivmelerinin öngörülmesi
- Taneler ve duvarların durumunun güncellenmesi
- Yeni zaman diliminin tahsis edilmesi ($t = t + \Delta t$)
- Belirlenen simülasyon süresince bu döngünün tekrarlanması
- Görüntüleme ve simülasyon sonrası işlemler

2.2.2 AEY Yazılımları

AEY yazılımları, genel olarak, ticari yazılımlar ve ücretsiz yazılımlar olarak iki grupta değerlendirilebilmektedir. Ticari yazılımların alınması veya kiralanması yüksek maliyetler gerektirmesinin yanı sıra, kullanıcının kaynak koduna erişememesi, model yapılarında değişiklikler yapılamaması, vb. sebeplerle yeterli esnekliğe sahip olamamaktadır. Ancak bu uygulamaların çoğunluğu kolay kullanıma sahip, AEY model yapısı hakkında ayrıntılı bilgi ve tecrübe gerektirmeyen ve genellikle Windows tabanlı yazılımlardır. Ücretsiz yazılımlar ise, genelde serbest ve ücretsiz bir şekilde ulaşılabilen ve çoğunlukla Linux tabanlı işletim sistemlerinde çalışan uygulamalardır. Her ne kadar, bu yazılımlarla çalışmak ticari yazılımlar kadar kolay olmasa da, açık kaynak kodlu olmaları ve kullanıcının model yapılarında arzu ettiği değişiklikleri yapabilmesi, açık kaynak kodlu uygulamaları daha cazip hale getirmektedir. Çizelge 2.1, piyasada bulunan bazı yazılımları özetlemektedir.

2.2.3 Açık Kaynak Kodlu AEY Yazılımlarının Avantajları

AEY teorisinin gelişmesine paralel olarak, TRUBAL ve GRANULAR gibi AEY kodları da geliştirilerek taneli malzemelerin hareketlerinin belirlenmesinde kullanılmaya başlanmıştır. 1990 yılından sonra, PFD2D ve PFC3D gibi ticari yazılımlar ortaya çıkarak kısa bir sürede yaygınlaşmıştır. Hızlı hesaplama gücü ve etkili simülasyon özelliklerini taşıyan bu yazılımlar taneli malzeme içeren sistemlerin simülasyonunda geniş çapta kullanılmaya başlanmıştır [36]. 2000'li yıllarda DEM Solutions Ltd. tarafından geliştirilen EDEM yazılımı ise görsel ve kolay kullanıma sahip olması sebebiyle hızla yaygınlaşarak, en yaygın kullanılan ticari AEY yazılımı haline gelmiştir. Ancak, ticari yazılımların görece yüksek fiyata sahip olması ve kullanıcının kaynak kodlarına ulaşamaması sebebiyle önemli dezavantajlarını oluşturmaktadır. Bu kısıtlamalar nedeniyle, pek çok araştırmacı grubu kendi AEY yazılımlarını geliştirme yoluna gitmiş ve LMGC90, YADE, LIGGGHTS, vb. açık kaynak kodlu AEY yazılımları ortaya çıkmıştır [36].

2.2.4 LIGGGHTS

Bu tez kapsamında, LIGGGHTS (LAMMPS Improved for General Granular and Granular Heat Transfer Simulations) yazılımının 3.6.0 ve 3.7.0 versiyonları kullanılmıştır. LIGGGHTS, taneli sistemlerin simülasyonu için geliştirilen açık

Çizelge 2.1. Bazı AEY yazılımlarının karşılaştırılması

Yazılımın adı	Yazılımın tipi	Üretim yılı	Menşei	Geliştiren Firma/Kurum	Özellik ve uygulama	İşletim sistemi
BALL & TRUBAL	Açık kaynak	1979-1982				Linux
Dp3D	Açık kaynak		Fransa	SIMAP	Metalürji	Linux
ESyS-Particle	Açık kaynak	1994	Avustralya	Queensland Üniversitesi	Yerbilimleri	Linux
LAMMPS	Açık kaynak	1999	ABD	Sandia National Labs	bkz. Bölüm 2.2.4	Linux
LIGGGHTS	Açık kaynak	2010	ABD	Sandia National Labs	bkz. Bölüm 2.2.4	Linux
SDEC	Açık kaynak	1990	Kanada	Montreal Üniversitesi	Küresel bileşenler	Linux
LMGC90	Açık kaynak	2001	Fransa	CNRS	AEY-SEY	Linux
Bulk Flow Analyst	Ticari	1996	ABD	Applied DEM	Mekanik mühendisliği uygulamaları	Windows
Chute Maven	Ticari	2005	ABD	Hustrulid Technologies		Windows
EDEM	Ticari	2005	İngiltere	DEM solutions	AEY ve HAD	Windows ve Linux
PFC2D&PFC3D	Ticari	1980	Kanada	Itasca	Mikro mekanik yerbilimleri	Windows

kaynak kodlu bir yazılımdır [37]. LIGGGHTS; sıvı, katı veya gaz halindeki atom ve moleküllerin hareketlerinin belirlenmesi amacıyla geliştirilen LAMMPS (Large Atomic and Molecular Massively Parallel Simulator) yazılımı temel alınarak

geliştirilmiştir. LAMMPS başlangıçta ABD Enerji Bakanlığı'nın (DOE) CRADA (Kooperatif Araştırma ve Geliştirme Anlaşması) kapsamında iki DOE laboratuvarı ve 3 şirket arasında geliştirilmiş ve daha sonra Sandia National Labs tarafından geliştirilmeye devam edilmiştir [38]. Büyük ölçekli taneli sistemlerin simülasyonu amacıyla LAMMPS temel alınarak geliştirilen LIGGGHTS, aşağıdaki özellikleri taşımaktadır [39]:

- Kompleks geometrileri alma ve işleme
- Bir geometrinin farklı düzenlerle hareket ettirilebilmesi
- Duvarlarda güç ve aşınma analiz özelliği
- Küresel olmayan taneler ve kohezyon modelleri de dahil olmak üzere çeşitli tane-tane temas uygulamaları
- Taneler arasında ısı iletimi
- Güçlü tane yaratma algoritması
- Farklı tane boyu dağılımlarının kolayca tanımlanabilmesi
- Üretilen çıktı dosyalarının yaygın olarak kullanılan VTK formatına sahip olması
- Hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) gibi farklı simülasyon yöntemleri ile birleştirilebilmesi

Modelleme çalışmalarında LIGGGHTS yazılımının kullanıcıya sağladığı avantajların bazıları şunlardır:

- Açık kaynak kodlu ve ücretsiz bir yazılım olması,
- Tek işlemci veya çok işlemcili paralel çalıştırılabilme özelliğine sahip olması,
- Kullanıcı tarafından yeni özellikler eklenerek geliştirilebilmesi,
- Küresel olmayan tanelerin oluşturulabilmesi,
- 3 boyutlu modellerin yazılıma doğrudan aktarılabilmesi,
- 3 boyutlu modellerin farklı şekillerde hareket ettirilebilmesi,
- Özel bir bilim dalına ait olmayıp, farklı mühendislik alanlarında kullanılabilmesi,
- Hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) gibi farklı simülasyon yöntemleri ile birleştirilebilmesi.

2.3 ELEKLERİN MODELLEMESİNDEKİ AEY UYGULAMALARI

AEY'in eleme işlemine yönelik ilk uygulaması Shimosaka vd.(2000) 'nın çalışmalarına dayanmaktadır [40]. 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 [41] [42]. Diğer taraftan küçük çaplı üç boyutlu ve periyodik sınır koşullu bir çalışma Cleary (2004) tarafından gerçekleştirilmiştir [43]. Dong vd. (2009), Alkhalidi ve Eberhard (2007) ve Chen vd. (2010) büyük ölçekli (yüksek kapasiteli) eleme işlemine yönelik modelleme çalışmaları gerçekleştirmiştir [44] [45] [46]. 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 alınıp simülasyonlar gerçekleştirilmiştir [47] [48] [49] [50].

Eleme işleminin ayrıntılarıyla incelenmesi, 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 incelemektedir [51]. Aynı çalışmada, titreşim genliği ve elek eğimi parametreleri de incelenerek optimum eleme koşulları yorumlanmaktadır. Tung vd. (2011) ise farklı tel örgü elek yüzeyleri kullanarak sürekli olmayan (kesikli) bir eleme işleminin simülasyonunu gerçekleştirmektedir [25]. Diğer çalışmalarda ise muz eleklerinin simülasyonu [26] ve eleme işlemine etkileyen önemli faktörlerden biri olan titreşim şeklinin (eliptik, dairesel veya doğrusal) eleme işlemi üzerine olan etkileri ortaya konmaktadır [52] [53] [54].

Yakın zamanda, tane/akışkan etkileşimi ve sıvı köprüleri nedeniyle ortaya çıkan yapışma kuvvetlerini incelemeye çalışan araştırmalar da gerçekleştirilmiştir [55] [56] [57]. Jahani vd. (2015) ise açık kaynak kodlu LIGGGHTS uygulamasını kullanarak iki katlı muz eleği modellemiş ve çeşitli tasarım ve işlem değişkenlerinin etkilerini incelemiştir [58]. Jafari ve Saljooghi Nezhad (2016) ise ana hatlarıyla elek yüzeyinde meydana gelecek aşınmanın sayısal olarak ifade edilebilmesi amacıyla çeşitli

simülasyon çalışmaları gerçekleştirmiştir [59]. Çizgisel ve dairesel titreşim şekillerinin aksine Yin vd. (2016) eliptik titreşim şekline sahip olan eleklerin performansını araştırmıştır [60]. Elek yüzeyinde bulunan açıklıkların şekil farkının etkisi ise Dong vd. (2016) tarafından incelenmiştir [61].

Yukarıda verilen çalışmalar, eleme işleminin modellenmesi çalışmalarında, tasarım ve işlem değişkenlerinin etkilerinin AEY ile kapsamlı olarak incelenebildiğini ve oldukça ayrıntılı bilgi sağlama özelliğini göstermektedir.

Diğer taraftan, AEY ile yapılan 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, Aghlmandi Harzanagh vd., 2017) tarafından gerçekleştirilmiştir [57] [49] [62] [50].

3 YÖNTEM

3.1 Ayırık Elemanlar Yöntemi Model Yapısının Geliştirilmesi

Eleme işlemi, cevher hazırlama tesislerinde, bir malzemededen, çeşitli amaçlarla belirli bir boyuttan ince ya da iri malzemelerin 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 ayırık elemanlar yöntemi (AEY) ile modellenmesini mümkün kılmaktadır.

Eleme işleminin AEY ile modellenmesi ve elde edilecek ürünlerin özelliklerinin belirlenmesini hedefleyen bu tez kapsamında, LIGGGHTS (Lammps Improved for General Granular and Granular Heat Transfer Simulations) yazılımı kullanılmaktadır. LIGGGHTS yazılımı açık kaynak kodlu bir program olup, yine açık kaynak kodlu olarak ulaşılabilen LAMMPS (Large-scale Atomic/Molecular Massively Parallel Simulator) programını temel alan ve çoğunlukla taneli malzemelerin hareketinin tahmin edilebilmesini amaçlayan bir programdır.

Tez kapsamında öngörülen iş istasyonu tedarik edildikten sonra, LIGGGHTS yazılımı hem Windows hem de Linux işletim sistemlerine uygun şekilde derlenmiştir. LIGGGHTS yazılımının kendi veri tabanında barındırdığı farklı fiziksel modeller ve çarpışma modellerini bir simülasyon kapsamında kullanabilmek için, LIGGGHTS'a özel bir kod dili ile model ve simülasyon parametrelerinin tanımlanması gerekmektedir. Bir simülasyonu uygulamak için aşağıda özetlenen bilgilerin belirtilmesi gerekmektedir.

Yaratılan tanelerin şeklinin belirlenmesi

İşlemci sayısının belirlenmesi

Birim sisteminin belirlenmesi (SI, cgs, vb.)

Simülasyonun gerçekleştiği 3 boyutlu hacmin belirlenmesi

Tanelerin fiziksel özelliklerinin belirlenmesi (Elastisite modülü, Poisson oranı, sürtünme katsayısı, yoğunluk vb.)

Çarpışma modelinin seçilmesi

Temas denetiminin zaman aralığının belirlenmesi
3 boyutlu çizim dosyasının belirlenmesi
3 boyutlu çizimin hareket şeklinin belirlenmesi
Yaratılan tanelerin, çapı ve tane boyu dağılımının belirlenmesi
Tanelerin yaratıldığı bölgenin belirlenmesi
Tanelerin akış hızının belirlenmesi
Simülasyon süresince oluşturulması istenilen verilerin belirlenmesi (tanelerin konumu, hızı, çapı vb.).
Verilerin hangi zaman sıklığında yazılmasının belirlenmesi
Simülasyon süresinin belirlenmesi
Bu bilgiler, LIGGGHTS'in öngördüğü şekilde metin bazlı olarak, kendi özel yazım dili ile tanımlanmasını takiben, simülasyon başlatılır.
Bu tez kapsamında gerçekleştirilen simülasyonlarda, LIGGGHTS'ta bulunan ve oldukça gerçekçi simülasyonların yapılmasını sağlayan bir temas modeli olan, Hertz modeli kullanılmıştır (Eş. 13).

$$F = (K_n \delta n_{ij} - \gamma_n V n_{ij}) + (K_t \delta t_{ij} - \gamma_t V t_{ij}) \quad (13)$$

Burada;

δn : tanelerin normal yönde örtüşme mesafesi

δt : tanelerin teğet yönde örtüşme mesafesi

K_n : normal yönde elastik katılık sabiti

K_t : teğet yönde elastik katılık sabiti

γ_n : normal yönde viskoelastik tampon katsayısı

γ_t : teğet yönde viskoelastik tampon katsayısı

Vn : İki tanenin görece hızının normal yöndeki bileşeni

Vt : İki tanenin görece hızının teğet yöndeki bileşeni

K_n , K_t , γ_n ve γ_t katsayıları malzeme özelliklerine göre aşağıdaki şekilde hesaplanmaktadır (Eş. 14-24).

$$K_n = \frac{4}{3} Y^* \sqrt{R^* \delta_n} \quad (14)$$

$$\gamma_n = -2 \sqrt{\frac{5}{6}} \beta \sqrt{S_n m^*} \geq 0 \quad (15)$$

$$K_t = 8G^* \sqrt{R^* \delta_n} \quad (16)$$

$$\gamma_t = -2 \sqrt{\frac{5}{6}} \beta \sqrt{S_t m^*} \geq 0 \quad (17)$$

$$S_n = 2Y^* \sqrt{R^* \delta_n} \quad (18)$$

$$S_t = 8G^* \sqrt{R^* \delta_n} \quad (19)$$

$$\beta = \frac{\text{Ln}(E)}{\sqrt{\text{Ln}^2(e) + \pi^2}} \quad (20)$$

$$\frac{1}{Y^*} = \frac{(1 - v_1^2)}{Y_1} + \frac{(1 - v_2^2)}{Y_2} \quad (21)$$

$$\frac{1}{G^*} = \frac{2(2 - v_1)(1 + v_1)}{Y_1} + \frac{2(2 - v_2)(1 + v_2)}{Y_2} \quad (22)$$

$$\frac{1}{R^*} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \quad (23)$$

$$\frac{1}{m^*} = \frac{1}{m_1} + \frac{1}{m_2} \quad (24)$$

Burada,

Y^* : Young modülü

G^* : makaslama modülü

v : Poisson oranı

e : geri sıçrama katsayısı

Şekil 3.1'de tipik bir simülasyon kodlaması verilmektedir. Ayrıca Şekil 3.2'de LIGGGHTS yazılımının sağladığı dosyaların görüntüsü ve Şekil 3.3'te bu dosyaların içeriğinin bir örneği gösterilmektedir.


```

# one Deck vibrating screen
atom_style granular
atom_modify map array
boundary f f f
newton off
communicate multi vel yes
units si
region reg block -0.1 1.05 0 0.260 -0.02 1 units box
create_box 1 reg
neighbor 1.65e-3 bin
neigh_modify delay 0
#Material properties
fix m1 all property/global youngsModulus peratomtype 1.0e7
fix m2 all property/global poissonsRatio peratomtype 0.45
fix m3 all property/global coefficientRestitution peratomtypepair 1 0.3
fix m4 all property/global coefficientFriction peratomtypepair 1 0.5
fix m5 all property/global coefficientRollingFriction peratomtypepair 1 0.01 # The optional rolling friction model is activated
via rolling_friction = 'cdt'
pair_style gran/hertz/history rolling_friction cdt tangential_damping on
pair_coeff * *
timestep 0.000005
fix 1 all nve/sphere
fix 2 all gravity 9.81 vector 0.0 0.0 -1.0
fix cad all mesh/surface/stress file 10.5mm_10der.stl type 1
fix drum_move3 all move/mesh mesh cad viblin axis 0 0 1 order 1 amplitude 0.001 phase 0 period 0.04
fix granwalls all wall/gran/hertz/history mesh n_meshes 1 meshes cad rolling_friction cdt

tangential_damping on
fix pts1 all particletemplate/sphere 1 atom_type 1 density constant 2700 radius constant 0.01331912
fix pdd1 all particledistribution/discrete 1 1 pts1 #region for insertion
region factory block 0.075 0.25 0.014 0.24 0.28 0.555 units box
fix insertion all insert/rate/region seed 42 distributiontemplate pdd1 nparticles 10000000 particlerate 8538
insert_every 10000 all_in yes vel constant 0.0 0.0 -1 region factory
#thermo settings

compute 1 all erotate/sphere
thermo_style custom step atoms ke c_1 vol
thermo 1000
thermo_modify lost ignore norm no
compute_modify thermo_temp dynamic yes
run 1
dump dmp all custom 1000 post/dump*.liggghts id type radius mass x y z ix iy iz vx vy vz fx fy fz omegax omegay omegaz
diameter tqx tqy tqz
dump dumpstress all mesh/gran/VTK 1000 post/dump*.vtk stress cad
run 4000000 upto
unfix insertion

```

Şekil 3.1. LIGGGHTS için hazırlanan örnek bir simülasyon kodu

dump1000.liggghts	2/20/2017 10:32 AM	LIGGGHTS File	74 KB
dump1000.vtk	2/20/2017 10:32 AM	VTK File	2,487 KB
dump2000.liggghts	2/20/2017 10:32 AM	LIGGGHTS File	74 KB
dump2000.vtk	2/20/2017 10:32 AM	VTK File	2,487 KB
dump3000.liggghts	2/20/2017 10:32 AM	LIGGGHTS File	74 KB
dump3000.vtk	2/20/2017 10:32 AM	VTK File	2,487 KB
dump4000.liggghts	2/20/2017 10:32 AM	LIGGGHTS File	74 KB
dump4000.vtk	2/20/2017 10:32 AM	VTK File	2,488 KB
dump5000.liggghts	2/20/2017 10:32 AM	LIGGGHTS File	74 KB
dump5000.vtk	2/20/2017 10:32 AM	VTK File	2,487 KB
dump6000.liggghts	2/20/2017 10:32 AM	LIGGGHTS File	74 KB
dump6000.vtk	2/20/2017 10:32 AM	VTK File	2,487 KB
dump7000.liggghts	2/20/2017 10:32 AM	LIGGGHTS File	74 KB
dump7000.vtk	2/20/2017 10:32 AM	VTK File	2,487 KB
dump8000.liggghts	2/20/2017 10:32 AM	LIGGGHTS File	74 KB
dump8000.vtk	2/20/2017 10:32 AM	VTK File	2,487 KB
dump9000.liggghts	2/20/2017 10:32 AM	LIGGGHTS File	74 KB
dump9000.vtk	2/20/2017 10:32 AM	VTK File	2,487 KB
dump10000.liggghts	2/20/2017 10:32 AM	LIGGGHTS File	74 KB

Şekil 3.2. Simülasyon sonucu elde edilen veri dosyaları

Şekil 3.3'te görüleceği üzere, LIGGGHTS, her bir simülasyon zaman aralığında her bir tanenin yarıçapı, konumu, hızı, ivmesi, açılma hızı, vb. verileri üretmektedir. Bu tez kapsamında, eleme işlemi için gerçekleştirilen simülasyonlarda üretilen verilerin ve veri dosyalarının değerlendirilmesi gerekmektedir. Örneğin, 10 saniyelik bir simülasyon işleminin 10^{-5} saniye mertebesinde simülasyon zaman aralığında yapılması ve her 100 adımda veri dosyasının oluşturulması durumunda 10,000 adet veri dosyasının değerlendirilmesi gerekmektedir. Bu değerlendirme sırasında, her bir tanenin eleğin hangi ürününe (elek-altı veya elek-üstü akışa) gittiğinin belirlenmesi, elek üzerinde durma zamanının hesaplanması ve elek ürünlerinin tane boyu dağılımlarının belirlenmesi amacıyla bu veri dosyalarının taranması gereklidir. Bu amaçla MS Visual Studio programı kullanılarak ek bir program yazılmıştır. Bu sayede, simülasyon sonuç dosyalarından yukarıdaki veriler elde edilebilmektedir.

3.2 3-Boyutlu Elek Modellerinin Hazırlanması

Yukarıda belirtildiği üzere, herhangi bir AEY simülatöründe olduğu gibi, LIGGGHTS'ta da simülasyonların gerçekleştirilmesi için, 3 boyutlu çizimlere ihtiyaç duyulmaktadır. Bu aşamada, herhangi bir CAD çizim yazılımı kullanılarak öncelikle belirlenen ölçülere sahip eleğin çiziminin yapılması ve daha sonra bu çizimin STL

(Stereo-Lithography) dosyası olarak LIGGGHTS yazılımına tanıtılması gerekmektedir.

```
ITEM: TIMESTEP
1000
ITEM: NUMBER OF ATOMS
426
ITEM: BOX BOUNDS ff ff ff
-0.1 1.05
0 0.26
-0.02 1
ITEM: ATOMS id type radius mass x y z ix iy iz vx vy vz fx fy fz omegax omegay omegaz diameter tqx tqy tqz
286 1 0.00141421 3.19888e-005 0.0799462 0.0214904 0.286612 0 0 0 0 -1.04903 0 0 -0.00031381 0 0 0 0.00282843
0 0 0
425 1 0.00141421 3.19888e-005 0.141004 0.0215954 0.28108 0 0 0 0 1.02568 -0.727438 0 0 -0.00031381 -483.033 0 0
0.00282843 0 0 0
289 1 0.00141421 3.19888e-005 0.163182 0.0176189 0.279341 0 0 0 0 0.201645 -0.777633 0 0 -0.00031381 -463.48 0
0 0.00282843 0 0 0
82 1 0.00236643 0.000149877 0.0930051 0.062422 0.278006 0 0 0 0 -1.04903 0 0 -0.00147029 0 0 0 0.00473286 0 0
0
391 1 0.00141421 3.19888e-005 0.0870493 0.0628527 0.286787 0 0 0 0 -1.04903 0 0 -0.00031381 0 0 0 0.00282843
0 0 0
219 1 0.00141421 3.19888e-005 0.0823853 0.078357 0.288712 0 0 0 0 -1.04903 0 0 -0.00031381 0 0 0 0.00282843 0
0 0
167 1 0.00141421 3.19888e-005 0.183311 0.0674108 0.279544 0 0 0 0 -1.04903 0 0 -0.00031381 0 0 0 0.00282843 0
0 0
69 1 0.00236643 0.000149877 0.183791 0.0775232 0.288575 0 0 0 0 -1.04903 0 0 -0.00147029 0 0 0 0.00473286 0 0
0
95 1 0.00236643 0.000149877 0.225492 0.0732874 0.286713 0 0 0 0 -1.04903 0 0 -0.00147029 0 0 0 0.00473286 0 0
0
417 1 0.00141421 3.19888e-005 0.202846 0.0925298 0.286885 0 0 0 0 -1.04903 0 0 -0.00031381 0 0 0 0.00282843 0
0 0
68 1 0.00236643 0.000149877 0.197767 0.127545 0.27792 0 0 0 0 -1.04903 0 0 -0.00147029 0 0 0 0.00473286 0 0 0
```

Şekil 3.3. LIGGGHTS yazılımının sağladığı dosyaların içeriğinden bir örnek

Bu şekilde, farklı tasarım değişkenlerine (elek boyutları, elek açıklığı, elek eğimi, vb.) sahip olacak şekilde elek çizimleri gerçekleştirilmiştir. Hedeflenen çizimin ağ yapısı, sistemin tüm ayrıntılarını içermelidir. Bununla beraber ağ yapısındaki hücre sayısının mümkün olduğu kadar düşük olması, simülasyon süresi açısından önem taşımaktadır. Çünkü simülatör tanelerin birbiri ile çarpışmasının yanı sıra, tanelerin ve elek yüzeyinin çarpışmasını da kontrol etmekte ve gereğinden fazla hücre sayısı simülasyonun tamamlanması için gereken süreyi oldukça uzatabilmektedir.

AEY ile gerçekleştirilen simülasyon çalışmalarının gerçeğe uygunluğunun sınanabilmesi amacıyla gerçekleştirilen laboratuvar çalışmalarında, Hacettepe

Üniversitesi Maden Mühendisliği Laboratuvarlarında bulunan 90×30 cm boyutlarında pilot ölçekli elek kullanılmıştır. AEY simülasyonlarında da bu eleğin birebir eşdeğerinin 3 boyutlu çizimleri hazırlanmıştır. Farklı elek açıklıklarında doğrulama deneylerinin gerçekleştirilmesi amacıyla farklı açıklıklara sahip poliüretan elek yüzeyleri Panel Poliüretan Ltd. Şti. firmasından temin edilmiştir.

Pilot eleğin mevcut besleme sistemi, bir bunker ve bir titreşimli besleyiciden oluşmaktadır ve saatte 20 tona kadar kuru besleme sağlayabilmektedir. Şekil 3.4'te pilot ölçekli elek ve besleme sistemi verilmektedir. Şekil 3.5 'te ise bu pilot eleğin ölçülerinde hazırlanan 3 boyutlu çizim gösterilmektedir.

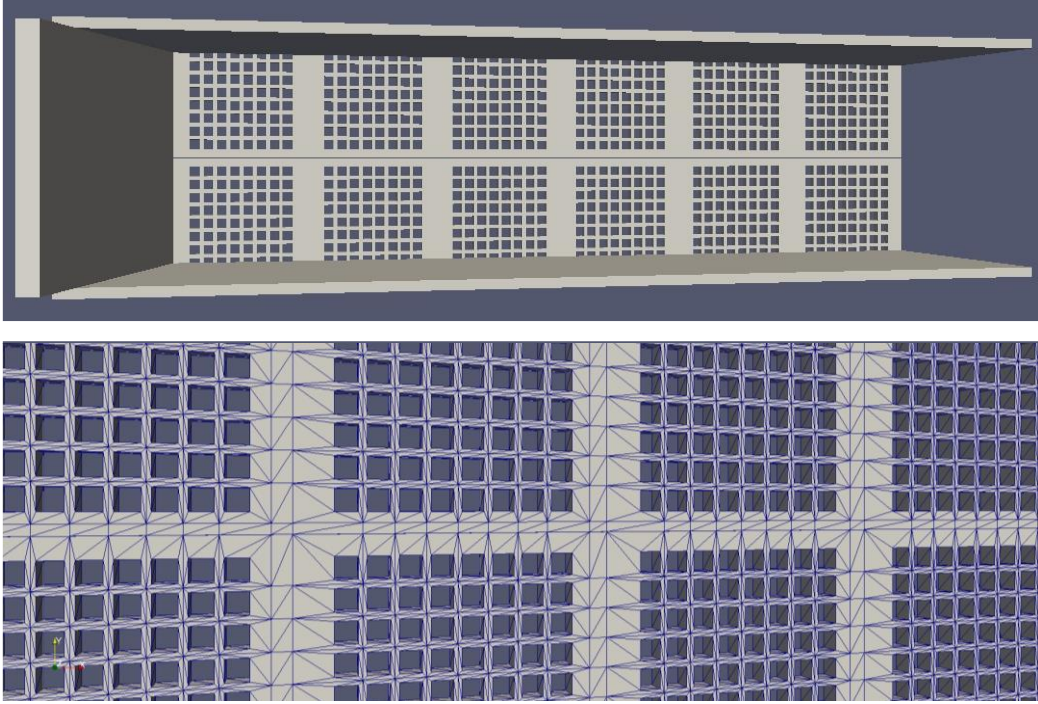


Şekil 3.4. Pilot ölçekli elek ve besleme sistemi

3.3 Simülasyon Koşulları ve Parametrelerin Belirlenmesi

3 boyutlu elek tasarımlarının hazırlanmasını takiben, simülasyonlarda kullanılacak malzeme özelliklerinin ve model parametrelerinin belirlenmesi gerekmektedir. Bu doğrultuda belirlenen tane şekli, boyut dağılımı, tanelerin fiziksel özellikleri (

yoğunluk, sürtünme katsayısı vd.), zaman aralığı, eleğin titreşim şekli, vb. bilgiler Çizelge 3.1’de verilmektedir.



Şekil 3.5. Pilot ölçekli eleğin 3 boyutlu çizimi (üst), elek yüzeyindeki hücre yapısı (alt)

Çizelge 3.1. Simülasyonlarda kullanılan ortak veriler

Tane boyu (mm)	26.6	20.6	15.7	12.1	9.5	6.7	4.7	2.8
Ortak 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 mm							
Elek yüzeyinin boyutları (mm)	300x900							
Tanelerin yoğunluğu (kg/m ³)	2700							
Tanelerin şekli	Küresel ve küresel olmayan							
Elastisite modülü (N/m ²)	5x10 ⁷							
Poisson oranı	0.45							
Geri sıçrama katsayısı	0.3							
Sürtünme katsayısı	0.5							
Sürtünme katsayısı (yuvarlanma)	0.01							
Zaman aralığı (s)	5x10 ⁻⁶							
Simülasyon süresi (s)	25-35 s aralığında							

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

Tasarım Değişkenleri:

- Elek yüzeyinin boyutları
- Elek eğimi
- Elek açıklığının boyutu ve şekli
- Yüzey alanı
- Titreşim genliği
- Titreşim sıklığı (frekans)
- Titreşim yönü

İşlem Değişkenleri:

- Besleme akış hızı
- Besleme tane boyu dağılımı
- Tane şekli

Simülasyon çalışmalarında incelenen değişkenlerin değer aralıkları Çizelge 3.2’te özetlenmektedir. Bazı simülasyonlarda küresel taneler ve diğerlerinde ise küresel olmayan taneler kullanılmıştır (Çizelge 3.2). Küresel olmayan taneler, küre kümeleri kullanılarak modellenmiştir.

Çizelge 3.2. Simülasyonlarda kullanılan parametrelerin değerleri

İşlem değişkeni	Test edilen aralıklar	Tane şekli
Besleme tonajı	5, 10, 15, 20 ton/saat	Küresel ve Küresel olmayan
Elek eğimi	5°, 10°, 15°, 20°	Küresel
Titreşim genliği	3, 4, 5, 6 mm	Küresel ve Küresel olmayan
Titreşim frekansı	15, 20, 25, 30 Hz	Küresel ve Küresel olmayan
Titreşim açısı	30°, 45°, 60°, 90°, 120°, 150°	Küresel
Elek yüzeyinin uzunluğu	Bkz.Bölüm 4.5	Küresel olmayan
Elek yüzeyinin açıklık oranı (%)	%11, %16 ve %22	Küresel olmayan
Tane şekli		Küresel ve Küresel olmayan
Açıklık şekli		Küresel olmayan
Tane yoğunluğu		Küresel olmayan

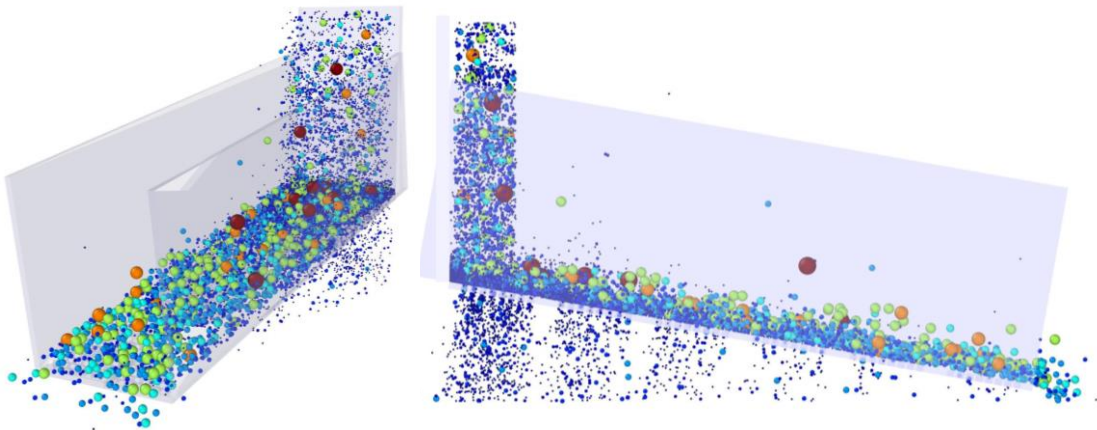
Besleme tane boyu dağılımının etkilerinin incelenmesi amacıyla farklı besleme tane boylarına sahip malzemeler için simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Simülasyonlar sırasında kullanılan tane boyu dağılımları, elek altına geçmesi gereken fraksiyonların dağılımları farklı olacak şekilde belirlenmiştir. Bu sayede özellikle,

elek açıklığına yakın malzeme miktarlarının eleme işlem verimine etkileri incelenmiştir (Çizelge 3.3).

Çizelge 3.3. 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

Bir simülasyon, tanelerin besleyicide yaratılması ve eleğe beslenmesi ile başlamaktadır. Elek yüzeyine ulaşan taneler ya elek yüzeyini geçerek elek-altı ürüne ya da elek boyunca ilerleyerek elek-üstü ürüne gitmektedir. Tanelerin hareket verilerinin değerlendirilmesi için sistemin dengeye gelmesi önem taşımaktadır. Denge durumunda, sisteme beslenen tanelerin sayısı ve kütlesi, sistemden çıkan tanelerin (alt akımdan çıkan taneler + üst akımdan çıkan taneler) sayısı ve kütlesine eşit olmalıdır. Şekil 3.6'da, gerçekleştirilen simülasyonların sonucunda üretilen bir animasyonun görüntüsü verilmektedir.



Şekil 3.6. Simülasyon sonucu üretilen bir animasyon örneği

3.4 Simülasyonlarda Kullanılan Tanelerin Şekli

Simülasyon çalışmalarının ilk aşamasında, küresel tanelerle simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. (Şekil 3.6). Küresel taneler, simülasyon süresi açısından oldukça önemli avantajlar sağlamaktadır. İlerleyen aşamalarda ise, küresel olmayan taneler ile simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Eleme işleminde iri ve ince tanelerin ayrımında önemli parametrelerden birinin tane şekli olduğu düşünüldüğünde, bu simülasyonlar sayesinde, hem eleme işleminin daha gerçekçi bir simülasyonunun yapılması, hem de küresel ve şekilsiz tanelerin simülasyon sonuçlarının karşılaştırılması mümkün olmuştur. Elde edilen sonuçlar, literatürde rastlanılan ve küresel tanelerin kullanıldığı simülasyon sonuçlarının doğruluğu hakkında da fikir edinilmesini sağlamaktadır.

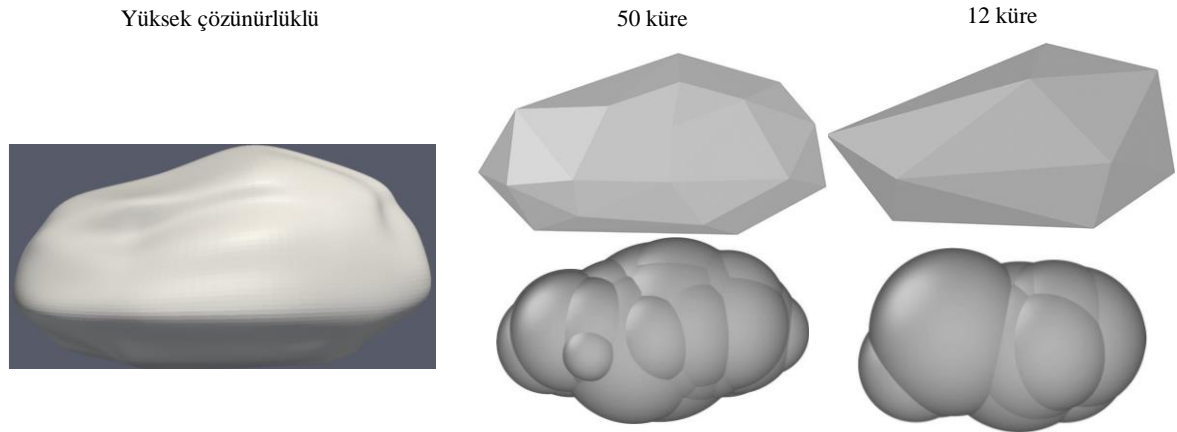
Şekilsiz tanelerin oluşturulmasında LIGGGHTS yazılımının desteklediği çoklu küreler (küre kümeleri, “multispheres” ya da “sphere clumps”) yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntem, küreleri birleştirerek, yeni ve küresel olmayan tane şablonlarının oluşturulması prensibine dayanmaktadır. Küre kümelerini oluşturabilmek için kürelerin merkezlerinin koordinatları ve yarıçaplarını içeren bir metin dosyasının LIGGGHTS’a tanımlanması gerekmektedir. Buna örnek olarak, 12 farklı küreden oluşan küresel olmayan bir tanenin metin dosyası Şekil 3.7’de verilmektedir.

Küresel olmayan taneler gerçeğe daha yakın sonuçlar sağlamakla beraber, bu taneyi oluşturan küre kümesinde bulunan küre sayısının çok olması durumunda simülasyonların tamamlanması haftalar mertebesinde süre almaktadır. Dolayısıyla bir şekilsiz taneyi ifade eden küre kümesinde bulunan küre sayılarının da 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 geliştirilmiştir. Bu program, gösterilen ayrıntılı ve yüksek çözünürlüklü 3B bir tane modelini alarak, istenen çözünürlüğe göre köşe sayılarını azaltmakta ve daha sonra elde edilen modelin içini kürelerle doldurmaktadır. Bu program algoritmasında, sadeleşmiş tane şeklinin herhangi bir köşesinde bir küre yaratılmaktadır 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 edilmektedir. Algoritma, ürettiği kürelerin koordinat

ve yarıçap bilgisini içeren bir metin dosyasını LIGGGHTS programına uyumlu bir formatta kaydetmektedir (Şekil 3.7). Yüksek çözünürlüklü bir tanenin basitleştirilmesi ve bir küre kümesine dönüştürülmesinin Şekil 3.8’de gösterilmektedir.

x	y	z	r
-0.500156200	-1.873375200	-2.000216800	0.800
1.229540230	-2.302005050	-1.693092980	1.130
-0.276153500	-2.422600000	-1.637936250	1.250
1.862473000	-1.819714500	-1.728541500	0.750
0.7189539220	-2.109412320	-1.856776980	1.270
1.381628450	-1.955212630	-1.994090990	0.990
1.0586900690	-2.299911240	-1.707771390	1.110
-0.500121020	-2.098505590	-1.961168675	0.945
-0.824466580	-2.206122980	-2.117634340	0.860
1.524490520	-2.202460200	-1.73079440	1.080
0.8405864050	-2.379344990	-1.869341560	1.130
1.154489675	-2.661599650	-1.855007125	0.975

Şekil 3.7. 12 farklı küreden oluşan bir şekilsiz taneye ait metin dosyası



Şekil 3.8. Yüksek çözünürlüklü bir tane şeklinden daha basit bir şekilsiz tanenin elde edilme süreci

Şekil 3.8’de görüleceği üzere, yüksek çözünürlüklü bir tane modeli, fazla sayıda küre ile daha ayrıntılı bir şekilde ifade edilebilmektedir. AEY simülasyonlarında on binlerce tanenin kullanıldığı düşünüldüğünde, örneğin her biri 50 küre içeren bir küre

kümesinin simülasyonu – diğer model parametrelerine de bağlı olmak üzere – haftalar sürebilmektedir. Aynı tane modeli, daha az sayıda küre içeren bir küre kümesi ile ifade edildiğinde, tane şeklinin ayrıntıları bir miktar yitirmekle beraber, bu tanelerle yapılan simülasyonlar günler mertebesinde tamamlanabilmektedir. Diğer taraftan, tane modelinin bütün ayrıntılarının yansıtılması eleme işlemi açısından çok büyük fark arz etmemekte, tane modelinin ana hatlarının tanımlanabilmiş olması tatmin edici doğrulukları sağlayabilmektedir. Bu nedenlerden dolayı, gerçekleştirilen simülasyonlarda 12 ve 5 adet küreden oluşan küre kümeleri kullanılmıştır. Küresel ve şekilsiz (küre-kümeleri) taneler ile elde edilen simülasyon sonuçlarının karşılaştırılmasına yönelik çalışmalar sonraki bölümlerde verilmektedir.

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.

4 SİMÜLASYON SONUÇLARI VE VERİLERİN DEĞERLENDİRİLMESİ

Simülasyonlar sonucunda sağlanan veriler, simülasyonun her zaman adımında her tanenin konumu, hızı, açısal hızı, vb. büyük miktarda verinin elde edilmesini sağlar ve bu veriler uygun yazılımlar vasıtasıyla görselleştirilebilmektedir. Bu tez kapsamında, bu amaçla OVITO ve PARAVIEW yazılımları kullanılmıştır. Bu yazılımlar, ayırık 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-üstüne giden ürünlerin tane boyu dağılımları ve konumlarına ait verilerin üretilmesi için MS Visual Studio yazılımı kullanılarak bir program kodu hazırlanmıştır. Bu program sayesinde, simülasyonda üretilen veriler kullanarak sistemin kararlı duruma gelip gelmediği, bir tanenin alt akıma mı yoksa üst akıma mı gittiği, alt akım ve üst akımlarının 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 Eş. 25 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$E = \frac{c-f}{c(1-f)} \quad (25)$$

Burada, f , beslemede bulunan kesme boyundan iri malzeme miktarını, ve c , 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.

Eleme işleminin verimliliği ve keskinliği partiyon eğrisinin orta kısmının eğimine bağlıdır. Eğrinin eğimi beslemedeki malzemenin %75 ve %25 oranının üst akıma giden noktaları temel alarak ifade edilebilmektedir. Bunlar sırayla d_{75} ve d_{25} olarak adlandırılır ayrıca eleğin kesme boyutu d_{50} olarak ifade edilmektedir. Elemanın

verimliliği ya da başka bir değişle "Imperfection" aşağıdaki eşitliklr hesaplanmaktadır;

$$I = \frac{d_{75} - d_{25}}{2d_{50}} \quad (26)$$

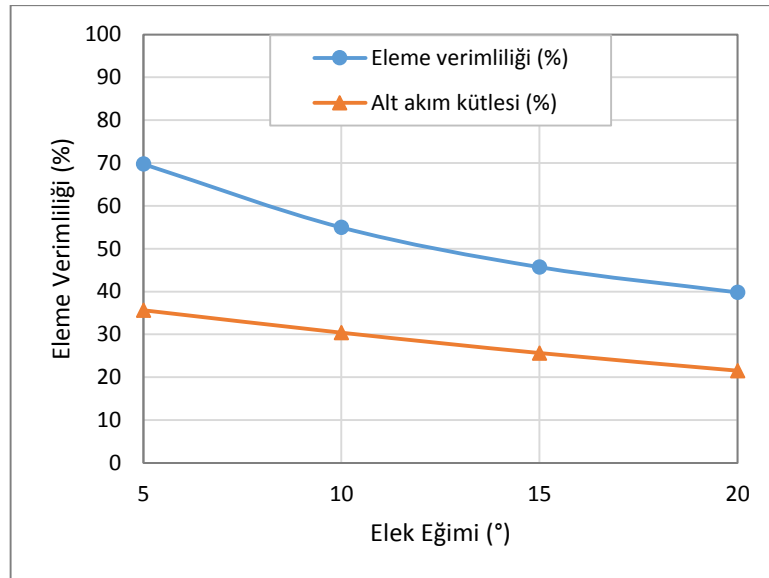
Eleme iřleminin keskinlięi ve dolayısıyla eleme verimlilięi Imperfection deęerinin artıřıyla dūřmektedir

Buna ek olarak, alt akıma geęen tanelerin elek yūzeyinde ortalama kalma sūreleri (OKS) de hesaplanmıřtır.

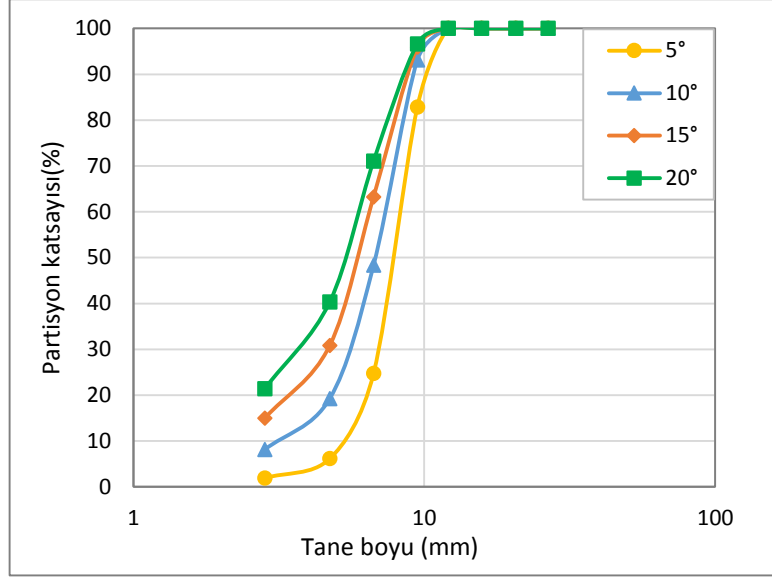
4.1 Elek Eğiminin Etkilerinin İncelenmesi

Elek eęiminin eleme performansı ve ilgili faktörlere olan etkilerini incelemek amacıyla 5°, 10°, 15° ve 20° elek eęimlerinde simūlasyonlar geręekleřtirilmiřtir. Bu simūlasyonlarda, cevher űzellikleri, eleme geometrisi, eleme hareketi, vb. dięer simūlasyon parametreleri sabit tutulmuřtur. Yapılan simūlasyonların űrnek kodu EK1.1'de verilmektedir.

řekil 4.1'da, elek eęimindeki deęiřimin, elek performansı ve alt akıma giden tanelerin yūzdesi űzerine etkileri gűsterilmektedir. Ayrıca řekil 4.2'da farklı elek eęimlerinde elde edilen partisyon eęrileri verilmektedir.



řekil 4.1. Elek eęiminin elek verimlilięi ve alt akımın kūtleesi űzerine etkileri



Şekil 4.2. Farklı elek eğimlerinde elde edilen partisyon eğrileri

Şekil 4.1’da görüleceği üzere, elek verimliliği ve alt akımın kütlesi elek eğiminin artışıyla azalmaktadır. Şekil 4.2’da verilen partisyon 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.

Çizelge 4.1, partisyon eğrilerini temel alarak eleme kesme boyutlarını ve Imperfection değerlerini göstermektedir. Hesaplamalara göre, eleme kesme boyutu elek eğiminin artışıyla düşmektedir ayrıca Imperfection değeri elek eğiminin artışıyla artmaktadır.

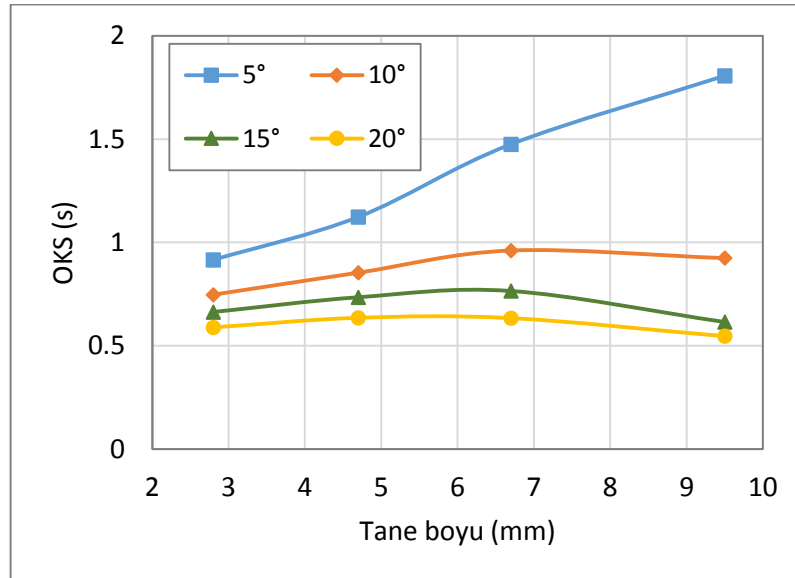
Çizelge 4.1. Elek eğimine bağlı eleme kesme boyutları ve Imperfection değerleri

Elek Eğimi (°)	d_{25} (mm)	d_{50} (mm)	d_{75} (mm)	Imperfection
5	6.7	7.85	9	0.15
10	5.2	6.8	8.2	0.22
15	4.1	5.9	7.5	0.29
20	3.15	5.4	7	0.36

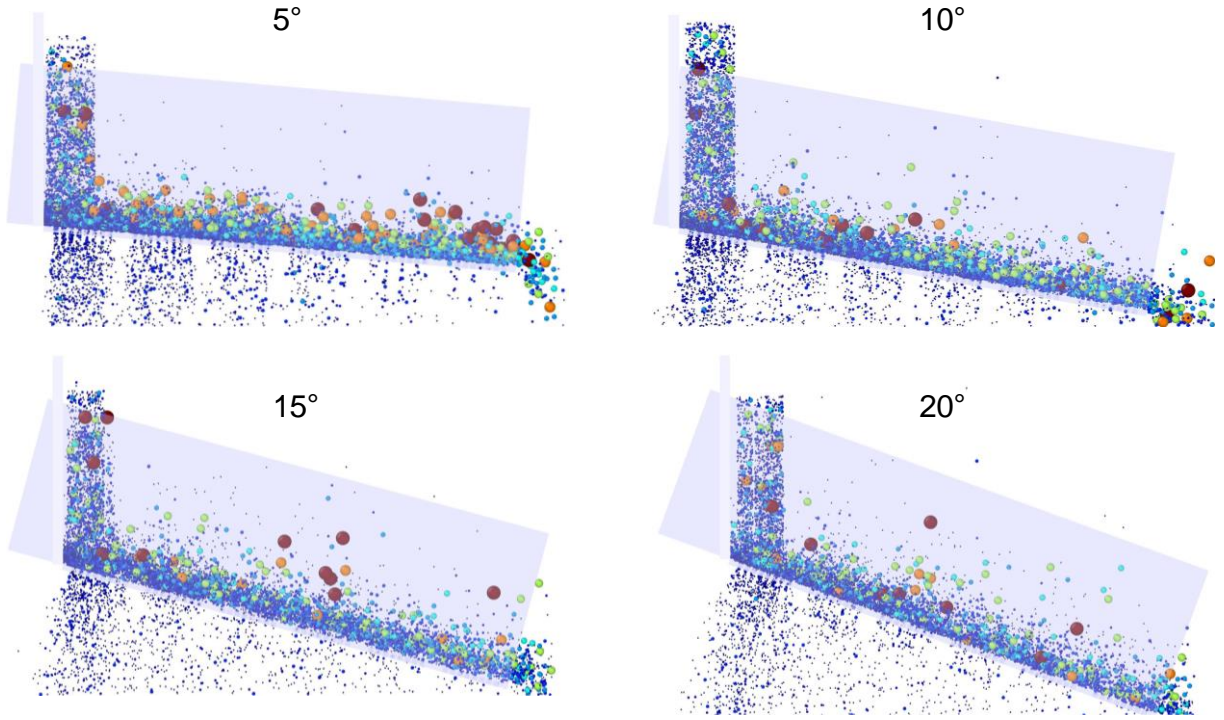
Şekil 4.3, elek altına geçen tanelerin farklı elek eğimlerindeki ortalama kalma sürelerini göstermektedir. Beklendiği gibi düşük elek eğimleri, özellikle 5° lik elek eğiminde tanelerin ortalama kalma süreleri (OKS) değerleri daha yüksektir. Bu da alt akıma geçen tanelerin düşük elek eğimlerinde elek 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.

Farklı elek yüzeyi eğimlerinde tanelerin elek yüzeyindeki dağılım şekli ve oluşan yatağın durumunu incelemek amacıyla simülasyonların 15. saniyesinden ekran görüntüleri Şekil 4.4'de verilmektedir. Şekilde görüleceği üzere elek yüzeyinin eğiminin artışıyla elek yüzeyindeki yatak kalınlığı azalmaktadır. Yatak kalınlığının artışıyla eleme işleminin verimliliği artarken eleğin kapasitesi düşmektedir. Dolayısıyla elek yüzeyinin eğiminin kontrolüyle, belirli bir ürün hedefi için, optimum verimlilik ve kapasiteyi elde etmek mümkündür.



Şekil 4.3. Tanelerin farklı elek eğimlerindeki ortalama kalma süreleri



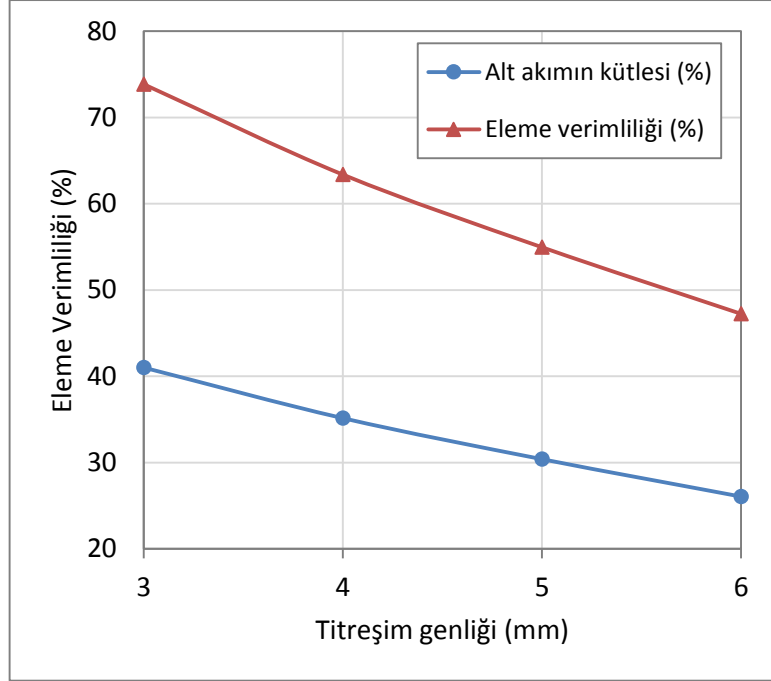
Şekil 4.4. Çeşitli elek yüzeyi eğimleriyle yapılan simülasyonların 15. saniyedeki ekran görüntüleri

4.2 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 4.5'te titreşim genliğinin eleme performansı ve alt akıma giden tanelerin miktarı üzerine etkileri verilmektedir ve Şekil 4.6'da ilgili partiyon eğrileri gösterilmektedir. Ayrıca Çizelge 4.2, partiyon eğrilerini temel alarak hesaplanan eleme kesme boyutları ve Imperfection değerlerini özetlemektedir.

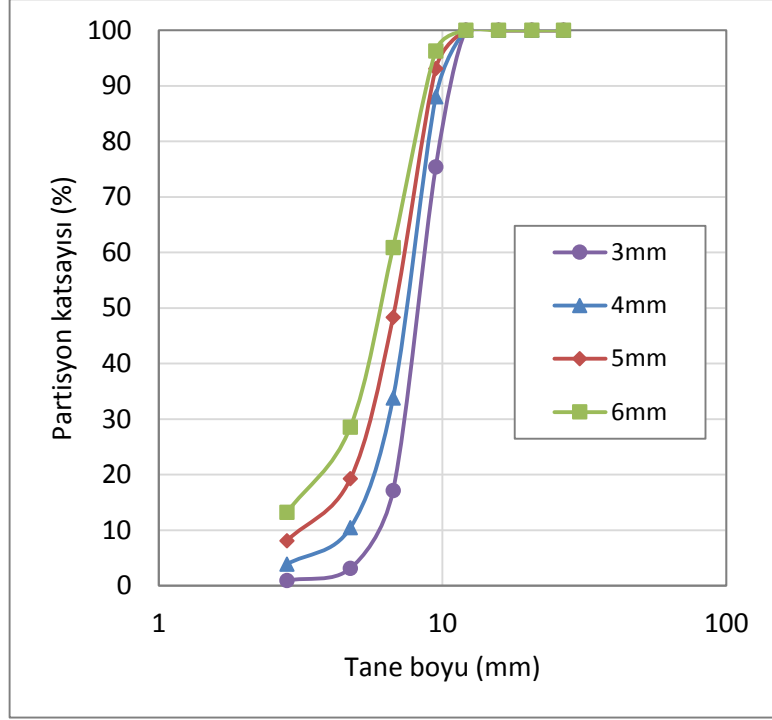
Şekil 4.5 ve Şekil 4.6'te görüleceği üzere, eleme verimliliği ve alt akımın miktarı titreşim genliğiyle azalmaktadır. Yüksek titreşim genliklerinde tanelerin elek yüzeyiyle çarpışma olasılığı düşmektedir ve bu nedenle alt akıma geçmesi gereken tanelerin bir kısmı elenmeksizin elek yüzeyini terk etmektedir ve dolayısıyla eleme verimliliğini düşürmektedir. Partiyon eğrilerinde görüldüğü gibi 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 vurgulamaktadır.

Şekil 4.7’de, tanelerin farklı titreşim genliklerindeki ortalama kalma süreleri verilmektedir. Görüleceği üzere, ince tanelerde (2.8, 4.7 ve 6.7 mm), tanelerin ortalama kalma süreleri arasında çok yüksek bir fark bulunmamaktadır.



Şekil 4.5. Titreşim genliğinin eleme verimliliği ve alt akımın kütlesine etkileri

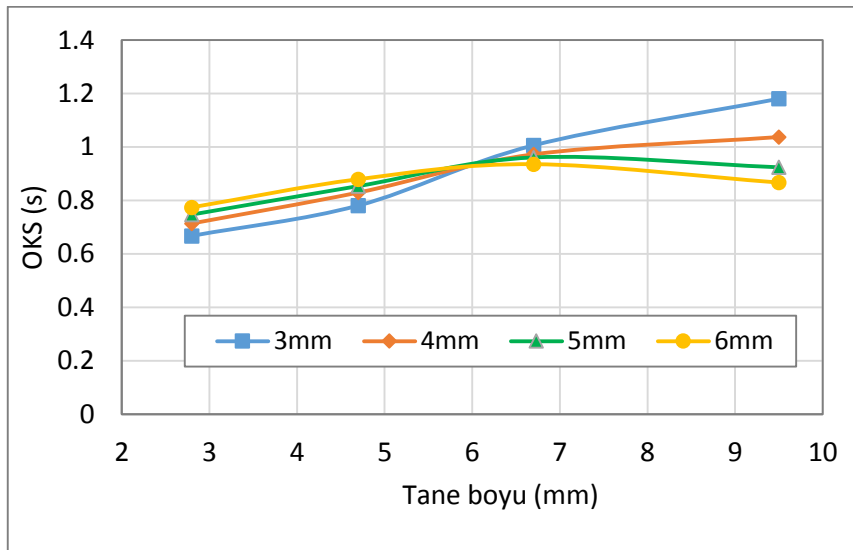
Ancak iri tanelerde (9.5mm), düşük titreşim genliğiyle elenen tanelerin ortalama kalma süresi daha yüksektir. Bu da titreşim genliğinin bir tasarım parametresi olarak eleklerin daha verimli çalıştırılması konusunda oldukça önemli olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.6. Farklı titreşim genliklerinde elde edilen partiyon eğrileri

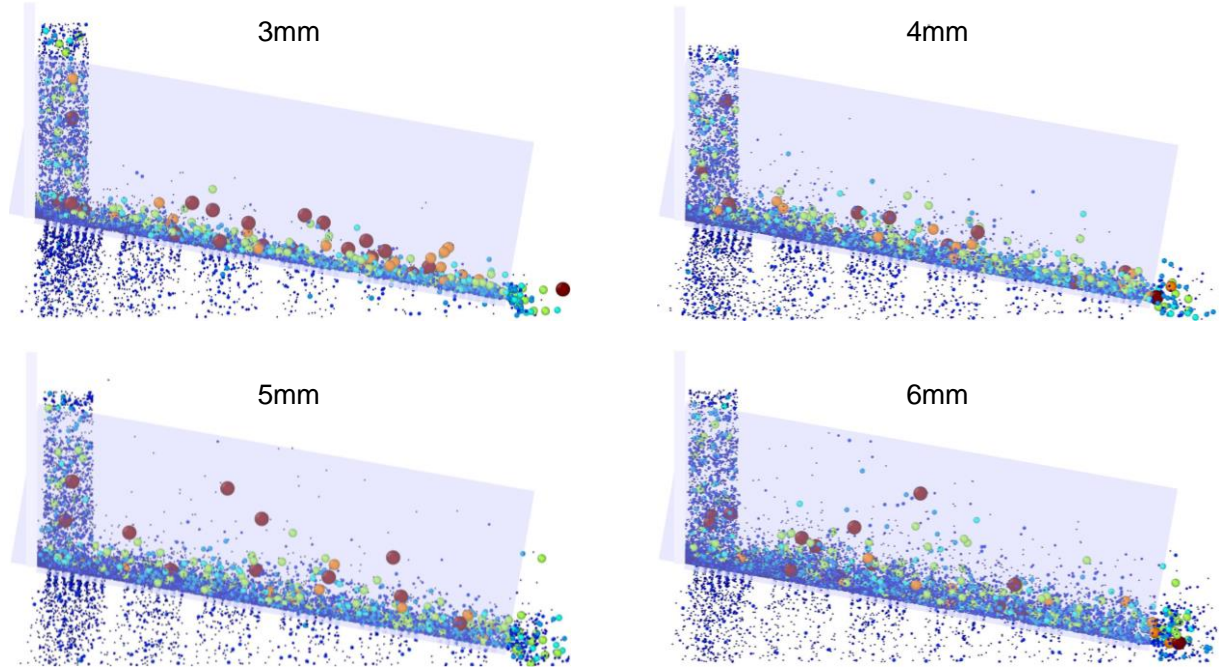
Çizelge 4.2. Titreşim genliğine bağlı eleme kesme boyutları ve Imperfection değerleri

Titreşim Genliği (mm)	d ₂₅ (mm)	d ₅₀ (mm)	d ₇₅ (mm)	Imperfection
3	7.15	8.2	9.45	0.14
4	6.15	7.5	8.65	0.17
5	5.25	6.8	8.15	0.21
6	4.4	6.05	7.65	0.27



Şekil 4.7. Tanelerin farklı titreşim genliklerindeki ortalama kalma süreleri

Farklı titreşim genliklerinde yapılan simülasyonların 20. saniyelerinin ekran görüntüleri incelendiğinde (Şekil 4.8), genliğin artışıyla elek yüzeyindeki yatağın yoğunluğunun düşüşü görülmektedir. 3mm'lik titreşim genliğinde çalışan elekte, tanelerin daha küçük sıçramaları sonucunda, taneler ve elek yüzeyinin arasındaki mesafe daha düşük olmaktadır ve tanelerin elek yüzeyiyle çarpışma olasılığı ve dolayısıyla alt akıma geçişi olasılığı artmaktadır. Diğer taraftan, yüksek genlik değerlerinde yatak kalınlığının az olmasına karşın, tanelerin daha yükseğe sıçraması sonucunda taneler ve elek yüzeyinin arasındaki mesafe artmakta ve tanelerin elek yüzeyiyle çarpışma olasılığı azalmaktadır. Bunun sonucunda da, eleme verimliliği düşmektedir.

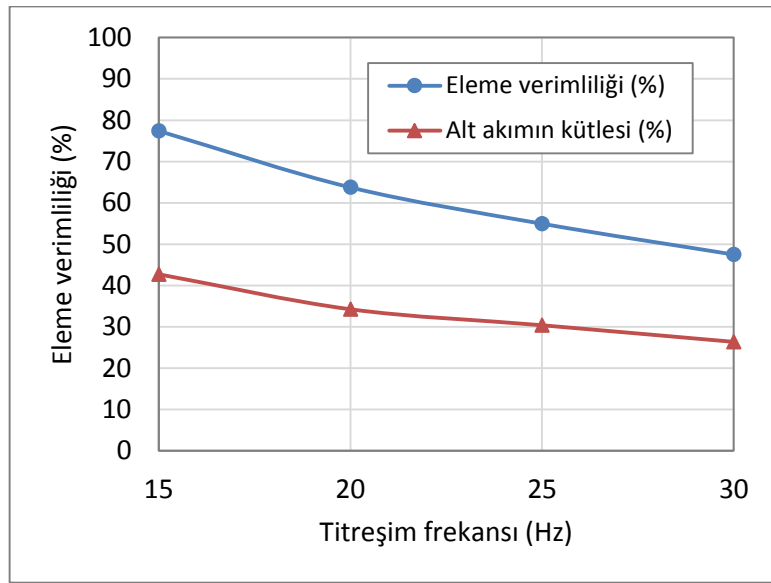


Şekil 4.8. Farklı titreşim genliklerinde yapılan simülasyonların 20. saniyedeki ekran görüntüleri

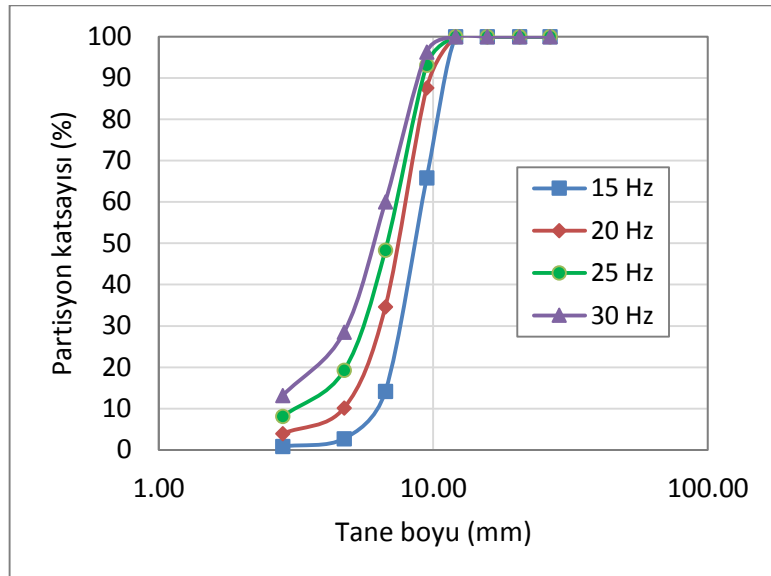
4.3 Titreşim Frekansının Etkilerinin İncelenmesi

Titreşim sıklığının eleme performansı ve ilgili faktörlere olan etkilerini incelemek amacıyla 15, 20, 25 ve 30 Hz'lik titreşim sıklıklarında, diğer parametreler sabit tutularak simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Şekil 17'de eleme verimliliği ve alt akımın kütesinin titreşim frekansına bağlı olarak değişimini göstermektedir. Şekil 18'de ise farklı titreşim sıklıklarında yapılan eleme işlemlerinin partiyon eğrileri verilmektedir. Şekil 4.9 ve Şekil 4.10'de görüleceği üzere eleme verimliliği ve alt akımın kütlesi titreşim sıklığının artışıyla düşmektedir. Yüksek titreşim sıklıklarında tanelerin elek

yüzeyle çarpışma olasılığı düşmektedir ve bu nedenle alt akıma geçmesi gereken tanelerin bir kısmı elenmeksizin elek yüzeyini terk etmektedir. Sonuç olarak eleme verimliliğinde azalma ortaya çıkmaktadır. Partisyon eğrileri ve hesaplanan d_{50} değerleri (Çizelge 4.3), 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 4.9. Titreşim frekansının eleme verimliliği ve alt akımın kütlesine etkileri

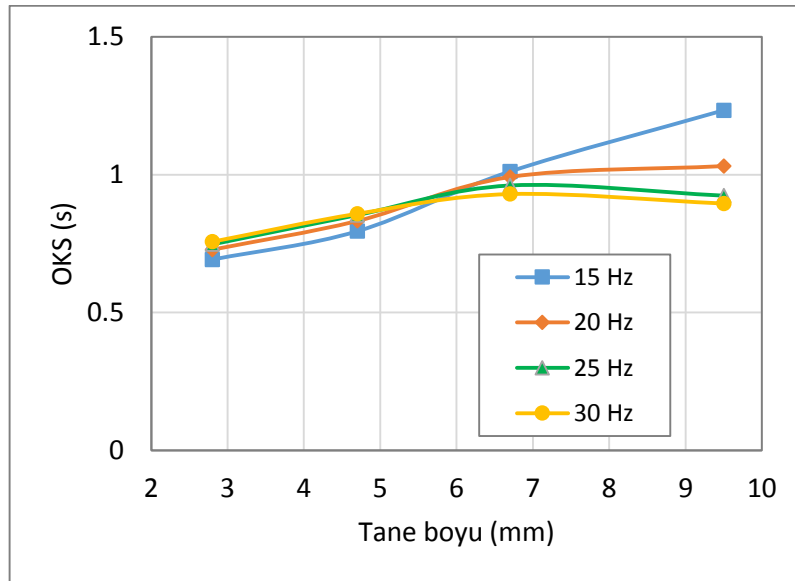


Şekil 4.10. Farklı titreşim sıklıklarında elde edilen partiyon eğrileri

Şekil 19'da, 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 eleklerin daha verimli çalıştırmak konusunda etkin olduğunu göstermektedir.

Çizelge 4.3. Titreşim frekansına bağlı eleme kesme boyutları ve Imperfection değerleri

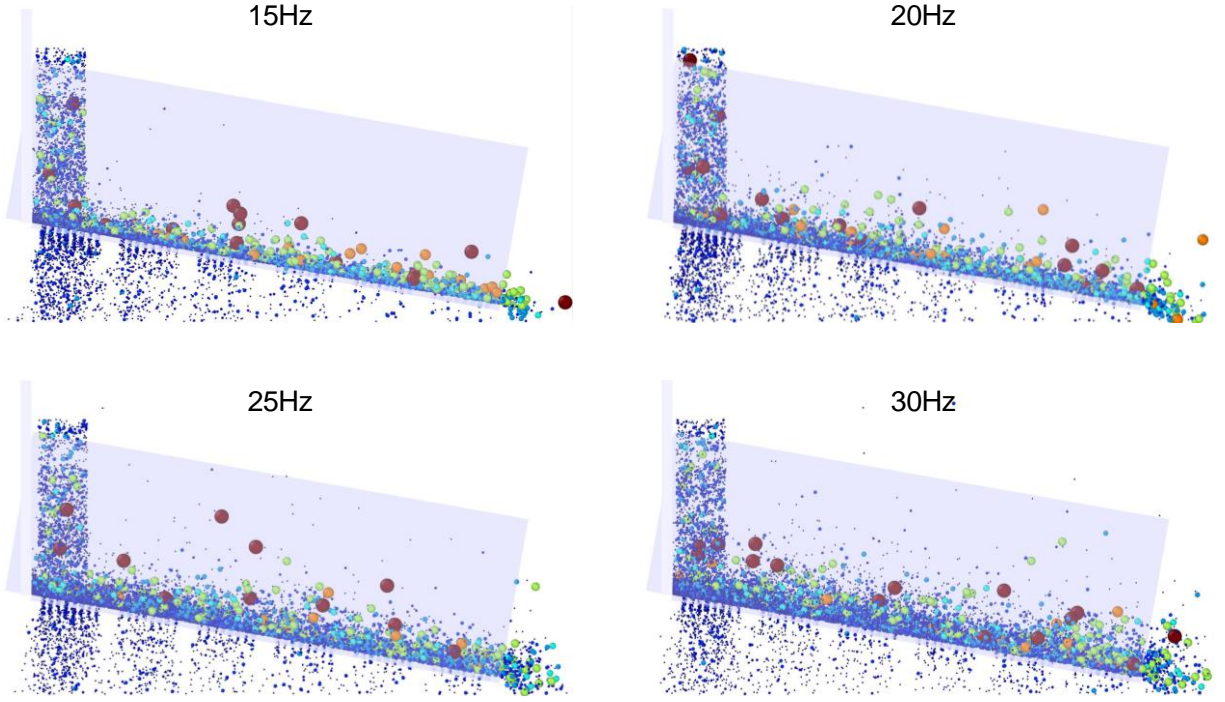
Titreşim Frekansı (Hz)	d ₂₅ (mm)	d ₅₀ (mm)	d ₇₅ (mm)	Imperfection
15	7.3	8.6	10	0.16
20	6.05	7.45	8.65	0.17
25	5.2	6.8	8.15	0.22
30	4.4	6.1	7.65	0.27



Şekil 4.11. Elek açıklığından ince tanelerin farklı titreşim sıklıklarında elek üzerinde ortalama kalma süreleri

Farklı titreşim frekanslarında yapılan simülasyonların 20.saniyelerinin ekran görüntüleri incelendiğinde (Şekil 4.12), frekansın artışıyla elek yüzeyindeki yatak kalınlığının düşüşü görülmektedir. 15 Hz'lik titreşim frekansıyla çalışan elekte ve tanelerin çok yükseğe sıçramaması sebebiyle tanelerin elek yüzeyiyle çarpışma olasılığı ve dolayısıyla alt akıma geçişi daha yüksek oranda olmaktadır. Diğer

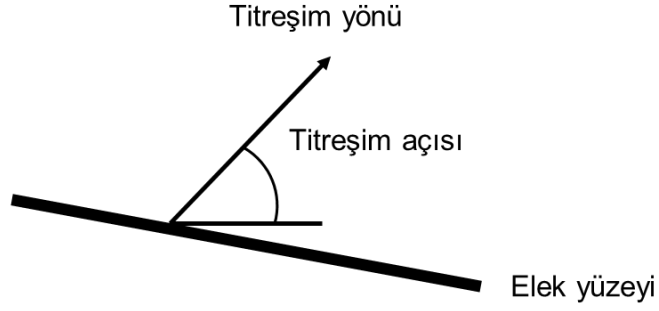
taftan, yüksek frekanslarda yatak kalınlığı azalmakla beraber, yüksek sıçramalar sebebiyle, tanelerin elek yüzeyiyle çarpışma olasılığı azalmakta ve eleme verimliliği düşmektedir.



Şekil 4.12. Farklı titreşim frekanslarında yapılan simülasyonların 20. saniyedeki ekran görüntüleri

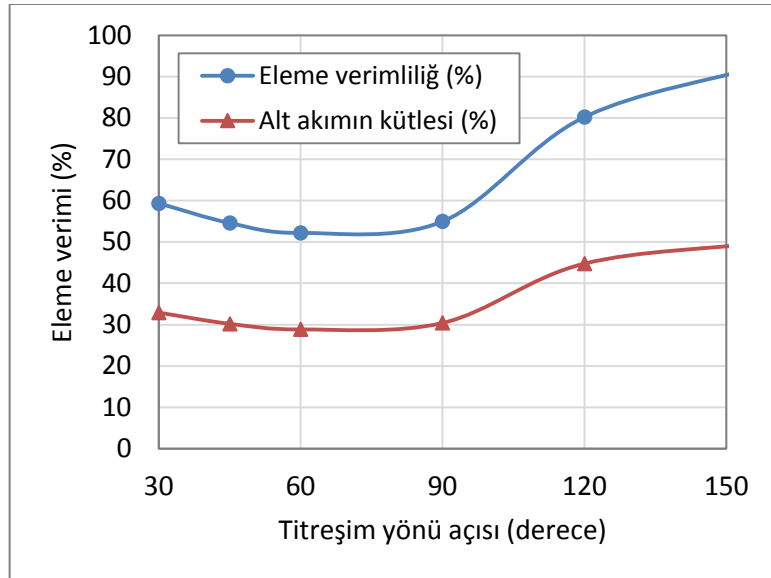
4.4 Titreşim Yönünün Etkilerinin İncelenmesi

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 4.13). Bu simülasyonlarda eleğin titreşim hareketi doğrusal olarak uygulanmıştır.

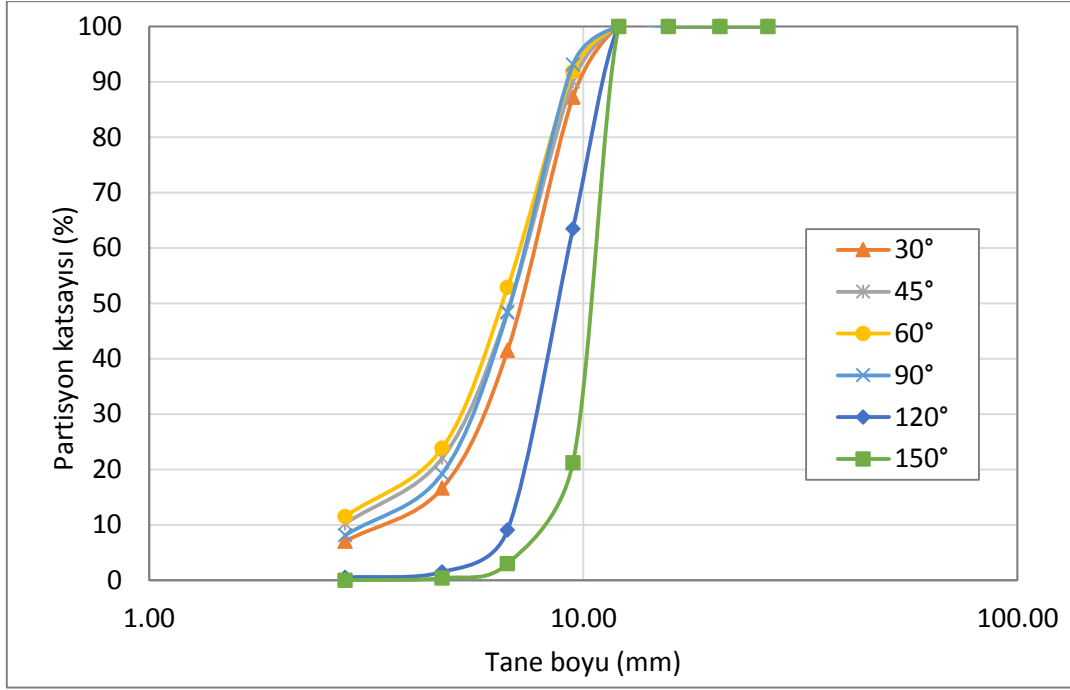


Şekil 4.13. Titreşim yönünün şematik gösterimi

Eleme veriminin ve alt akımın kütlesinin titreşim yönüne bağlı olarak değişimi Şekil 4.14’de verilmektedir. Şekil 4.15’te ise farklı titreşim yönlerinde yapılan eleme işlemlerinin partiyon eğrileri sunulmaktadır ve Çizelge 4.4, hesaplanmış eleme kesme noktaları ve Imperfection değerlerini göstermektedir.



Şekil 4.14. Titreşim yönünün eleme verimliliği ve alt akımın kütlesindeki etkileri



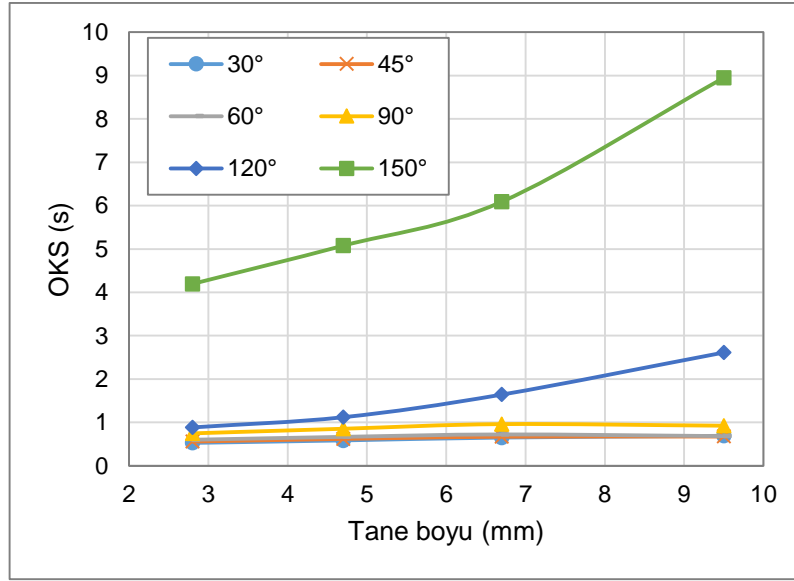
Şekil 4.15. Farklı titreşim yönlerinde yapılan simülasyonlardan elde edilen partiyon eğrileri

Görüleceği üzere, 30° ile 90° titreşim yönü aralığında elek verimliliği, alt akımın kütlesi 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 neredeyse ideal eleme eğrisine uymaktadır ve elek açıklığına yakın boyutlu tanelerin yaklaşık %80'i elek altına geçmektedir.

Çizelge 4.4. Titreşim yönüne bağlı eleme kesme boyutları ve Imperfection değerleri

Titreşim Yönü (°)	d ₂₅ (mm)	d ₅₀ (mm)	d ₇₅ (mm)	Imperfection
150	9.65	10.45	11.1	0.07
120	7.55	8.75	10.15	0.15
90	5.55	7.2	8.6	0.21
60	5.25	6.8	8.2	0.22
45	5.05	6.8	8.3	0.24
30	4.85	6.5	8.1	0.25

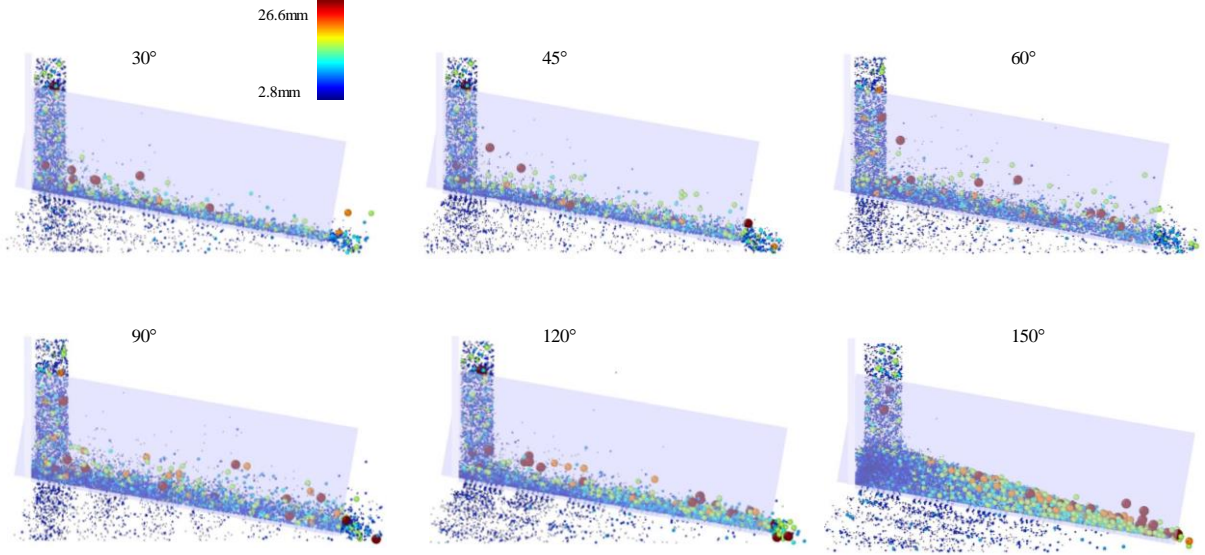
Şekil 4.16'te elek açıklığından ince tanelerin farklı titreşim yönü değerlerinde elek üzerinde ortalama kalma süreleri verilmektedir. Görüldüğü gibi düşük açılarda (30° - 90°) birbirine yakın olan ortalama kalma süresi değerleri, daha yüksek açılarda (120° ve 150°) oldukça yükselmektedir. 150° açılı 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 tasarlamasında bu iki parametrenin birlikte değerlendirilmesi gerekmektedir.



Şekil 4.16. Tanelerin farklı titreşim yönlerindeki ortalama kalma süreleri.

Şekil 4.17, farklı titreşim yönlerinde yapılan simülasyonların 20.saniyelerinin ekran görüntülerini göstermektedir. Eleme verimliliği, partiyon eğrileri ve tanelerin elek yüzeyinde ortalama kalma süreleri ile uyumlu olarak yatak kalınlığı 120° ve 150° titreşim yönlerinde diğer yönlere 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.



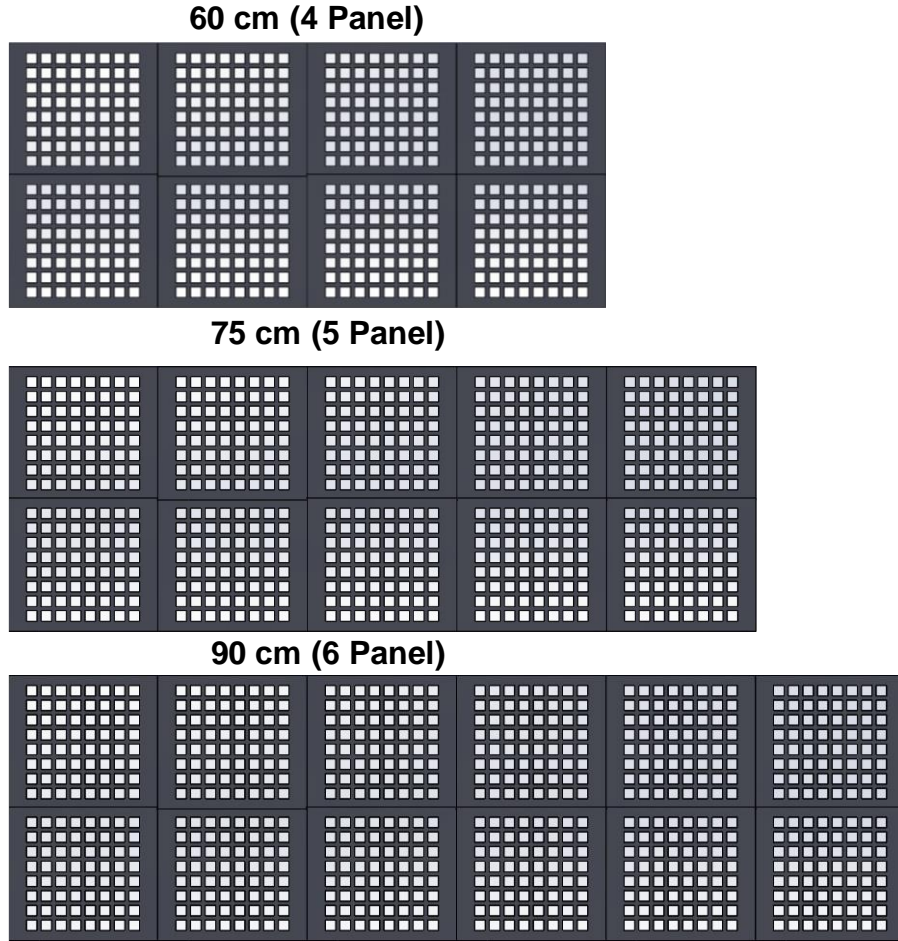
Şekil 4.17. Farklı titreşim yönlerinde yapılan simülasyonların 20. saniyedeki ekran görüntüleri

4.5 Elek Yüzeyi Boyutlarının Etkilerinin İncelenmesi

Elek yüzeyinin boyutları özellikle de elek yüzeyinin boyu (akış yönü) tanelerin elek yüzeyinde kalma süresi ve yatak kalınlığını belirleyerek, eleme performansını etkilemektedir. Eleğin uzun olması durumunda tanelerin elek üzerinde durma zamanı artacağından, elek altına geçme olasılıkları da artacak ve daha verimli eleme mümkün olacaktır. Bu etkileri incelemek amacıyla üç farklı elek yüzeyi boyuna sahip olan elekler çizimleri tasarlanmıştır. Bu doğrultuda, bir panel 15 cm olmak üzere, akış yönünde sırasıyla 4 (60cm), 5 (75cm) ve 6 (90cm) panele sahip elekler oluşturulmuştur (Şekil 4.18). Bu çizimlerle yapılan simülasyonlarda sadece elek boyunun etkilerinin incelenmesi amacıyla besleme tane boyu dağılımı, besleme tonajı, titreşim parametreleri vb. simülasyon koşulları sabit tutulmuştur.

Simülasyon sonuçları, tahmin edileceği üzere, eleme performansı ve alt akımın kütlesinin elek boyunun artmasıyla arttığını göstermektedir (Şekil 4.19). Diğer taraftan, görüleceği üzere, elek boyunun artmasına bağlı verimlilik artışının eğimi giderek azalmakta ve bir maksimuma ulaşmaktadır. Bu da her eleme işleminin optimum bir elek boyunda yapılması gerektiğini göstermektedir. Şekil 4.20, farklı elek uzunluklarında yapılan eleme işlemlerinin partiyon eğrilerini göstermektedir. Partiyon eğrileri, daha uzun eleklerin daha verimli çalıştığını vurgulamaktadır ve ayrıca eleğin kesme noktası elek uzunluğunun artışıyla artmaktadır (Çizelge 4.5).

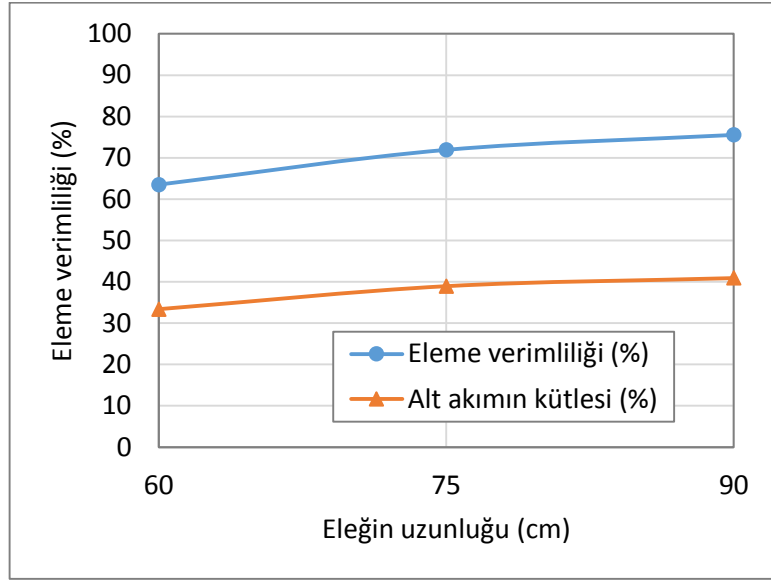
Partisyon katsayılarının arasındaki en belirgin fark orta boylu (4.7 ve 6.8mm'lik) tanelerde gözükmemektedir bu da elek uzunluğunun ince taneler ve elek açıklığına yakın olan tanelerin eleme performansındaki etkinin görece az olduğunu göstermektedir.



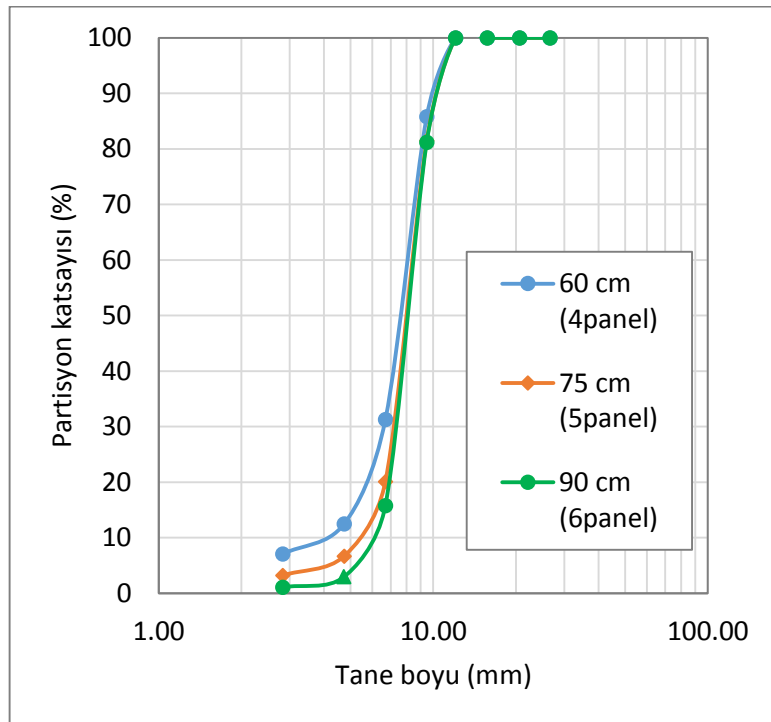
Şekil 4.18. Farklı uzunluklara sahip elek yüzeyleri

Şekil 4.21 farklı elek uzunluklarında yapılan simülasyonlarda, elek üstü ve elek altı akımlarına giden tanelerin elek yüzeyinde ortalama kalma sürelerini (OKS) göstermektedir. Elek altı akımında bulunan taneler incelendiğinde, ortalama kalma süresinin tane boyu ile arttığı görülmektedir. Ayrıca elek uzunluğunun artmasıyla, OKS'nin de arttığı ve bu artışın özellikle elek açıklığına daha yakın olan tane boyları (9.5mm) ve orta boya sahip (6.8mm) taneler için daha belirgin olduğu ortaya çıkmaktadır. Elek üstü akımına giden tanelerde ise, en ince tane boyuna sahip tanelerin en düşük OKS değerine sahip olduğu ve tane boyunun artışıyla birlikte OKS değerlerinin arttığı görülmektedir. Elek açıklığına yakın olan tane boylarında maksimum değerine ulaşan OKS, tane boyu artışıyla düşme eğilimi göstermektedir.

Elek uzunluğunun artışıyla birlikte bu eğrilerin şeklinde bir farklılık oluşmamakta, eğriler sadece daha yüksek OKS değerlerine doğru kaymaktadır.



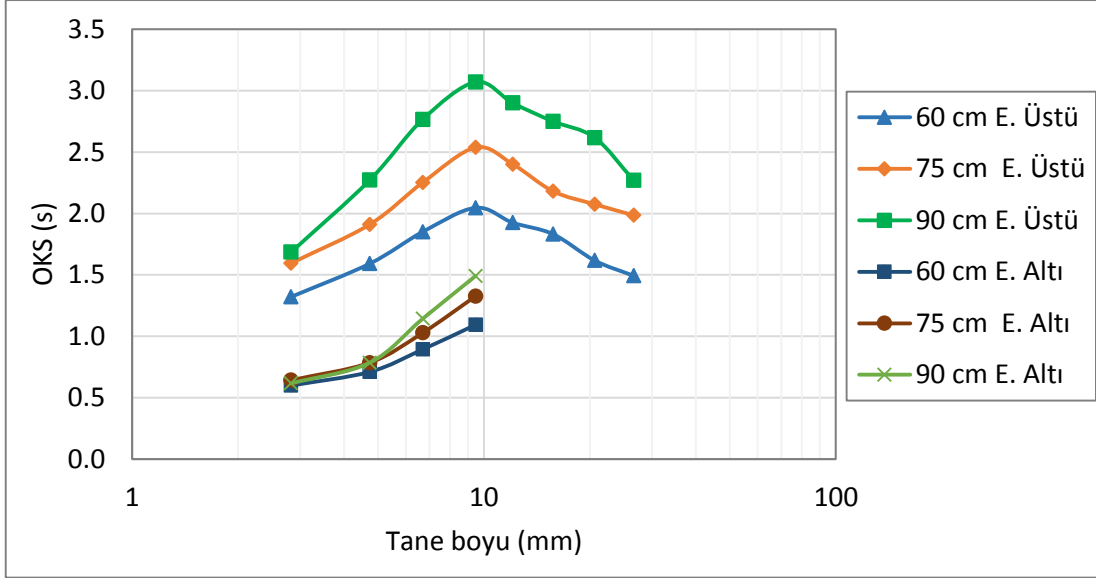
Şekil 4.19. Elek uzunluğunun eleme verimliliği ve alt akımın kütlesine etkileri



Şekil 4.20. Farklı elek uzunluklarında yapılan simülasyonlardan elde edilen partisyon eğrileri

Çizelge 4.5. Çeşitli elek uzunluklarına hesaplanan kesme noktaları ve Imperfection değerleri

Eleğin Uzunluğu (cm)	d ₂₅ (mm)	d ₅₀ (mm)	d ₇₅ (mm)	Imperfection
60	6.25	7.60	8.80	0.17
75	6.95	8.00	9.10	0.13
90	7.15	8.10	9.10	0.12



Şekil 4.21. Farklı elek uzunluklarında yapılan simülasyonlarda elek üstü ve elek altı akıma giden tanelerin elek yüzeyinde ortalama kalma süreleri (OKS)

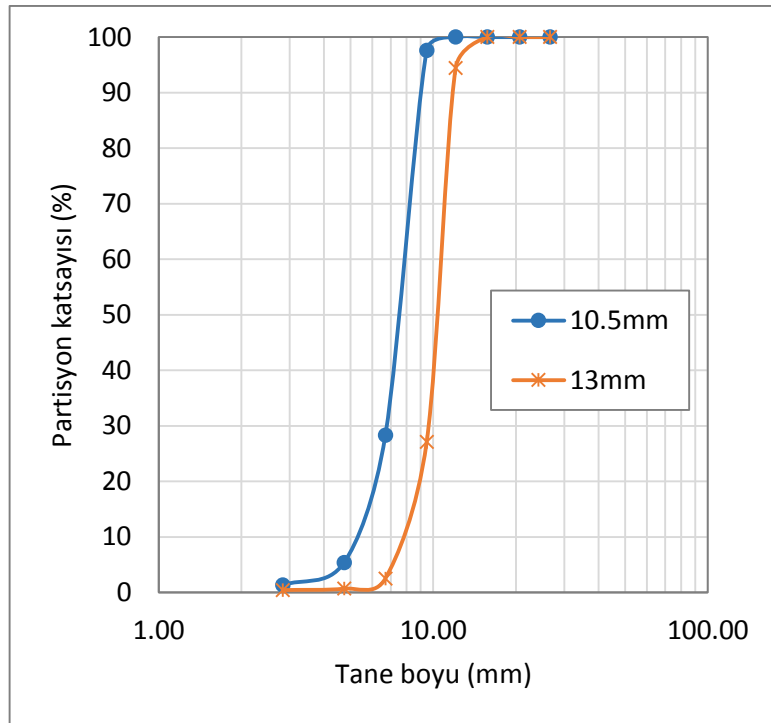
Elek uzunluğunun eleme verimi ve ürün özellikleri üzerine belirgin bir etkisi olduğu görülmektedir. Diğer taraftan, elek eninin sadece kapasite artırımı açısından önemli olduğu ve elek eninin artmasıyla eleğin kapasitesinin doğrusal artacağı bilinmektedir. Bu nedenle, elek eninin etkisinin incelenmesi amacıyla simülasyonlar gerçekleştirilmemiştir.

4.6 Elek Açıklığı Boyutunun Etkisinin İncelenmesi

Elek açıklığının boyutu etkisini araştırmak amacıyla 10.5 ve 13mm elek açıklığına sahip iki adet elek üzerinde; sabit tonaj, tane boyu dağılımı, eğim, yüzey boyutları ve titreşim özelliklerinde (yön, frekans ve genlik) simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Simülasyon sonuçlarına göre, 13mm açıklığa sahip eleme işleminde %77.38 eleme verimi ve %41.42 alt akım kütlesi elde edilmektedir. Diğer taraftan aynı koşullarda

çalıştırılan 10.5mm'lik eleğin eleme verimi ve alt akım kütlesi sırasıyla %68.32 ve %34.92 olmaktadır.

Şekil 4.22'da her iki eleğin partiyon eğrileri gösterilmektedir ve Çizelge 4.6, kesme noktaları ve Imperfection değerlerini göstermektedir. Beklendiği üzere, 13mm'lik eleğin partiyon eğrisinin biraz daha dik (daha düşük Imperfection) olmasının yanı sıra kesme boyundaki artış neticesinde sağa doğru kaymaktadır. 10.5mm eleğin kesme boyu 7.6mm ve 13mm'lik eleğin kesme boyu 10.4mm olarak hesaplanmıştır.

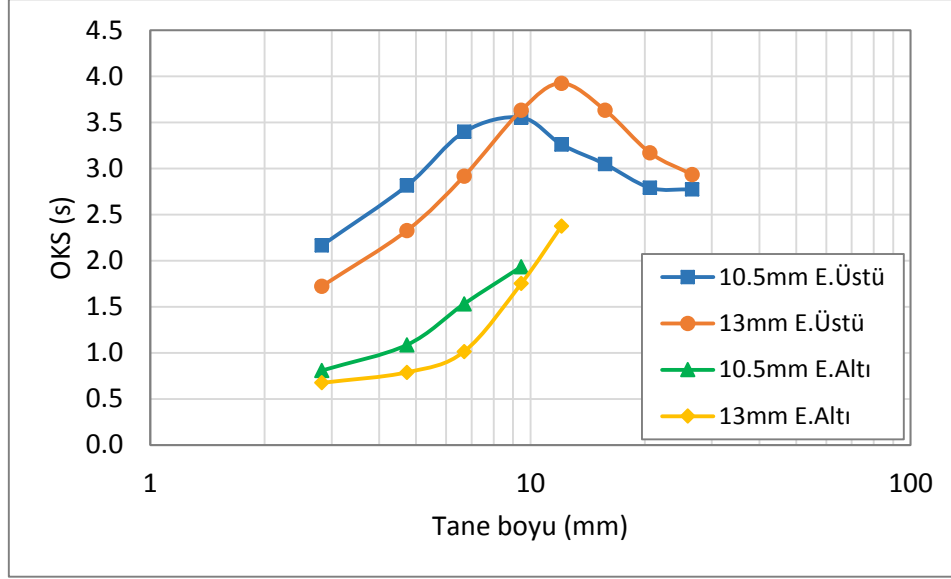


Şekil 4.22. Farklı elek açıklığına sahip eleklerin partiyon eğrileri

Çizelge 4.6. 10.5 ve 13mm elek açıklıklarına eleme kesme noktaları ve Imperfection değerleri

Elek Açıklığı (mm)	d ₂₅ (mm)	d ₅₀ (mm)	d ₇₅ (mm)	Imperfection
10.5	6.2	7.6	8.4	0.14
13	9.3	10.4	11.2	0.09

Elek üstü ve elek altı akımlarına giden tanelerin elek üzerinde ortalama kalma süreleri Şekil 4.23'de verilmektedir.



Şekil 4.23.Farklı elek açıklıklarında yapılan simülasyonlarda elek üstü ve elek altı akımlara giden tanelerin elek yüzeyinde ortalama kalma süreleri (OKS)

- 13mm'lik elekte, elek altı akımına giden taneler, 10mm'lik eleklerle karşılaştırıldığında, elek üzerinde daha kısa süre geçirerek elek altı akımına gitme şansı bulmaktadır. Bu durum elek verimliliğine doğrudan yansımaktadır.
- Elek üstü akımına giden taneler konusunda performans eğrisinde olduğu gibi 13mm'lik elekte ortalama kalma süresi eğrisi de sağ tarafa kaymaktadır. Ayrıca, ince taneler (2.8, 4.7 ve 6.7mm) daha kısa ortalama kalma sürelerine sahiptirler ama iri tanelerin (9.5, 12.1, 15.7, 20.6 ve 26.6mm) ortalama kalma süreleri daha yüksektir. Buda 13mm'lik elekte ince tanelerin daha kolay elenmesine rağmen iri tanelerin elek yüzeyinde daha fazla kalmalarının anlamına gelmektedir.

4.7 Elek Açıklığı Şeklinin Etkilerinin İncelenmesi

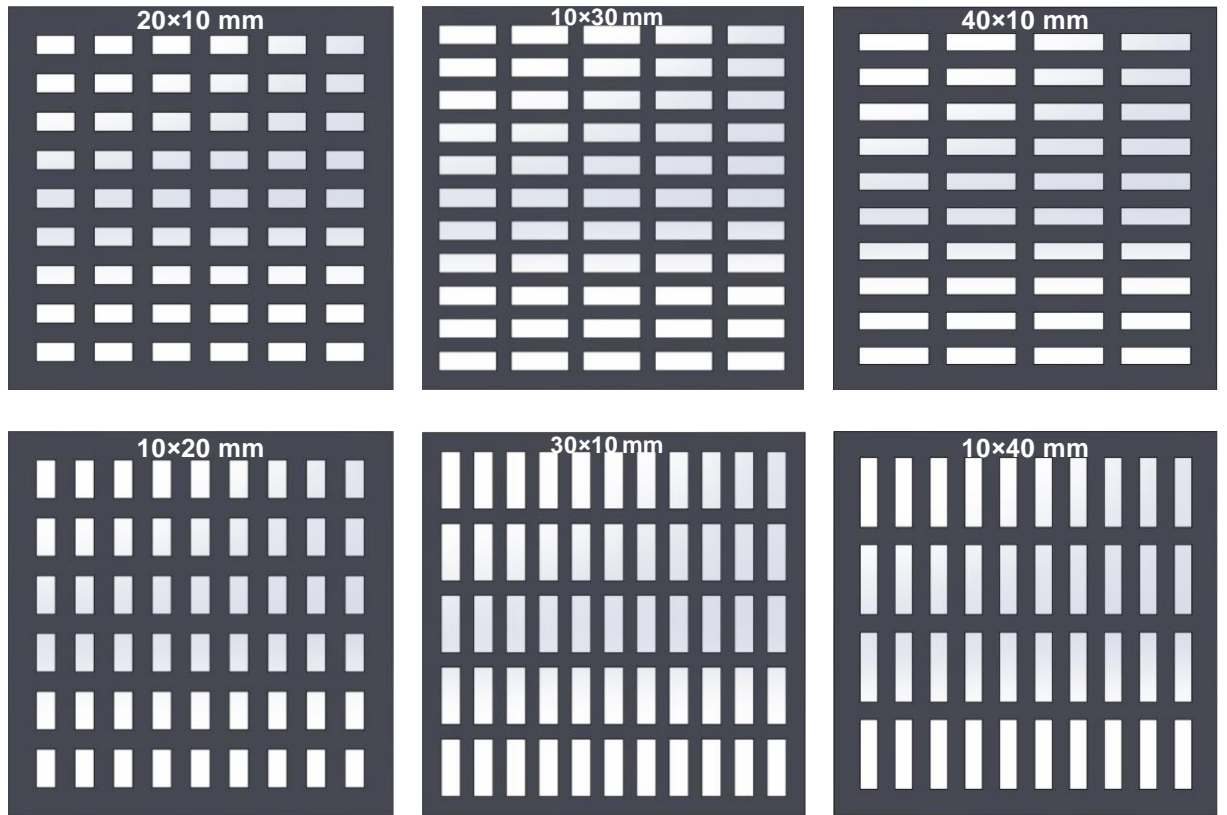
Elek açıklığının şeklinin eleme performansı üzerinde etkili olduğu bilinmektedir. Açıklık en/boy oranı daha yüksek olan elekler yüksek eleme verimliliği sağlamakta, en/boy oranı düşük olan açıklıklar ise yüksek kapasite sunmaktadır. Bu çalışmada, elek açıklığı şeklinin etkisinin sayısal olarak belirlenebilmesi amacıyla, farklı en/boy oranına sahip dikdörtgen açıklıklar için elek yüzeyleri tasarlanmıştır. Bu doğrultuda en/boy oranları 1/2, 2/1, 1/3, 3/1, 1/4 ve 4/1 olan açıklıklara sahip 6 adet elek çizimi hazırlanmıştır. Bu eleklerin açıklıklarının boyutları sırasıyla 10×20mm, 20×10mm,

10×30mm, 30×10mm, 10×40mm ve 40×10mm olarak belirlenmiştir. Tasarlanan elek yüzeylerinin bir panelinin şematik görünümü Şekil 4.24’de verilmiştir.

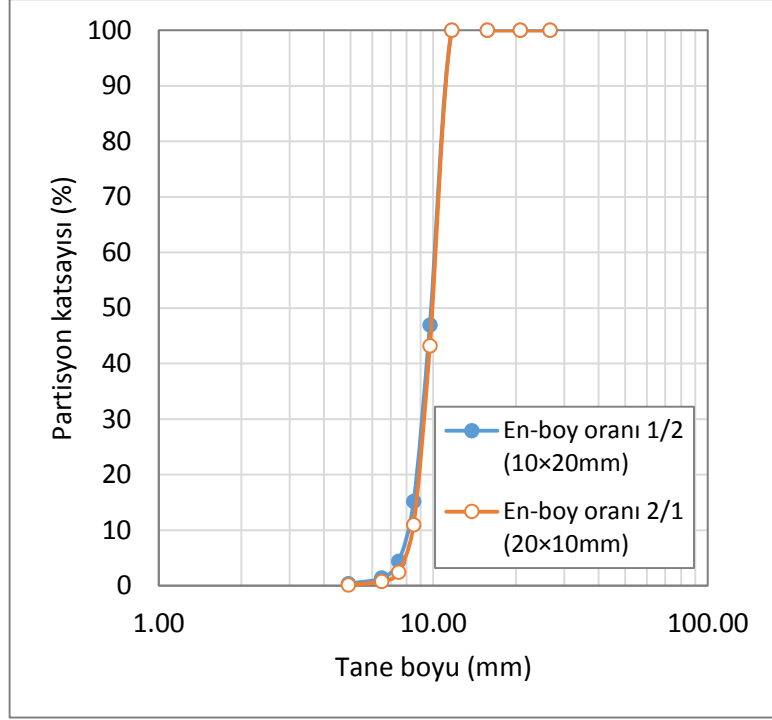
Besleme tonajı, besleme tane boyu dağılımı, besleme özellikleri, titreşim özellikleri, yüzey eğimi ve yüzey boyutları gibi parametreler sabit tutularak 6 farklı simülasyon gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen simülasyonların sonuçları aşağıda verilmektedir.

10×20mm ve 20×10mm eleklerin karşılaştırılması

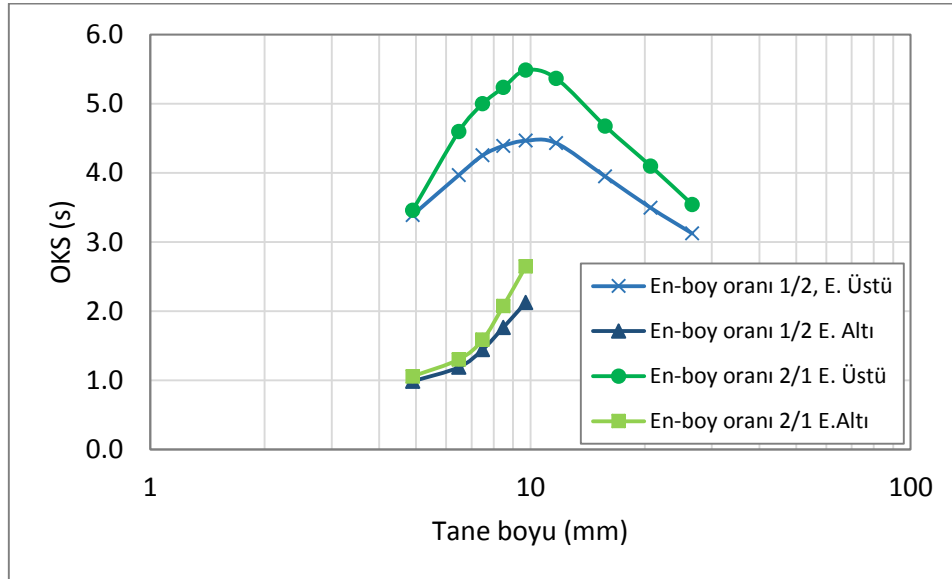
Simülasyon sonuçlarına göre, elek açıklığının en/boy oranı 1/2’den 2/1’e değişmesi durumunda elde edilen partiyon eğrileri Şekil 4.25’te verilmektedir. Her iki koşulda elde edilen partiyon eğrileri benzer gibi görünmekle beraber, en/boy oranının 1/2’den 2/1’e değişmesi durumunda, eleme verimliliği %72.98’den %75.38’e çıkmakta ve alt akımın kütlesi %43.40’tan %45.54’e yükselmektedir. Tanelerin alt akım ve üst akıma geçmeden önce elek yüzeyinde durma süreleri Şekil 4.26’te verilmektedir.



Şekil 4.24. Farklı boyut ve en/boy oranlarına sahip olan elek yüzeylerinin şematik görünümü



Şekil 4.25. 1/2 ve 2/1 en/boy oranlı elek açıklıklarına sahip olan simülasyonların partiyon eğrileri

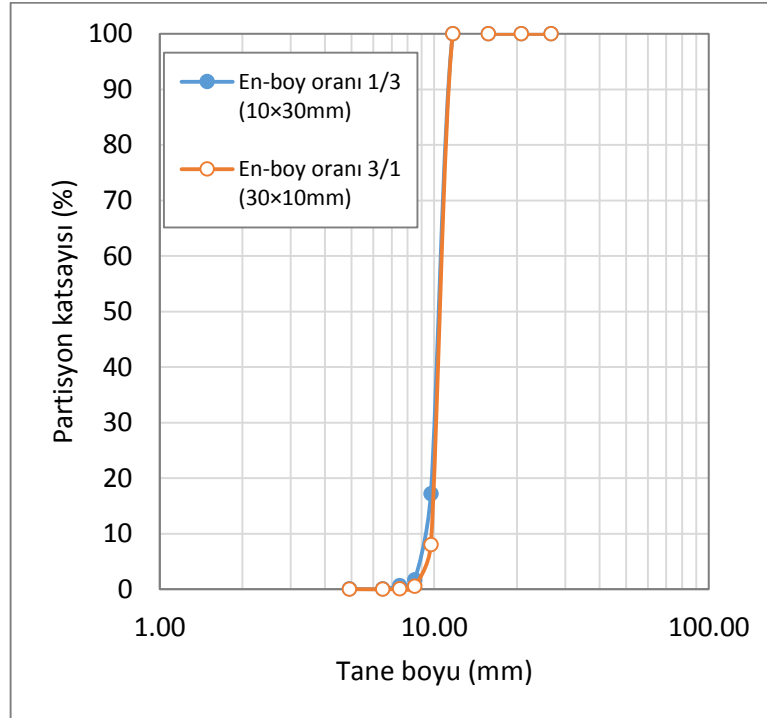


Şekil 4.26. 1/2 ve 2/1 en/boy oranlı elek açıklıklarına sahip olan simülasyonlarda elek üstü ve elek altı akımlarına giden tanelerin elek yüzeyinde ortalama kalma süreleri

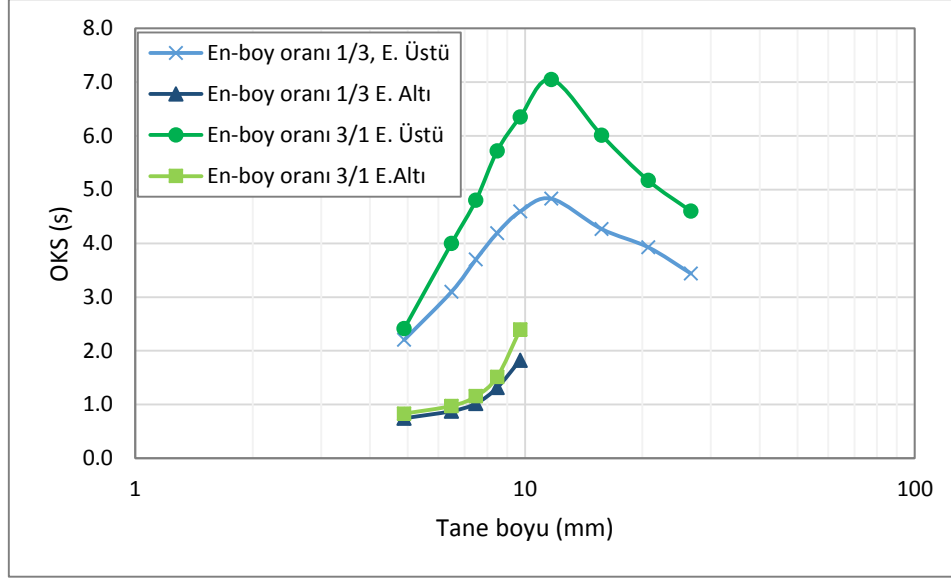
2/1 en/boy oranlı açıklığa sahip eleme simülasyonundaki, alt akım ve üst akıma giden tanelerin elek yüzeyinde ortalama kalma sürelerinin daha yüksek olduğu ve buna paralel olarak eleme verimliliğinin arttığı gözlenmektedir.

10×30mm ve 30×10mm eleklerin karşılaştırılması

Simülasyonlar sonuçlarına göre, elek açıklığının en/boy oranı 1/3'ten 3/1'e değişmesi durumunda, eleme verimliliği %82.84'ten %85.70'e yükselmekte, ayrıca alt akımın kütlesi de %51.52'dan %53.16'ya çıkmaktadır. Partisyon eğrileri (Şekil 4.27) benzer görünmekle birlikte, 3/1 en/boy oranına sahip olan eleme işleminde ince tanelerdeki (-11.7mm) eleme performansı daha yüksek olmaktadır. Özellikle elek açıklığına yakın boyutlu tanelerin partisyon katsayılarında %10'a varan bir iyileşme gözlenmektedir. Tanelerin alt akım ve üst akıma geçmeden önce elek yüzeyinde kalma süreleri Şekil 4.28'da verilmektedir. 3/1 en/boy oranlı açıklığa sahip eleme simülasyonundaki alt akım ve üst akımına giden tanelerin elek yüzeyinde ortalama kalma süreleri daha yüksektir ve aynı zamanda eleme verimliliği daha yüksektir.



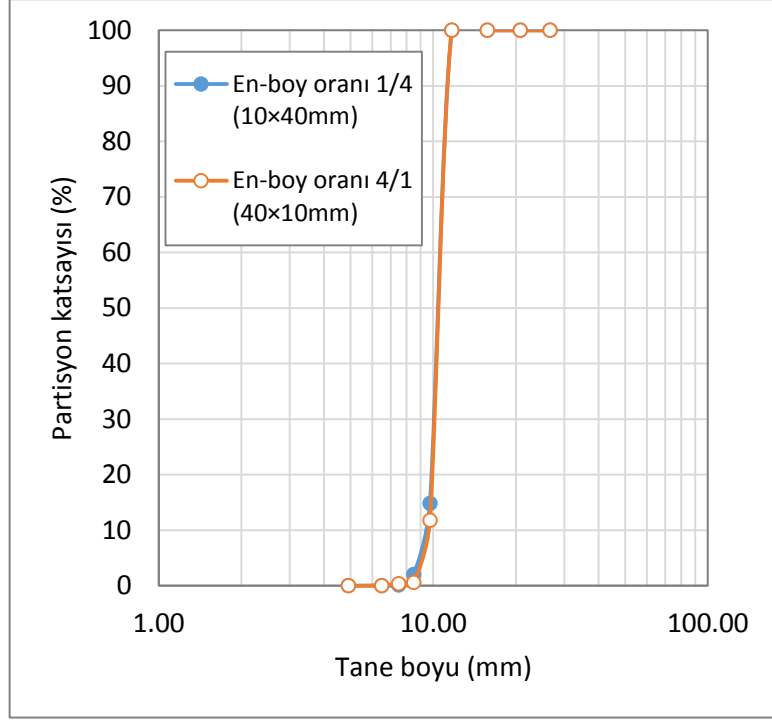
Şekil 4.27. 1/3 ve 3/1 en/boy oranlı elek açıklıklarına sahip olan simülasyonların partisyon eğrileri



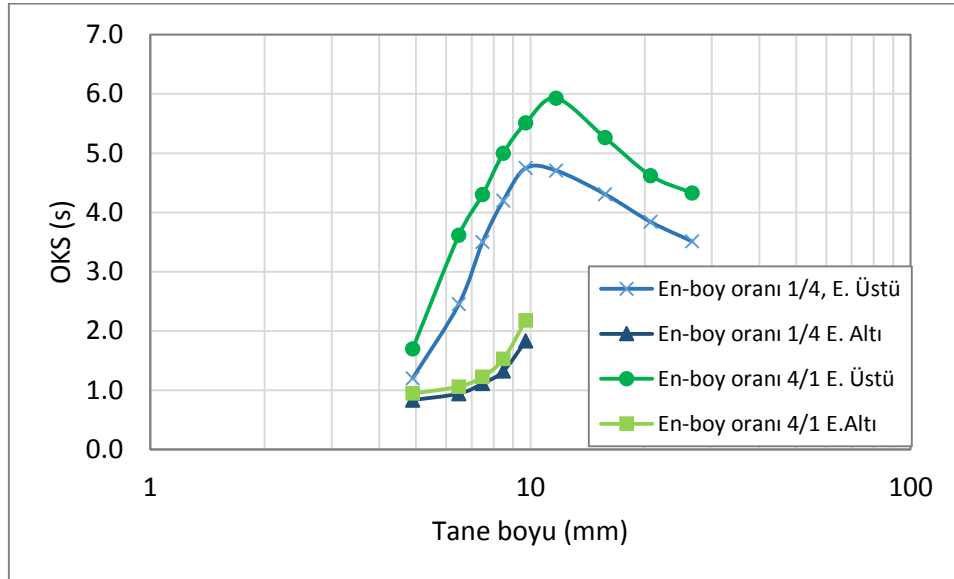
Şekil 4.28. 1/3 ve 3/1 en/boy oranlı elek açıklıklarına sahip olan simülasyonlarda elek üstü ve elek altı akımlarına giden tanelerin elek yüzeyinde ortalama kalma süreleri

10×40mm ve 40×10mm eleklerin karşılaştırılması

Simülasyonların sonuçlarına göre, elek açıklığının en/boy oranı 1/4'ten 4/1'e değişmesi durumunda, eleme verimliliği %82.97'den %89.03'e artmakta ve alt akımın kütlesi %49.95'ten %60.50'ye yükselmektedir. Her iki durumda elde edilen partiyon eğrileri (Şekil 4.29) ana hatlarıyla birbirine benzer görünmekte ve d_{50} değerleri aynı olmakla birlikte, özellikle elek açıklığına yakın boyutlu tanelerin partiyon katsayılarında %2-3 aralığında bir iyileşme olduğu görülmektedir. Tanelerin alt akım ve üst akıma geçmeden önce elek yüzeyinde kalma süreleri Şekil 4.30'de verilmektedir.



Şekil 4.29. 1/4 ve 4/1 en/boy oranlı elek açıklıklarına sahip olan simülasyonların partisyon eğrileri



Şekil 4.30. 1/4 ve 4/1 en/boy oranlı elek açıklıklarına sahip simülasyonlarda elek üstü ve elek altı akıma giden tanelerin elek yüzeyinde ortalama kalma süreleri

4/1 en/boy oranlı açıklığına sahip eleme simülasyonundaki alt akım ve üst akımına giden tanelerin elek yüzeyinde ortalama kalma sürelerinin daha yüksek olduğu ve aynı zamanda eleme verimliliğinin de daha yüksek olduğu görülmektedir.

Çizelge 4.7, yapılan simülasyonların partiyon eğrilerini temel alarak, eleme kesme noktaları ve Imperfection değerlerini özetlemektedir. Genel olarak en/boy oranının artışıyla eleme kesme noktasının artışının yanı sıra eleme verimliliğinde de artış gözlenmektedir.

Çizelge 4.7. Çeşitli elek açıklığı en/boy oranlarında kesme noktaları ve Imperfection değerleri

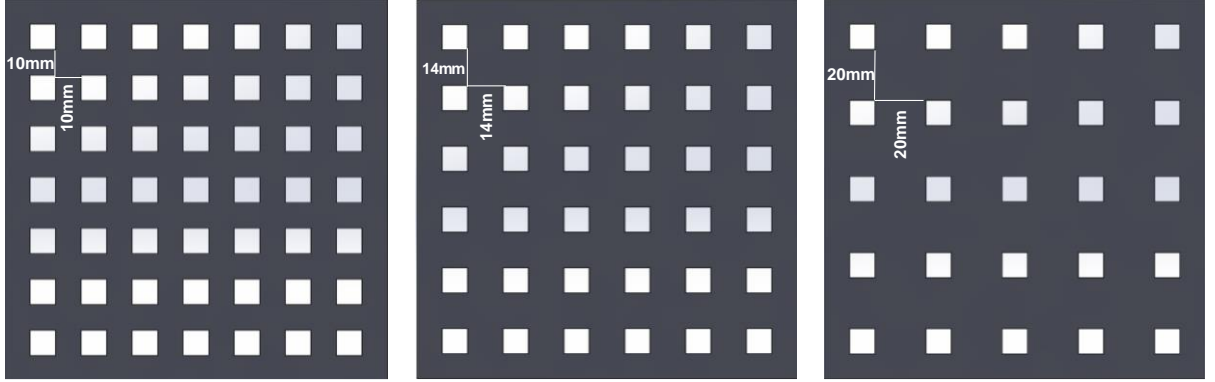
En/boy Oranlı	d ₂₅	d ₅₀	d ₇₅	Imperfection
1/2	8.90	9.85	10.50	0.081
2/1	9.10	9.90	10.60	0.076
1/3	9.90	10.40	10.90	0.048
3/1	10.15	10.55	10.95	0.038
1/4	10.00	10.45	10.90	0.043
4/1	10.05	10.50	10.90	0.040

Yapılan simülasyonların sonuçlarına göre, beklendiği üzere, en/boy oranının artması ile birlikte eleme verimliliği de artmaktadır ve tanelerin elek yüzeyinde kalma süresi uzamaktadır. Bu da daha yüksek tonaj değerlerinde verimliliğin yüksek en/boy oranlarında dahi azalacağına işaret etmektedir. Nitekim, eleme işleminde hedef kapasite olduğu zaman düşük en/boy oranına sahip elekler tercih edilmekte, ancak eleme verimliliği hedeflenmesi durumunda yüksek en/boy oranları tercih edilmektedir.

4.8 Elek Yüzeyi Açıklık Oranının Etkilerinin İncelenmesi

Elek yüzeyinde bulunan açıklıkların toplam alanının, elek yüzeyinin toplam alanına oranı elek açıklık oranı olarak ifade edilmektedir. Elek açıklık oranının artmasıyla, elek üzerinde açıklık sayısının arttığı ve dolayısıyla elek verimliliğinin arttığı bilinmektedir. Elek açıklık oranının eleme performansındaki etkisinin sayısal olarak incelenmesi amacıyla aynı elek yüzeyi boyutuna (900×300mm) ve elek açıklığı boyutuna (10×10mm) sahip olan, ancak açıklıkların arasındaki mesafeleri değişken olan 3 farklı elek çizimi tasarlanmıştır (Şekil 4.31). Birinci çizimde açıklıkların arasındaki mesafe x ve y yönünde 10mm olarak, ikinci ve üçüncü çizimlerde sırasıyla 14 ve 20mm olarak belirlenmiştir. Bu eleklerin açıklık oranları sırasıyla %21.78, %16 ve %11.11 olarak hesaplanmıştır. Bu açıklık oranları, fiili işlemlerde

bu kadar düşük değerlerde olmamakla birlikte, açıklık oranı etkisinin tam olarak izlenebilmesi amacıyla oldukça düşük açıklık oranları tercih edilmiştir.

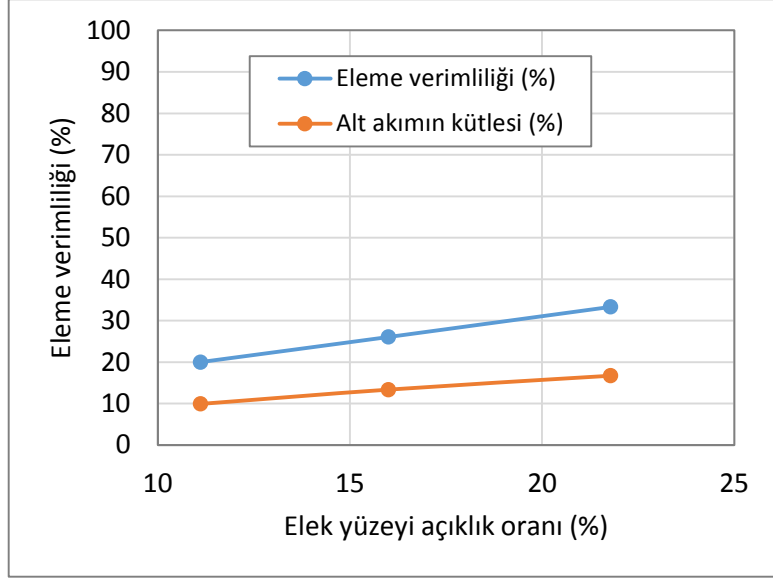


Şekil 4.31. Farklı elek açıklığı oranlarına sahip olan elek çizimlerinin şematik görünümü

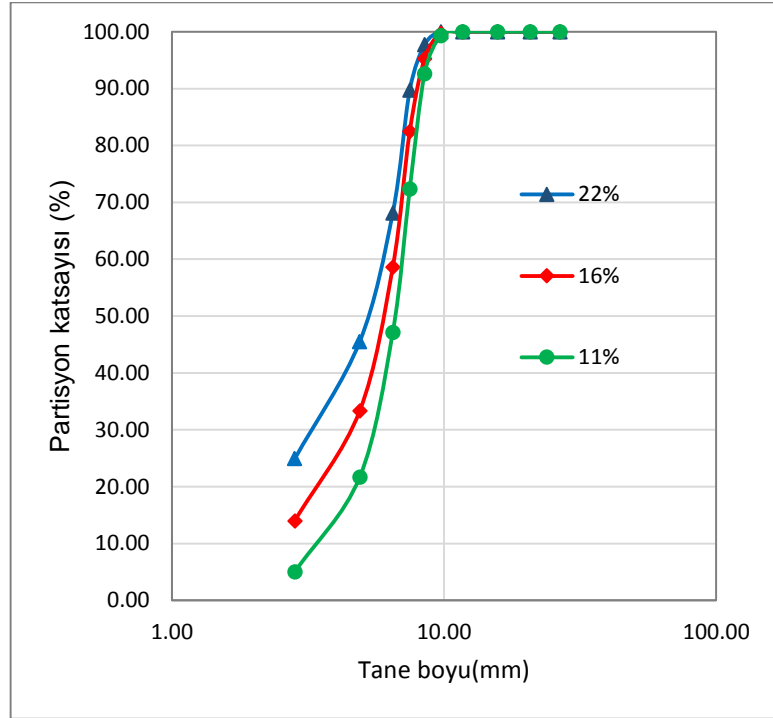
Besleme tonajı, besleme tane boyu dağılımı, besleme özellikleri, titreşim özellikleri, yüzey eğimi ve yüzey boyutları gibi değişkenler sabit tutularak 3 farklı açıklık oranına sahip elek çizimiyle simülasyonlar gerçekleştirilmiştir.

Simülasyon sonuçlarına göre eleğin açıklık oranının artışıyla eleme verimliliği ve alt akımın kütlesi artmaktadır (Şekil 4.32). Partisyon eğrileri (Şekil 4.33) ve kesme boyları (

Çizelge 4.8) da beklenen etkiyi doğrulamakta ve partisyon eğrilerinde görüldüğü üzere açıklık oranının artışıyla eleğin kesme boyu artmaktadır. Açıklık oranları %21.78, %16 ve %11.11 olan eleklerin kesme noktaları sırasıyla 6.62, 5.93 ve 5.18mm olarak belirlenmiştir. Elek açıklığının etkisi, özellikle elek altına gitmesi gereken ince tanelerin üst akıma kaçması şeklinde, belirgin olarak partisyon eğrilerinden anlaşılmaktadır.



Şekil 4.32. Farklı açıklık oranlarına sahip eleklerde eleme verimliliği ve alt akım kütleleri

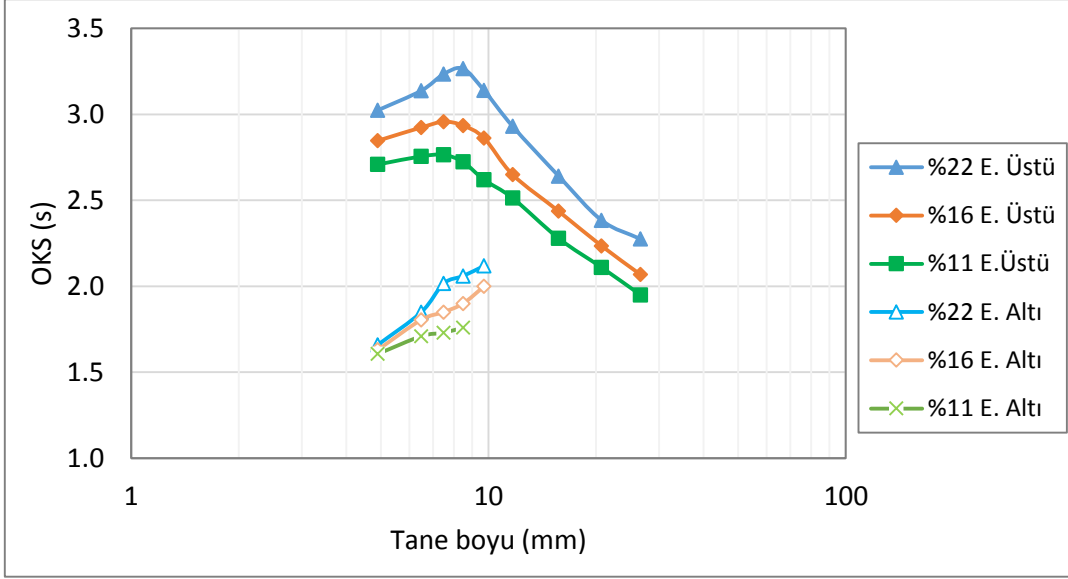


Şekil 4.33. Farklı açıklık oranlarında elde edilen partisyon eğrileri

Çizelge 4.8. Çeşitli elek yüzeği açıklık oranlarında kesme noktaları ve Imperfection değerleri

Açıklık Oranı (%)	d ₂₅ (mm)	d ₅₀ (mm)	d ₇₅ (mm)	Imperfection
11.11	2.83	5.18	6.83	0.39
16	4.00	5.93	7.15	0.27
21.78	5.20	6.62	7.60	0.18

Şekil 4.34, farklı elek açıklığı oranına sahip olan eleme simülasyonlarında alt ve üst akımlarına giden tanelerin elek yüzeyinde ortalama kalma sürelerini göstermektedir. Görüleceği üzere, üst akıma giden taneler söz konusu olduğu zaman OKS'si yüksek açıklık oranına sahip olan simülasyonlar için daha büyüktür. Elek yüzeyinde daha fazla açıklık bulunduğu ve tanelerin bu açıklıklarla çarpışma sonucunda bu taneler elek yüzeyinde daha fazla zaman geçirmektedirler ama düşük açıklık oranlarında taneler açıklıklara çarpmaksızın üst akıma yol bulmaktadırlar. Alt akıma giden taneler söz konusu olduğu zaman ise yine de yüksek açıklık oranına sahip olan eleme simülasyonların tanelerin ortalama kalma süreleri düşük açıklık oranlarına göre daha yüksektir. Elek yüzeyinde açıklık sayısı fazla olduğu için tanelerin alt akıma geçme şansı daha yüksektir ve taneler eleğin farklı bölgelerinden elek atına geçtikleri için ortalama kalma süreleri daha yüksektir. Ama düşük açıklık oranına sahip eleklerin yüzeyinde bulunan açıklıkların sayısı daha düşüktür ve tanelerin çoğunluğu eleğin ilk kısımlarından alt akıma geçtiklerinden dolayı ortalama kalma süreleri daha düşüktür.



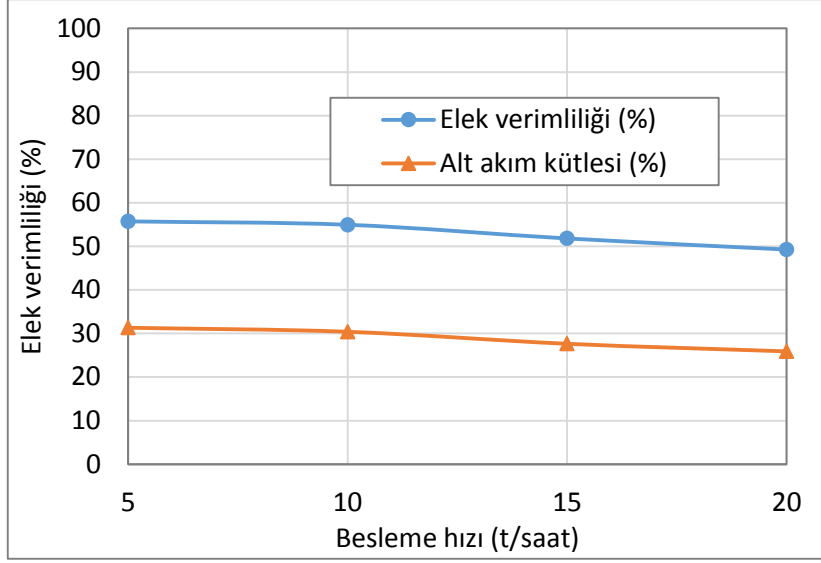
Şekil 4.34. Farklı elek açıklığı oranlarında, alt ve üst akımlara giden tanelerin elek yüzeyinde ortalama kalma süreleri

4.9 Besleme Akış Hızının Etkilerinin İncelenmesi

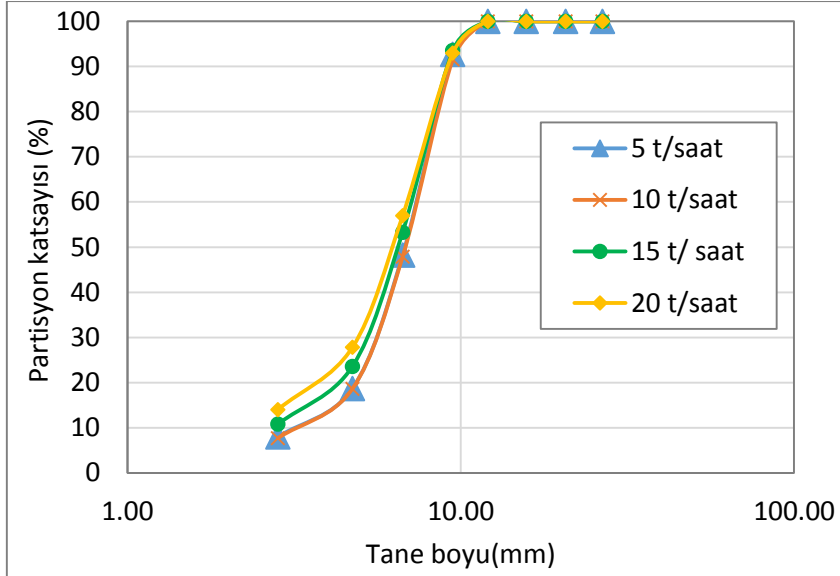
Besleme akış hızındaki değişim, tanelerin arasındaki etkileşimin dinamiği, yatak derinliği gibi parametreleri değiştirmesi sebebiyle eleme işleminin performansını etkileyebilmektedir. Besleme hızının eleme performansı ve ilgili faktörlere olan etkilerini incelemek amacıyla 5, 10, 15 ve 20 ton/saat besleme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

Şekil 4.35'te besleme hızının elek performansı ve alt akıma giden tanelerin miktarı üzerine etkisi verilmektedir. Ayrıca, Şekil 4.36'te farklı besleme hızları için oluşturulmuş partiyon eğrileri verilmektedir.

Çizelge 4.9 ise partiyon eğrilerini temel alarak hesaplanan eleme kesme noktaları ve Imperfection değerlerini göstermektedir.



Şekil 4.35. Besleme hızının elek verimliliği ve alt akımın kütlesi üzerine etkileri



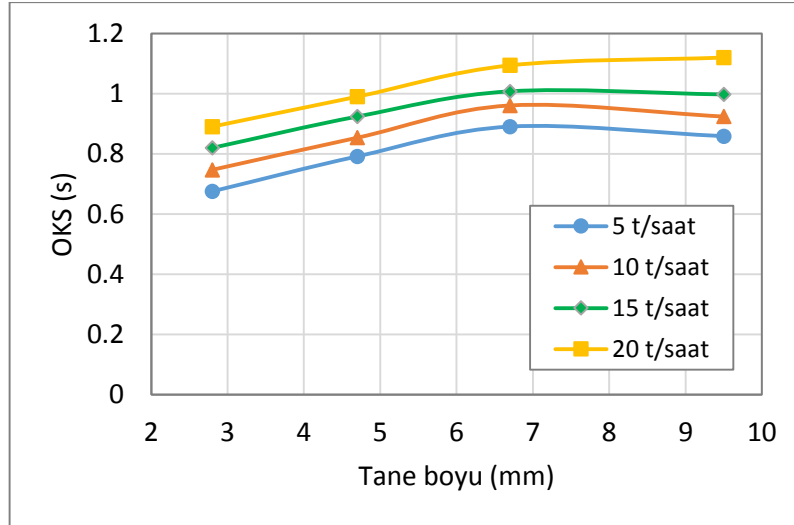
Şekil 4.36. Farklı besleme hızlarında elde edilen partisyon eğrileri

Şekil 4.35 ve 44'te 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. Partisyon eğrileri incelendiğinde, besleme hızının artmasıyla, elde edilen kesme boyunun azaldığı görülmektedir.

Çizelge 4.9. Çeşitli besleme akış hızları için hesaplanan eleme kesme noktaları ve Imperfection değerleri

Besleme Akış Hızı (t/saat)	d ₂₅ (mm)	d ₅₀ (mm)	d ₇₅ (mm)	Imperfection
5	5.3	6.8	8.2	0.21
10	5.3	6.8	8.25	0.22
15	4.85	6.5	8.1	0.25
20	4.45	6.25	7.9	0.28

Alt akıma geçen tanelerin ortalama kalma süresinin (OKS) incelenmesi, OKS'nin besleme hızıyla artışı göstermektedir (Şekil 4.37). Beklendiği üzere, besleme hızının artmasına paralel olarak, tanelerin elek yüzeyine çarpma ve elek-altına geçme olasılığı azalmaktadır. Ayrıca, OKS'nin tane boyu irileştikçe arttığı görülmektedir. Ancak iri tanelerde (elek açıklıklarına yakın boyutlu taneler) bu eğilim düşüş göstermektedir. Bu da test edilen besleme hızı aralığında, besleme hızının elek açıklığına yakın boyutlu tanelerin eleme verimliliğinde etkisinin az olduğunu göstermektedir.

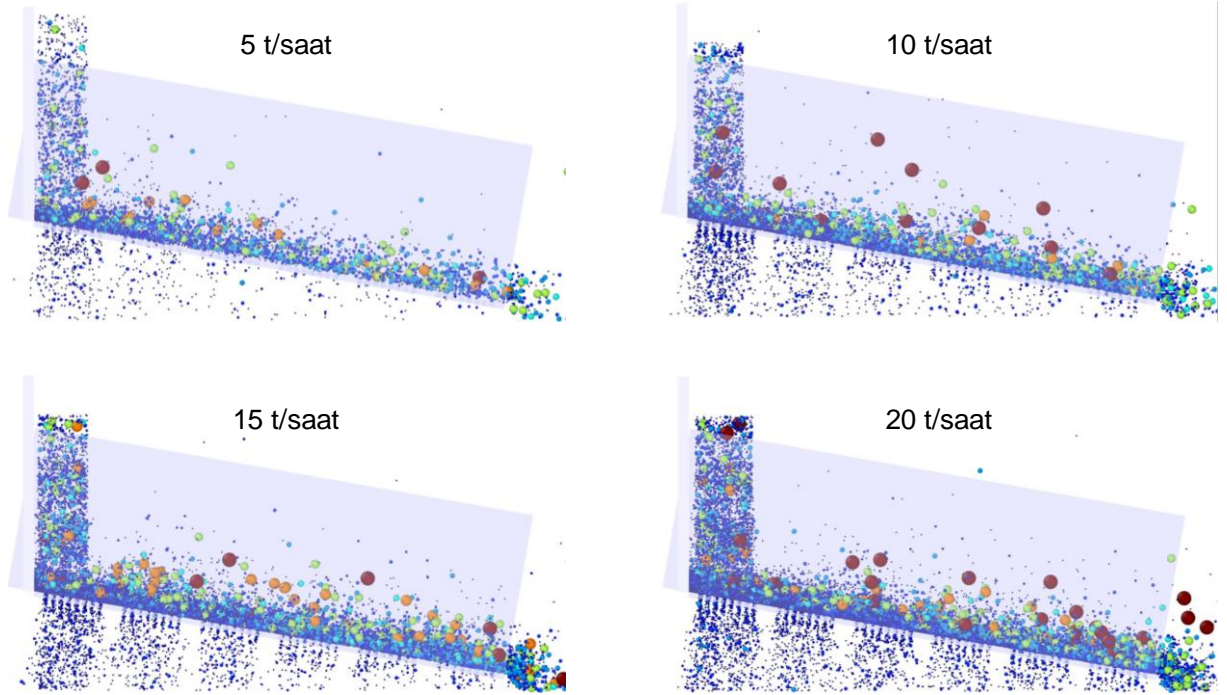


Şekil 4.37. Tanelerin farklı besleme hızlarında elek üzerinde ortalama kalma süreleri

Şekil 4.38, farklı besleme hızlarında yapılan simülasyonların 20. saniyedeki ekran görüntülerini göstermektedir. Görüleceği üzere, besleme hızının artışıyla birlikte elek yüzeyinde bulunan tanelerin miktarı artmakta ve dolayısıyla tanelerin elek altına geçme olasılığı azalmaktadır.

4.10 Besleme Tane Boyu Dağılımının Etkilerinin İncelenmesi

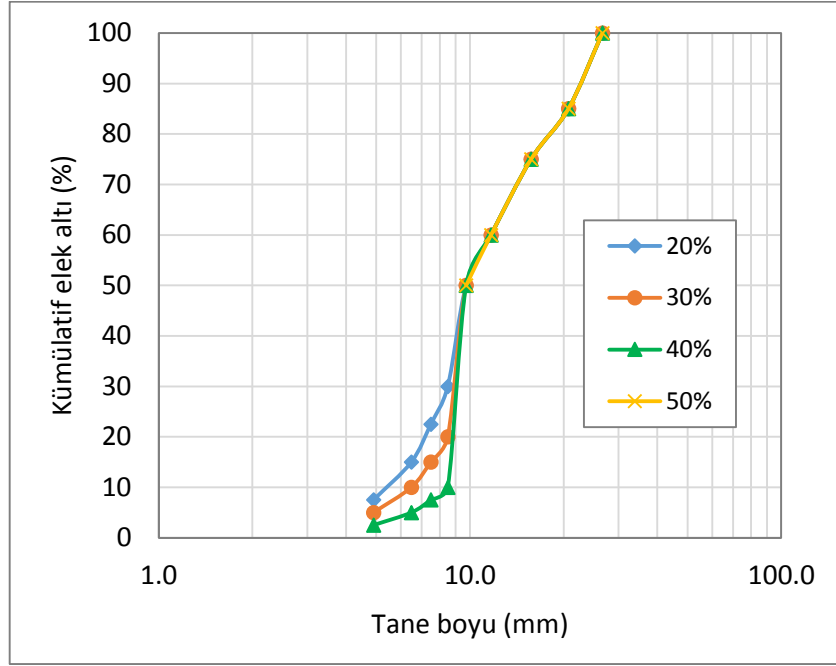
Önemli işletme parametrelerinden biri olan besleme tane boyu dağılımı eleme performansında etkin bir role sahiptir. Özellikle, elek açıklığına yakın boylara sahip olan tanelerin (near-mesh) miktarının, eleme işleminin verimliliğini önemli ölçüde etkilediği bilinmektedir. Bu parametrenin etkilerini sayısal olarak araştırmak amacıyla besleme tonajı, besleme fiziksel özellikleri, titreşim özellikleri, yüzey eğimi ve yüzey boyutları gibi tasarım ve işlem değişkenleri sabit tutarak 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 3.3).



Şekil 4.38. Farklı besleme hızlarında yapılan simülasyonların 20. saniyedeki ekran görüntüleri

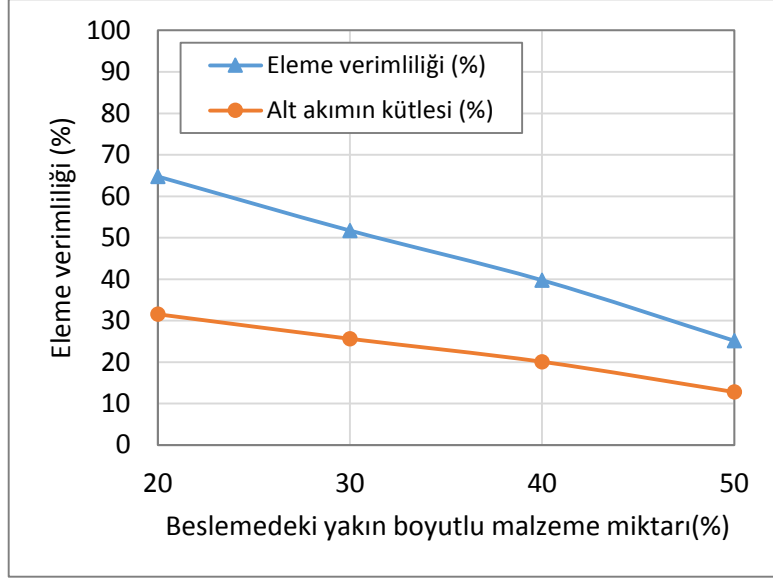
Çizelge 3.3'te belirlenen tane boyu dağılımlarına sahip 4 farklı besleme ile simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Besleme tane boyu dağılımlarında elek açıklığına yakın boya sahip olan tanelerin (9.7 mm) etkisini belirgin olarak incelemek amacıyla, bu tanelerin beslemedeki miktarı sırayla 50, 40, 30 ve 20% olarak varsayılmış ve

+9.7 mm'lik tanelerin miktarı sabit tutulmuştur. Şekil 4.39'de hipotetik beslemelerin tane boyu dağılımları verilmektedir.



Şekil 4.39. Farklı yakın boyutlu malzeme içeren beslemelerin tane boyu dağılımları

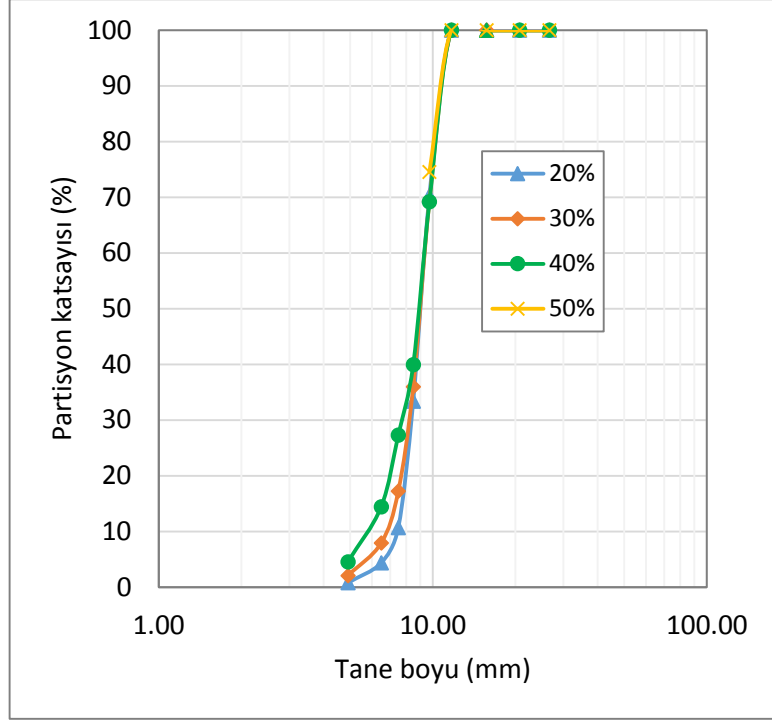
Simülasyon sonuçlarına göre eleme verimliliği ve alt akımın kütlesi elek açıklığına yakın boya sahip olan tanelerin beslemedeki miktarının artışıyla ciddi bir şekilde azalmaktadır (Şekil 4.40). Bu tanelerin beslemedeki miktarları arttığı zaman açıklıklarını tıkararak diğer ince tanelerinde gözeneklerden geçmesini engellemektedirler.



Şekil 4.40. Farklı yakın boyutlu malzeme içeren beslemelerin eleme verimlilikleri ve alt akım kütleleri

Partisyon eğrileri dikkate alındığında (Şekil 4.41), elek açıklığına yakın boyutlu tanelerin miktarının 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. Eleme kesme noktalarında (Çizelge 4.10) belirgin bir farklılık gözlemlenmemiştir.

Farklı elek açıklığına yakın boyutlu taneler içeren beslemelerle yapılan simülasyonlarda, alt ve üst akımlarına giden tanelerin, elek yüzeyinde ortalama kalma süreleri Şekil 4.42'de 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.

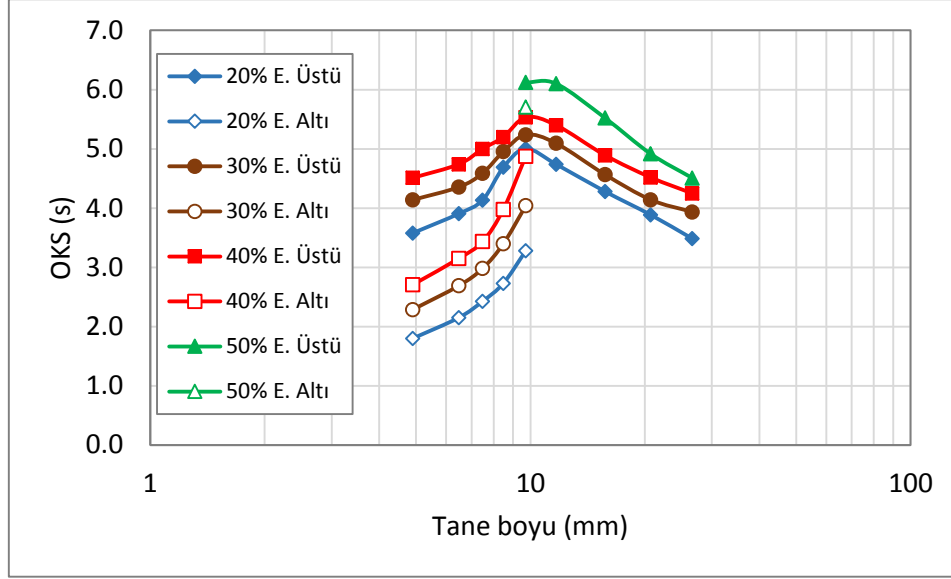


Şekil 4.41. Farklı miktarda yakın boyutlu fraksiyon içeren beslemeler için partiyon eğrileri

Çizelge 4.10. Farklı miktarda yakın boyutlu fraksiyon içeren beslemeler için hesaplanan eleme kesme noktaları ve Imperfection değerleri

Yakın Boyut Miktarı (%)	d ₂₅ (mm)	d ₅₀ (mm)	d ₇₅ (mm)	Imperfection
20	8.1	8.9	10	0.11
30	8	8.9	10	0.11
40	7.25	8.9	10	0.15
50	-	-	-	-

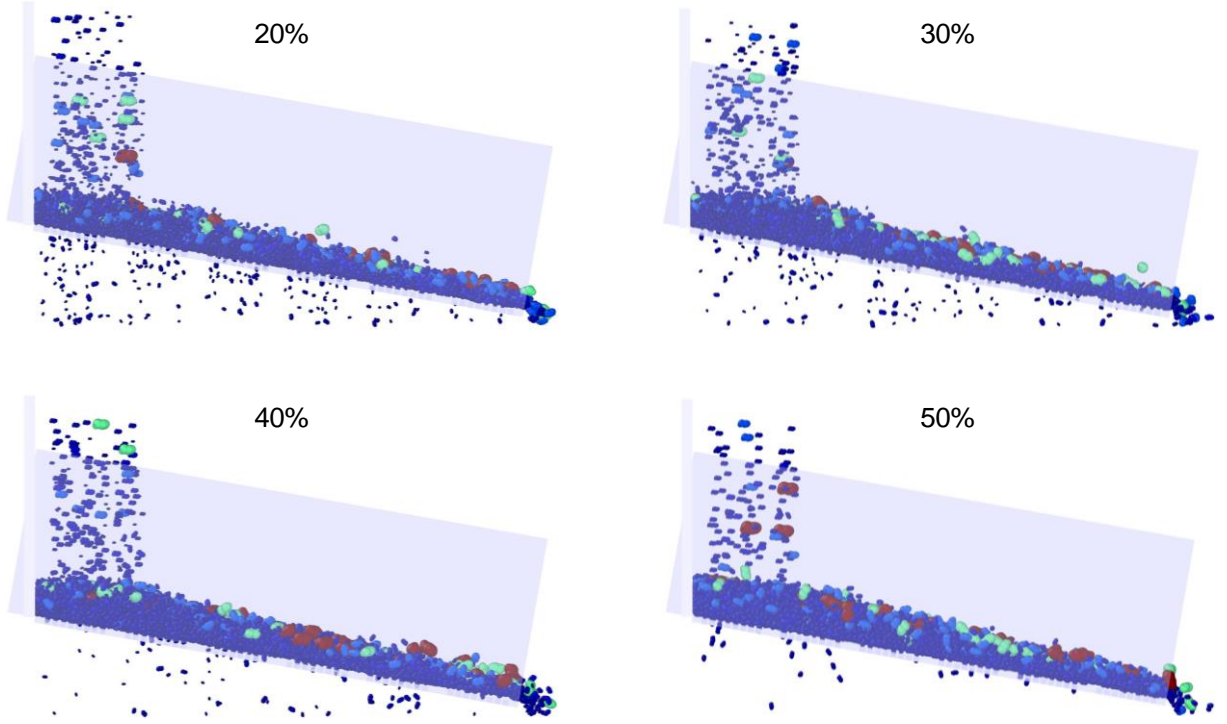
Benzer şekilde, elek açıklığına yakın boya sahip olan tanelerin miktarı arttıkça alt akıma giden tanelerde de ortalama kalma süreleri artış göstermektedir. Elek açıklığına yakın boya sahip tanelerin miktarı arttıkça, elek altına geçmesi gereken taneler, elek altına geçmek için elek yüzeyinde daha uzun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



Şekil 4.42. Farklı oranlarda yakın boyutlu malzeme içeren beslemelerde alt ve üst akıma giden tanelerin elek yüzeyinde ortalama kalma süreleri

Şekil 4.43'de farklı oranda yakın boyutlu malzeme içeren beslemelerle gerçekleştirilen simülasyonların 20.saniyesindeki ekran görüntüleri verilmektedir. Elek açıklığına yakın boya sahip olan tanelerin beslemedeki miktarının artmasıyla, elek altına geçen tanelerin miktarı azalmakta ve elek yüzeyine yığılan malzemenin miktarında da (yatak kalınlığı) artış gözlenmektedir. Böylece tanelerin elek yüzeyiyle temas olasılığı azalarak tanelerin elek altına geçme ve dolayısıyla eleme verimliliği düşmektedir.

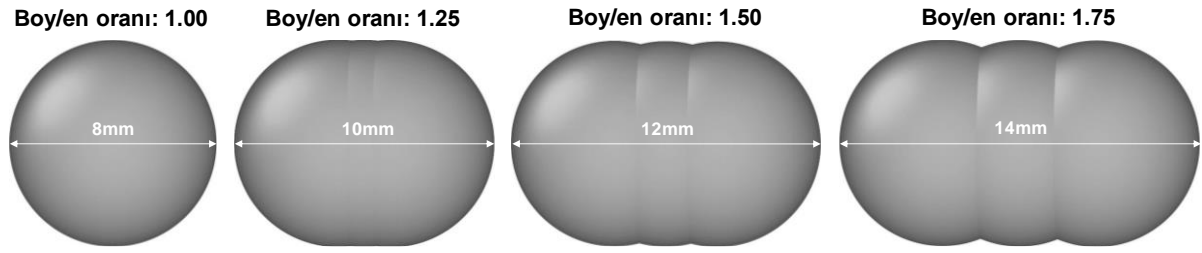
Sonuç olarak, elek açıklığına yakın boyutlu tanelerin beslemedeki miktarının artması, eleme verimliliğinin azalmasına, diğer bir deyişle belirli bir verim hedefi için elek kapasitesinin azalmasına sebep olmaktadır.



Şekil 4.43. Farklı oranlarda yakın boyutlu tane içeren beslemeler için yapılan simülasyonların 20. saniyedeki ekran görüntüleri

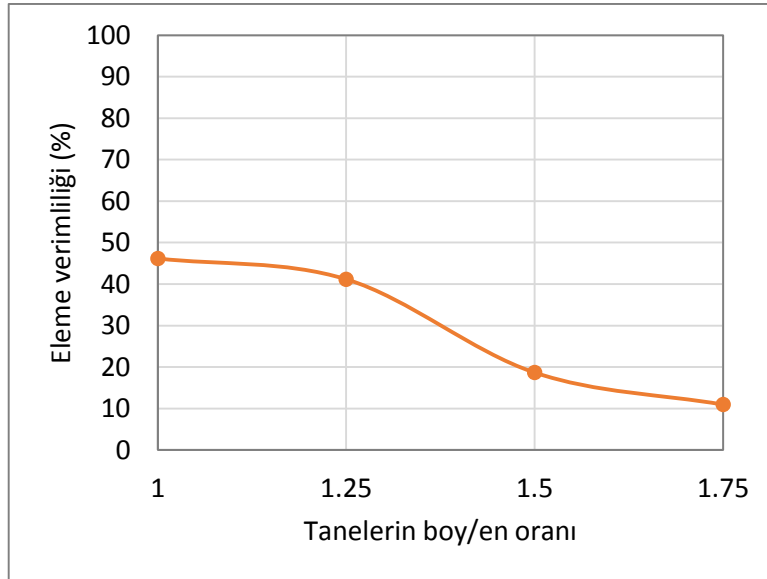
4.11 Tane Şeklinin Etkilerinin İncelenmesi

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, ikinci tane 3 adet 8mm çaplı küreden oluşturulmuştur. Aynı yönde dizilen bu kürelerin merkezlerinin arasındaki mesafe 1mm olarak belirlenmiştir. Bu sayede elde edilen eliptik şeklin büyük çapı 10mm ve küçük çapı 8mm olmaktadır (Şekil 4.44). Aynı yaklaşımla oluşturulan üçüncü ve dördüncü tanelerde de kürelerin arasındaki mesafe sırayla 2 ve 3mm olarak belirlenmiştir. Bu sayede, elek çapı (sieve diameter) 8mm olan, ancak farklı boy/en oranlarına sahip taneler elde edilmiştir. Elde edilen tanelerin boy/en oranları sırayla 1, 1.25, 1.5 ve 1.75 olarak olmaktadır. Şekil faktörleri farklı olmasına rağmen elek çapı 8mm olan bu tanelerin, 10mm'lik elekten elenmesinde ortaya çıkacak sonuçlar AEY simülasyonlarıyla incelenmiştir.



Şekil 4.44. Farklı boy/en oranlarına sahip tane şekilleri

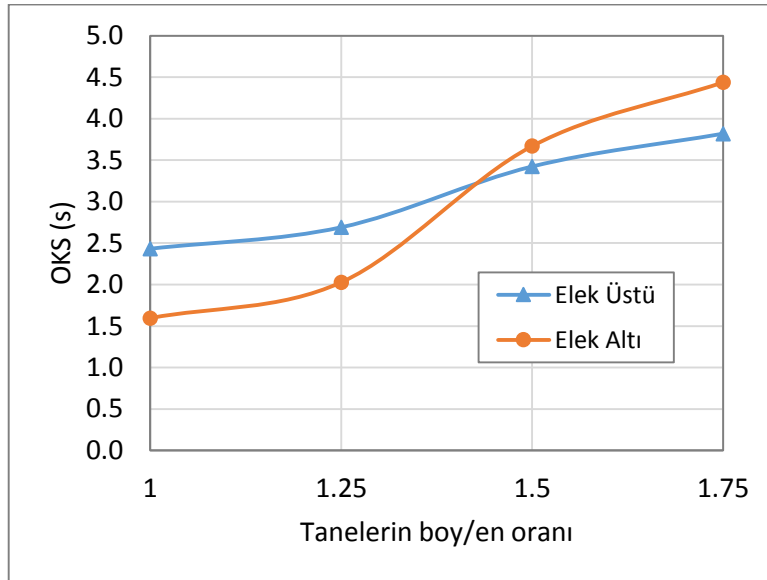
Tane şeklinin eleme performansındaki etkilerini araştırmak amacıyla gerçekleştirilen simülasyonlarda besleme tonajı, besleme tane boyu dağılımı, tanelerin fiziksel özellikleri, elek yüzeyi eğimi ve titreşim özellikleri gibi değişkenler sabit tutulmuştur. Simülasyon sonuçlarına göre, tanelerin boy/en oranları arttıkça eleme verimliliği düşmektedir. Boy/en oranı 1'den 1.25'e arttığında elek verimliliği yaklaşık %5 azalarak %46.17'den %41.16'ya düşerken boy/en oranı 1.25'den 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 4.45).



Şekil 4.45. Farklı boy/en oranlarına sahip olan tanelerle yapılan simülasyonların eleme verimlilikleri

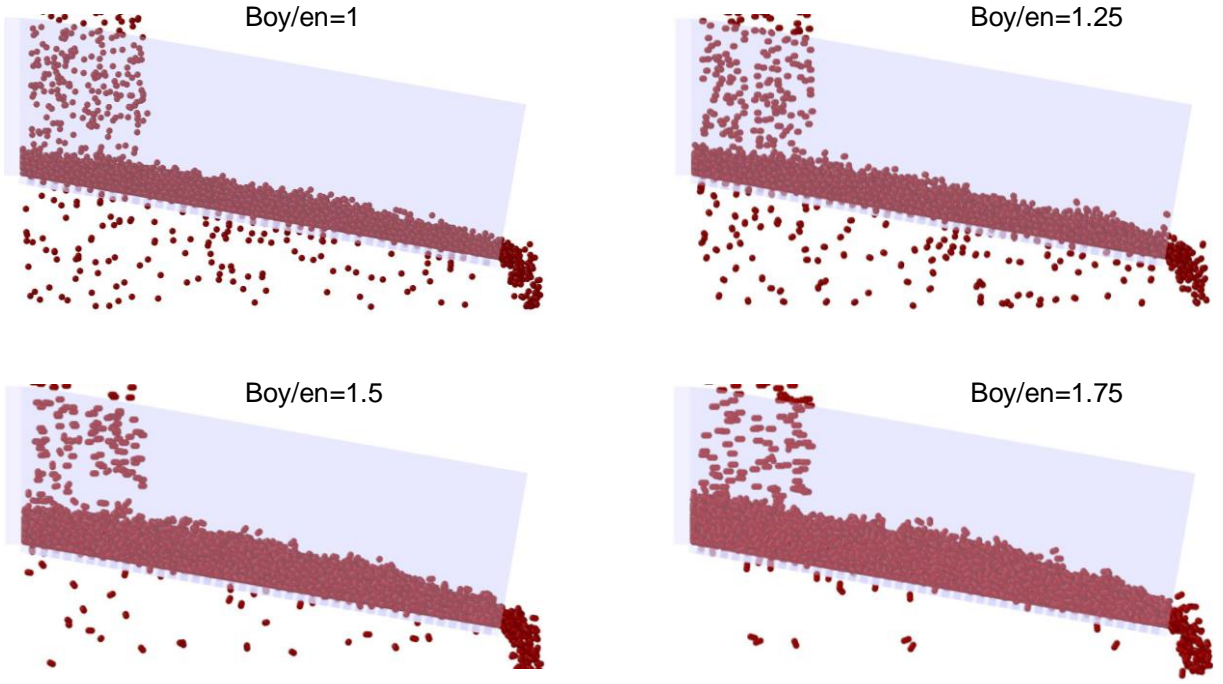
Farklı yönlendelerde elek açıklığından geçme ihtimali eşit olan küresel tanelerin aksine, eliptik taneler sadece küçük boyları (elek çapları) yönünde elek açıklığından geçme ihtimaline sahiptir. Bu yüzden boy/en oranının artışıyla tanelerin alt akıma geçme ihtimali ve dolayısıyla elek verimliliği düşmektedir.

Şekil 4.46, alt ve üst akımlara giden tanelerin elek yüzeyinde ortalama kalma süreleri 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 düşüşüyle benzer davranışlar göstermektedir. Boy/en oranı 1'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'e olan artışı ise ortalama kalma süresini 4.44 s'ye çıkarmaktadır. Bu benzerlik elek verimliliği ve ortalama kalma süresinin arasındaki ters orantıyı ortaya koymaktadır.



Şekil 4.46. Farklı boy/en oranlarına sahip beslemeden alt ve üst akıma giden tanelerin elek yüzeyinde ortalama kalma süreleri

Şekil 4.47 farklı boy/en oranlarına sahip olan tanelerle yapılan simülasyonların 20.saniyesinde alınan ekran görüntülerini göstermektedir. Tanelerin boy/en oranlarının artışıyla alt akıma geçen tanelerin sayısı azalmaktadır ve elek yüzeyindeki yatak kalınlığı artmaktadır. Böylece tanelerin boy/en oranındaki artış eleme verimini düşürmektedir.



Şekil 4.47. Farklı boy/en oranlarına sahip tanelerle yapılan simülasyonların 20. saniyesinde alınan ekran görüntüleri

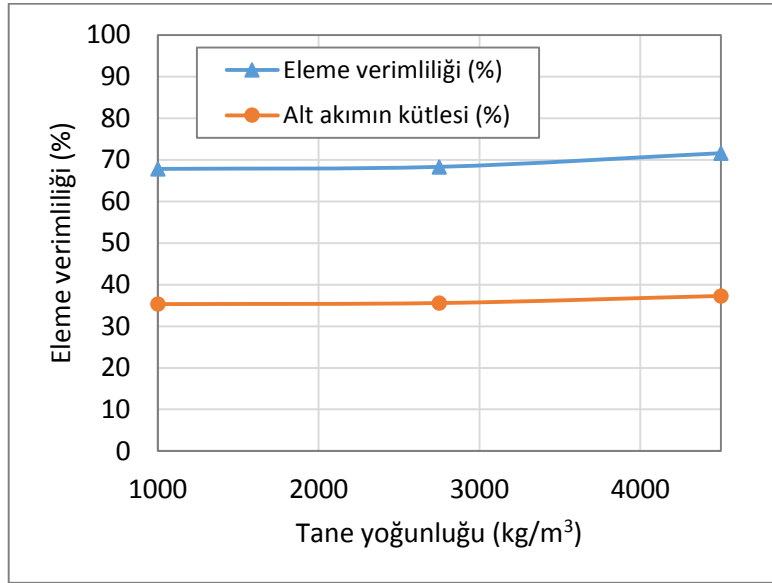
4.12 Tane Yoğunluğunun Etkilerinin İncelenmesi

Farklı yoğunluğa ve aynı boya sahip tanelerin kütlelerin farklı olması sebebiyle, bu tanelere elek yüzeyinde uygulanan bileşke kuvvet de farklı olacaktır. Tane yoğunluğunun eleme performansındaki etkilerini incelemek amacıyla iki farklı yaklaşım kullanılmıştır. Birinci yaklaşımda 1000, 2750 ve 4500 kg/m³ yoğunluklarına sahip olan taneler için diğer eleme parametreleri sabit tutularak ayrı ayrı üç farklı simülasyon gerçekleştirilmiştir. İkinci yaklaşımda ise 1500, 2500, 3500 ve 4500 kg/m³ yoğunluklu tanelerin karışımından oluşan bir besleme için simülasyon yapılmıştır. Bu yaklaşımda, elek altına geçen ve elek üstü akışta kalan tanelerin yoğunlukları incelenmiştir.

Farklı yoğunluklara sahip olan tanelerle yapılan simülasyonlar

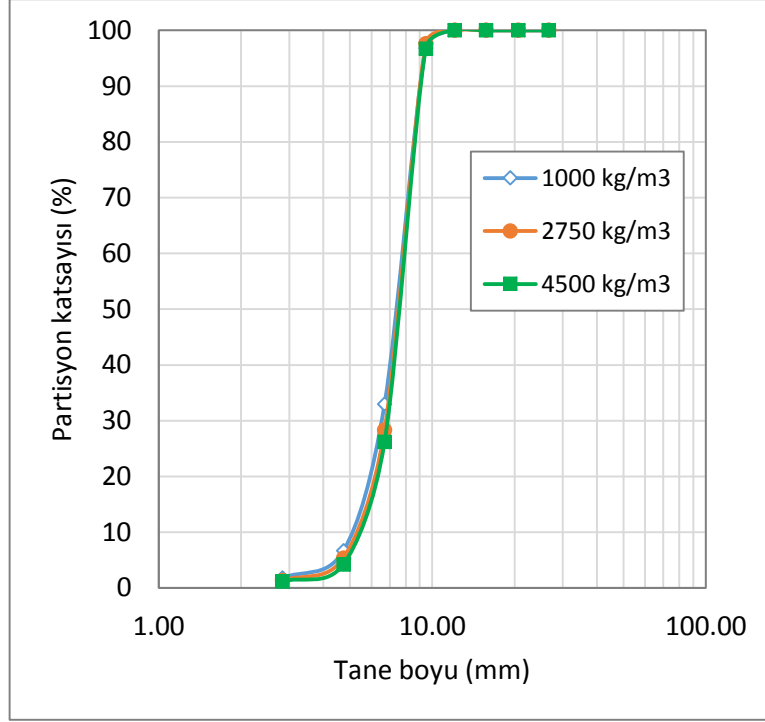
Besleme tonajı, besleme tane boyu dağılımı, elek yüzeyi eğimi, titreşim özellikleri gibi parametreler sabit tutularak tane yoğunluğunun eleme performansı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Gerçekleştirilen simülasyonların sonuçları, eleme verimliliğinin ve alt akım kütlelerinin tanelerin yoğunluğunun artmasıyla düşük oranda arttığını göstermektedir (Şekil 4.48). Simülasyonlarda kullanılan beslemelerin tane boyu dağılımlarının aynı olması sebebiyle tanelerin yoğunluğu arttıkça kütleleri de

artmaktadır ve taneler elek yüzeyine yakın olarak hareket ederek elek yüzeyine çarpma ve elek altına geçme ihtimali artmaktadır.



Şekil 4.48. Farklı yoğunluklara sahip olan tanelerle yapılan simülasyonların eleme verimliliği ve alt akım kütleleri

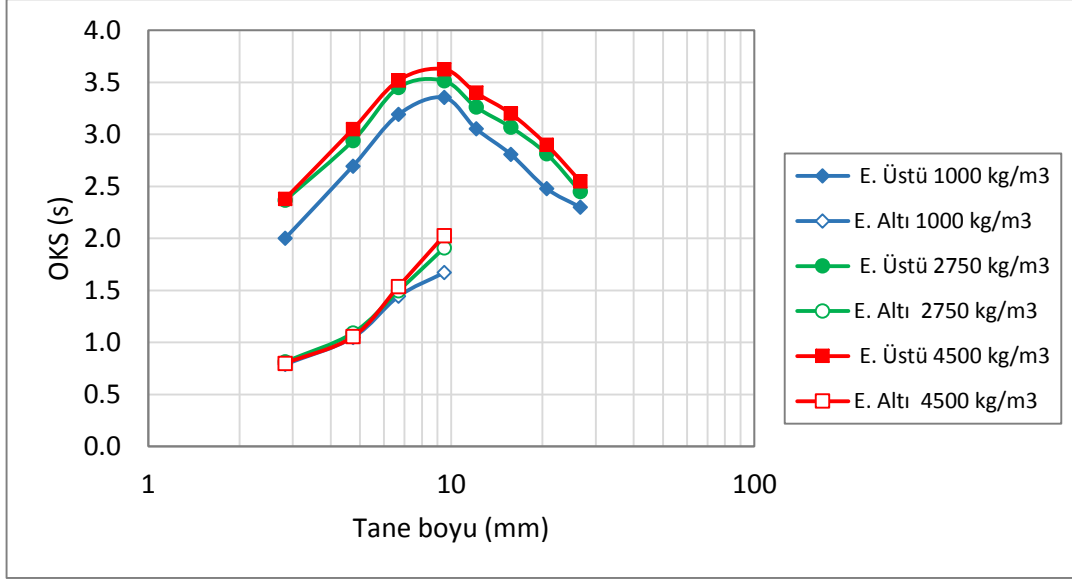
Farklı yoğunluklardaki tanelerden oluşan beslemeler ile yapılan simülasyonların performans eğrileri Şekil 4.49'de verilmektedir. Tanelerin yoğunluğunun artmasıyla performans eğrilerinin eğimlerinin düşük oranda olmakla birlikte arttığı görülmektedir. Bu da eleme işleminin daha verimli gerçekleştiğini ortaya koymaktadır.



Şekil 4.49. Farklı yoğunluklara sahip olan tanelerle yapılan simülasyonların performans eğrileri

Şekil 4.50 elek üstü ve elek altı akımlarına giden tanelerin elek yüzeyinde ortalama kalma sürelerini göstermektedir. Üst akıma giden tanelerde yoğunluk arttıkça tanelerin elek yüzeyinde ortalama kalma süreleri artmaktadır ve dolayısıyla tanelerin elek yüzeyi ile çarpışma olasılığı ve sonuç olarak alt akıma gitme ihtimali artmaktadır. Ancak daha önceki bölümlerde de belirtildiği üzere gibi bu artış yatak kalınlığının artmasına sebep olacaktır.

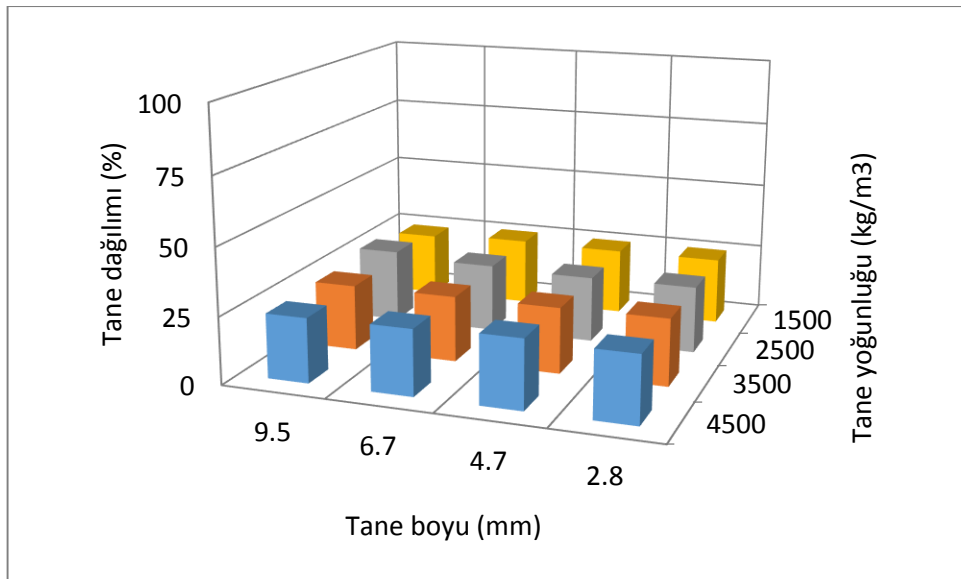
Alt akıma giden taneler söz konusu olduğu zaman, ince tanelerin (2.8, 4.7 ve 6.7mm) elek yüzeyinde ortalama kalma sürelerinin çok yakın olduğu, ancak boyu elek açıklığına yakın olan tanelerin (9.5mm) ortalama kalma sürelerinin farklılık sergilediği görülmekte ve tane yoğunluğunun artışıyla ortalama kalma süresi de artmaktadır. Bu da tane yoğunluğunun değişiminin, özellikle elek açıklığına yakın boyulu tanelerde etkili olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.50. Farklı yoğunluklara sahip olan tanelerle yapılan simülasyonlarda elek üstü ve elek altı akıma giden tanelerin elek yüzeyinde ortalama kalma süreleri

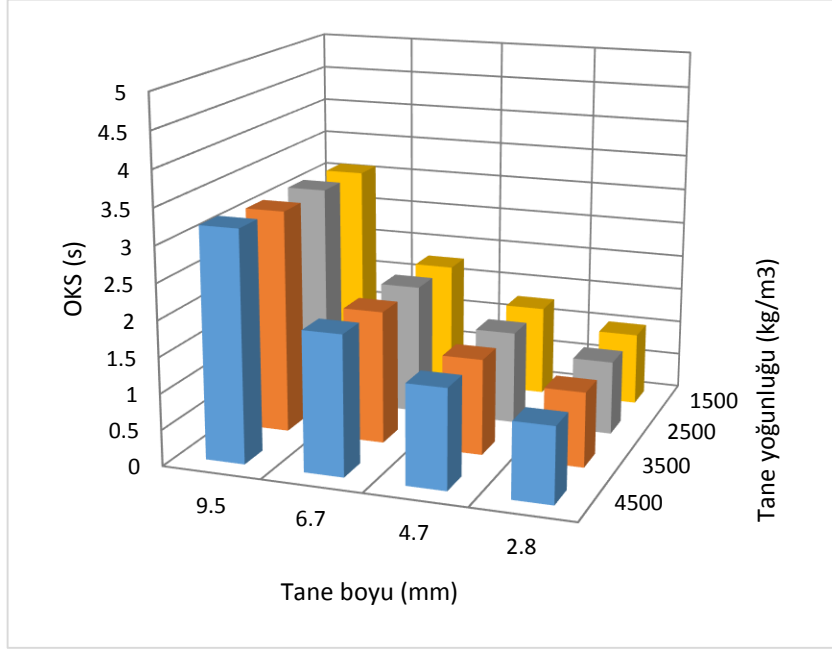
Farklı yoğunluklara sahip olan tanelerin karışımından oluşan beslemenin simülasyonu

1500, 2500, 3500 ve 4500 kg/m³ yoğunluklu tanelerin %25'er oranda karışımından oluşturulan bir besleme için eleme simülasyonu gerçekleştirilerek, elek altı üründe çeşitli yoğunluğa sahip olan tanelerin dağılımı incelenmiştir (Şekil 4.51). Görüleceği üzere, farklı tane boylarında ve farklı yoğunluğa sahip olan tanelerin dağılımının eşit (yaklaşık %25) olduğu görülmekte ve dağılımlar arasında kayda değer bir farklılık gözlenmemektedir.



Şekil 4.51. Elek altı üründeki farklı yoğunluğa sahip olan tanelerin dağılımı

Alt akıma geçen tanelerin elek yüzeyinde ortalama kalma sürelerini incelendiğinde (Şekil 4.52), ince tanelerde (2.8, 4.7 ve 6.7mm) farklı yoğunluklardaki tanelerin ortalama kalma sürelerinin hemen hemen aynı olduğu ancak boyu elek açıklığına yakın olan tanelerde yoğunluk artışıyla beraber ortalama kalma süresinde az da olsa bir artış olduğu gözlenmektedir. Daha yoğun olan taneler elek yüzeyinde daha fazla zaman geçirerek elek altına geçmiştirlerdir.



Şekil 4.52. Çeşitli yoğunluklara sahip olan tanelerden oluşan besleme ile yapılan simülasyonda alt akıma giden tanelerin elek yüzeyinde ortalama kalma süreleri

5 PİLOT ÖLÇEKLİ TEST ÇALIŞMALARI

Tez kapsamında gerçekleştirilen simülasyonların sonuçlarının, gerçek bir eleme işleminin sonuçlarıyla karşılaştırılması ve simülatörün tahmin gücünün sınanması amacıyla pilot ölçekli eğimli titreşimli bir elek (Şekil 3.4) kullanılarak testler yapılmıştır. 10° yüzey eğimine sahip olan bu eleğin yüzey boyutları (en x boy) 30×90 cm'dir. Farklı elek yüzeyleri kullanımına uygun olan bu elekte 10.5 ve 13mm (kare) açıklıklara sahip olan poliüretan elek yüzeyleri kullanılmıştır. Doğrusal titreşim şekline sahip olan bu eleğin titreşim genliği, titreşim frekansı ve titreşim yönü (yatay yöne göre) sırayla 5mm, 25Hz ve 110° olarak ölçülmüştür. Bu elekte titreşim özelliklerinden sadece titreşim frekansının kontrol edilmesi mümkün olmaktadır. Eleğin güç girişine eklenen frekans dönüştürücü sayesinde titreşim frekansının 0 ve 21.31 Hz aralığında değiştirilmesi mümkün olmaktadır.

Eleğin besleme sisteminde kullanılan titreşimli besleyicinin akış hızı kontrolü mümkün olduğundan dolayı eleme işleminin farklı tonajlarla yapılması mümkün olmaktadır (maksimum 20 t/saat). Deneysel çalışmalar için bir taş ocağından -30mm agrega ürünü tedarik edilmiş ve bütün numune elenerek 8 farklı boy fraksiyonuna (+22.6, -22.6+19, -19+13, -13+11.2, -11.2+8, -8+5.6, -5.6+4, -4+2) ayrılmıştır. Elde edilen fraksiyonların orantılı karıştırması sonucunda Çizelge 3.1'de verilen tane boyu dağılımına sahip olan yeterli besleme elde edilmiştir. Bu sayede simülasyonlarda kullanılan aynı tane boyu dağılımına sahip malzeme oluşturulmuş ve simülasyon sonuçları ile karşılaştırılabilmesi amacıyla pilot ölçekli testler yapılmıştır.

Doğrulama çalışmalarını gerçekleştirmek amacıyla kontrol edilebilen parametrelerin (besleme akış hızı, elek açıklığı boyu ve titreşim frekansı) farklı değerlerinde deneyler yapılmıştır. Deneylerde kullanılan bütün parametreler ve malzeme özellikleri birebir kullanılarak her pilot teste eşdeğer olan simülasyonlar gerçekleştirilerek ve sonuçlar karşılaştırılmıştır.

5.1 Besleme Akış Hızı

Simülasyonların tahmin gücünü inceleme amacıyla pilot ölçekli elekte farklı besleme akış hızlarına sahip deneyler gerçekleştirilmiştir. Voltaj regülatörü sayesinde

titreşimli besleyicinin besleme hızı değiştirilebilmektedir. Çizelge 5.1, deneylerde kullanılan besleme akış hızlarını göstermektedir.

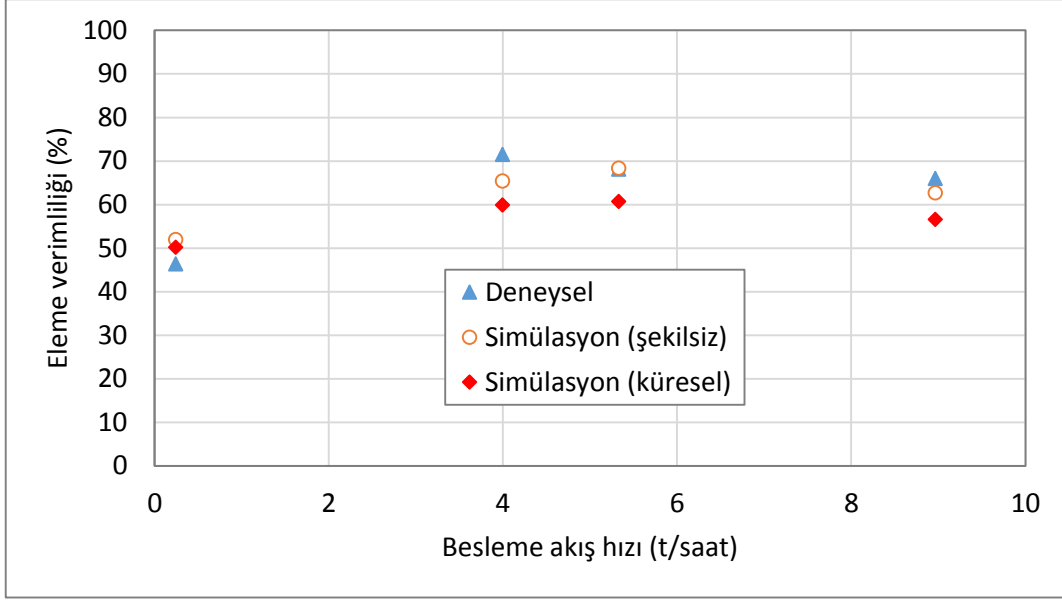
Çizelge 5.1. Doğrulama deneylerinde kullanılan besleme akış hızları

	Deney 1	Deney 2	Deney 3	Deney 4
Besleme akış hızı (t/saat)	0.24	3.99	5.33	8.96

Sistem dengeye geldikten sonra aynı zamanda alt ve üst akımlardan numuneler alınarak, alınan numunelerin ağırlıkları kaydedildikten sonra bu ürünlerin tane boyu dağılımları belirlenmiştir. Numune alma işleminin süre tutularak yapılması sayesinde ürün akışlarının akış hızları hesaplanmıştır. Elde edilen veriler kullanılarak geri hesaplanmış beslemenin tonajı ve tane boyu dağılımı, eleme işleminin verimliliği ve partiyon katsayıları hesaplanmıştır.

Deneylerde kullanılan besleme akış hızı, besleme tane boyu dağılımı, malzeme özellikleri, titreşim özellikleri, elek yüzeyi boyutları ve eğimi ve elek açıklığı gibi parametrelerin değerleri birebir olarak simülasyon koduna girilerek simülasyonlar gerçekleştirildi.

Farklı tane şekillerinin (küresel ya da küresel olmayan) simülasyon sonuçlarının gerçeğe yakınlığını ne ölçüde etkilediğini belirlemek amacıyla, simülasyonlar hem küresel tanelerle hem de şekilsiz (12 ve 5 küreden oluşan küresel olmayan tane şablonları, “küre kümeleri”) tanelerle gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.1’de pilot testler ve simülasyonlar sonucunda elde edilen verilerle hesaplanan eleme verimlilikleri sunulmaktadır.

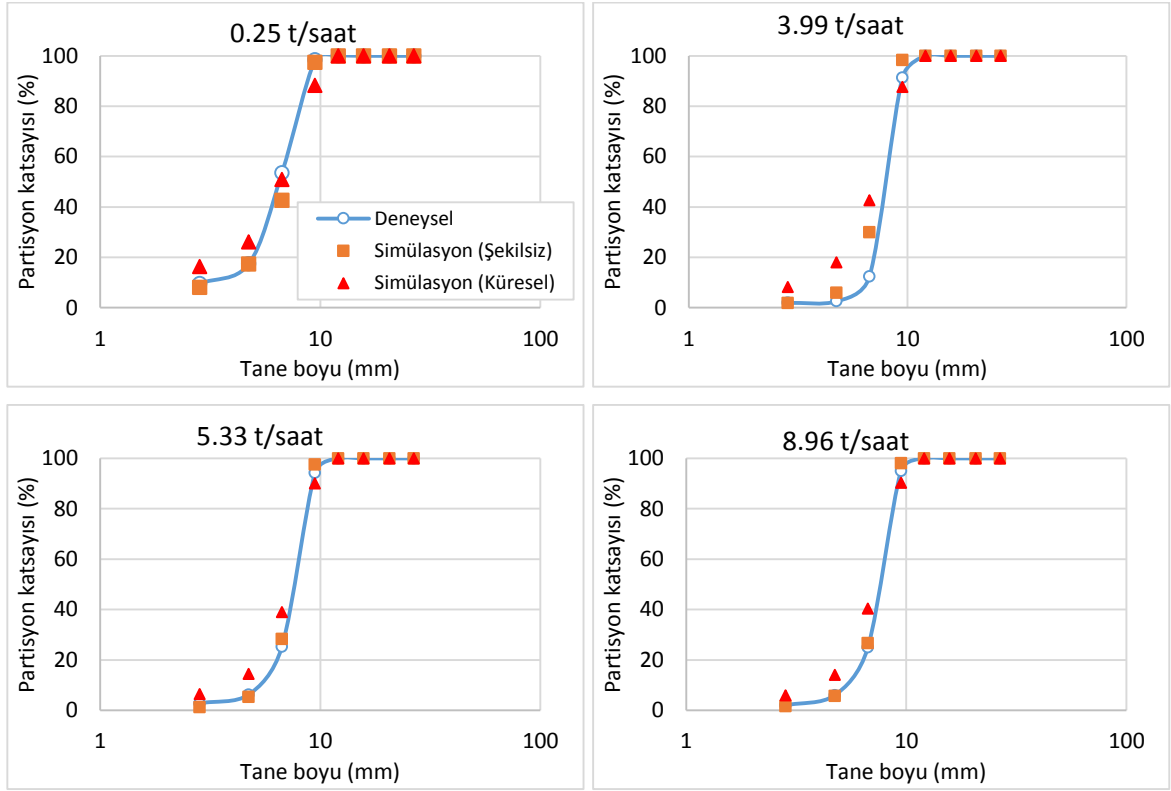


Şekil 5.1. Çeşitli besleme akış hızlarında gerçekleştirilen pilot test ve simülasyonların eleme verimlilikleri

Şekil 5.1'e göre, pilot eleklerle gerçekleştirilen deneylerin eleme verimlilikleri küresel ve şekilsiz tanelerle yapılan simülasyonların sonuçlarına oldukça yakındır. Tüm sonuçlar benzer bir eğilim göstermektedir. Verimlilik en düşük besleme hızında (0.24 t / saat) en düşük değere sahiptir. Pilot test sırasında da, bu besleme hızında bir yatak oluşumunun elde edilemediği gözlenmiştir. Ancak besleme hızının artışıyla eleme verimliliği de artmakta ve yaklaşık 4 t/saat'lik besleme hızında bir tepe değerine ulaşmaktadır. Daha yüksek besleme akış hızlarında eleme verimliliği azalmaktadır. Öte yandan, şekilsiz tanelerle yapılan simülasyonların sonuçlarının, pilot ölçekli eleme sonuçlarına çok daha yakın olduğu ortaya çıkmaktadır. Bu durum, şekilsiz tanelerin AEY simülasyonlarında kullanımının daha başarılı tahminler sağladığını ortaya koymaktadır.

Deneylerde gözlemlendiği gibi, en düşük besleme hızında (0.24 t / saat) elek yüzeyinde herhangi bir malzeme yatağı oluşmamaktadır. Besleme hızının artışıyla birlikte elek yüzeyinde oluşan malzeme yatağının kalınlığı artmaktadır. Bu durum, tanelerin elek yüzeyi boyunca en iyi taşınmasını ve ayrılmasını sağlayan optimum yatak kalınlığının önemini göstermektedir. Simülasyon sonuçlarının da aynı eğilimi takip etmesi, AEY simülasyonunun, eleme işlemi ile ilişkili dinamik süreçleri hassas olarak belirleyebildiğini ortaya koymaktadır.

Şekil 5.2, farklı besleme hızlarında yapılan pilot test ve simülasyonların performans eğrilerini göstermektedir. Verimlilik eğrilerine benzer bir şekilde, partisyon eğrilerinde de, pilot test ve simülasyonların sonuçları arasında oldukça yüksek bir uyum gözlenmektedir. Ayrıca şekilsiz tanelerle yapılan simülasyonların performans eğrilerinin de pilot test sonuçlarına daha yakın olduğu görülmektedir.



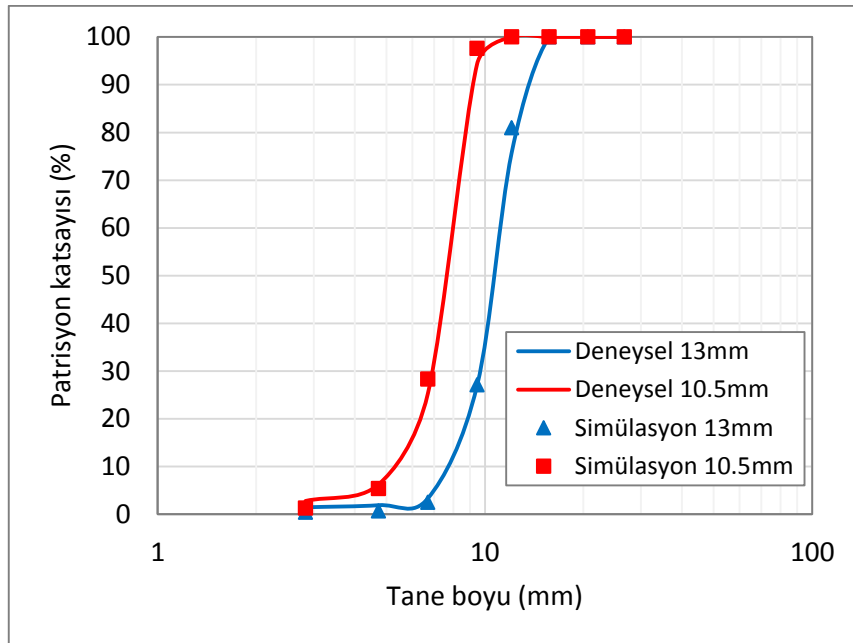
Şekil 5.2. Çeşitli besleme hızlarında yapılan pilot testler ve simülasyonların partisyon eğrileri

5.2 Elek Açıklığı

AEY ile geliştirilen modelin tahmin gücünün sınanması amacıyla 10.5 ve 13mm açıklıklarına sahip olan elek yüzeyleri ile pilot testler gerçekleştirilmiştir. Besleme akış hızı, besleme tane boyu dağılımı ve diğer parametreler bu deneylerde sabit tutularak yapılan pilot testlerde, sistem dengeye geldikten sonra alt ve üst akımlardan numuneler alınmıştır. Bu numunelerin tane boyu dağılımları belirlenerek, besleme tane boyu dağılımı, elek verimliliği ve partisyon katsayısı gibi bilgiler hesaplanmıştır.

Deneylerde kullanılan koşullar bire bir olarak AEY modeline girilerek simülasyonlar yapılmıştır. Bu simülasyonlarda da, pilot testlere benzer şekilde, besleme tane boyu dağılımı, elek verimliliği ve partisyon katsayıları hesaplanmıştır. Simülasyonların gerçeklik payını artırmak amacıyla şekilsiz taneler (küre-kümelere) kullanılmıştır. Elek açıklığının 10.5mm'den 13mm'ye artmasıyla, pilot test sonuçlarına göre eleme verimliliği %68.13'ten %80.50'ye yükselmektedir. Simülasyon sonuçlarında ise, eleme verimliliği sırasıyla %67.11 ve %78.38 olarak belirlenmiştir.

Farklı elek açıklıklarında yapılan pilot test ve simülasyonların partisyon eğrileri Şekil 5.3'te verilmektedir. Görüleceği üzere, pilot test ve simülasyon sonuçlarından hesaplanan partisyon katsayıları arasında çok iyi bir uyum ortaya çıkmaktadır.



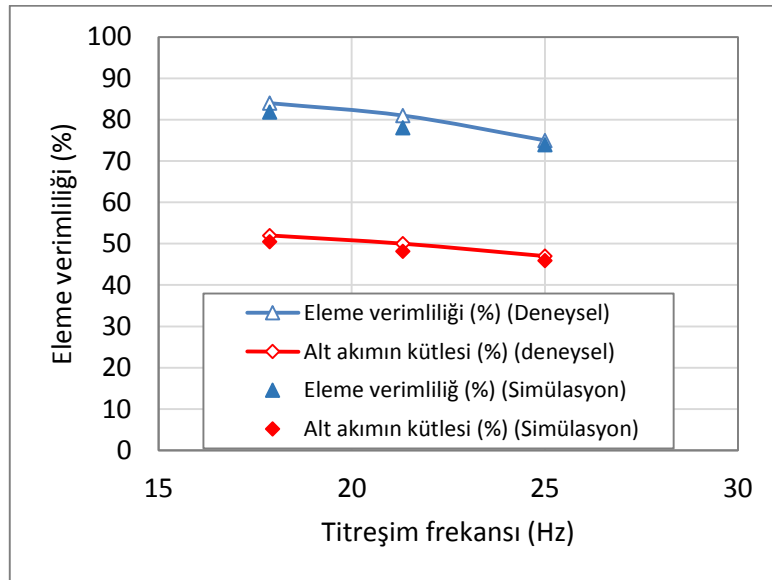
Şekil 5.3. Farklı elek açıklıklarında yapılan deneyler ve simülasyonların partisyon eğrileri

Elek açıklığının artışıyla beklendiği üzere kesme boyu (d_{50}) da artmakta ve partisyon eğrisi sağ tarafa kaymaktadır. Yapılan pilot testlerde 10.5mm'lik eleğin kesme boyu 7.65mm ve 13mm'lik eleğin kesme boyu 10.70mm olarak hesaplanmıştır. Simülasyon sonuçlarına göre, 10.5 ve 13mm'lik eleklerin kesme boyları sırasıyla 7.5 ve 10.30mm olarak hesaplanmıştır.

5.3 Titreşim Frekansı

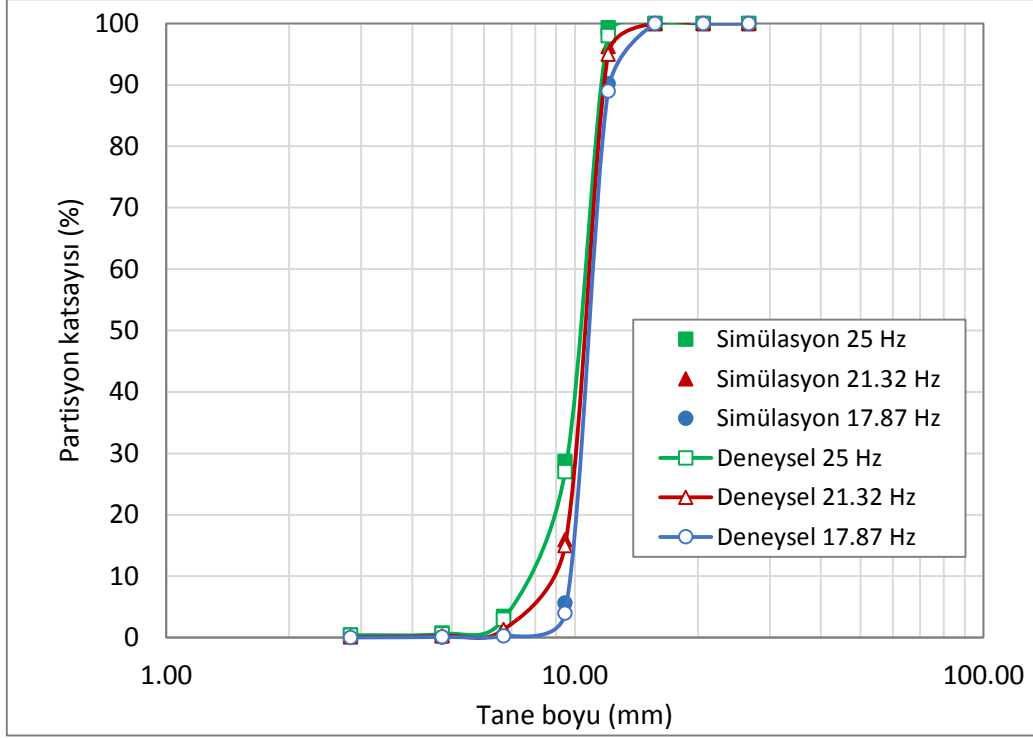
AEY temel alınarak yapılan simülasyonların tahmin gücünün sınanması amacıyla, bir frekans dönüştürücüsü kullanarak 17.87, 21.32 ve 25Hz titreşim frekanslarında pilot ölçekli testler gerçekleştirilmiştir. Tane boyu dağılımı, besleme akış hızı ve elek açıklığı (13mm), vb. değişkenler sabit tutularak yapılan pilot testlerin ardından, aynı koşullarda simülasyonlar yapılarak pilot ölçekli testler ile simülasyon sonuçları arasındaki uyum incelenmiştir.

Deneysel çalışmalar ve simülasyonların sonucunda elde edilen bilgilere göre, hem pilot ölçekli deneylerde hem de simülasyonlarda, titreşim frekansının artmasıyla elek verimliliği ve alt akımın kütlesi azaldığı belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar pilot testler ve simülasyon sonuçlarının birbirine oldukça yakın olduğunu göstermektedir (Şekil 5.4).



Şekil 5.4. Çeşitli titreşim frekanslarında pilot ölçekli testler ve simülasyonlar için hesaplanan eleme verimliliği ve alt akım kütlesi

Şekil 5.5 deneysel testler ve simülasyonların çeşitli titreşim frekanslarındaki partiyon eğrilerini göstermektedir. Şekil 5.5'te görüleceği üzere, titreşim frekansının artmasıyla birlikte partiyon eğrilerinin keskinliğinin hem deneysel hem de simülasyon sonuçlarında azaldığı belirlenmiştir. Ayrıca pilot ölçekli ve simülasyon sonuçları arasında oldukça yüksek bir uyum bulunmaktadır.



Şekil 5.5. Pilot testler ve simülasyonların çeşitli titreşim frekanslarındaki partisyon eğrileri

Çeşitli besleme akış hızı, elek açıklığı ve titreşim frekanslarında yapılan pilot ölçekli doğrulama deneylerin sonucu, AEY'in gerçek eleme işlemini yüksek doğrulukla tahmin edebildiğini göstermektedir. Küresel tanelerle yapılan simülasyonların sonuçları gerçek eleme sonuçlarına yakın olmakla birlikte, küresel olmayan tanelerle yapılan simülasyonların sonuçları gerçek eleme işlemi sonuçlarına daha da yakın olmaktadır.

6 SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ VE TARTIŞMA

Tez kapsamında yapılan simülasyon ve doğrulama çalışmaları, AEY yaklaşımının eleme işleminin modellenmesinde yüksek tahmin gücüne sahip olduğunu göstermektedir. 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 incelenebilmesi, vb. pek çok değişkenin sayısal olarak belirlenmesini sağlamaktadır.

Daha önce yapılan 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) tarafından gerçekleştirilmiştir [57] [49] [62]. Bu araştırmalar kapsamında gerçekleşen doğrulama çalışmaları laboratuvar ölçekli ve düşük besleme tonajlarında gerçekleştirilmişler. Tez kapsamında yapılan pilot ölçekli doğrulama deneyleri literatürdeki bu boşluğu doldurmaktadır.

Eleklerin tasarımı açısından önemli olan elek yüzeğinin eğimi, titreşim genliği, titreşim frekansı, titreşim yönü, yüzey boyutları, açıklıkların geometrisi ve açıklık oranı gibi parametrelerin, geliştirilen bu model yapısı sayesinde uygulama aşamasından önce incelenebilir olmaktadır

Üretilen modelin besleme tonajı, besleme tane boyu dağılımı, tanelerin şekli ve yoğunluğu gibi işletme parametrelerine duyarlı olması, bu modelin mevcut eleme tesislerinin performanslarının belirlenmesi ve iyileştirmesi konusunda yardımcı olacağını göstermektedir.

Yüksek kapasiteye sahip olan agrega üretiminde, kırıcıların yanı sıra eleklerin tasarımı ve optimizasyonu önem arz etmektedir. Bu bağlantıda eleklerin performansındaki en ufak iyileştirme, üretim kapasitelerinin büyük olması sebebiyle,

yüksek ekonomik öneme sahip olmaktadır. Bu doğrultuda, bu tez çalışmasında geliştirilen model yapısının, gerek agrega üretimi gerekse cevher hazırlama tesislerinde kullanılan eleklerin tasarımı aşamasında yardımcı olabileceği düşünülmektedir.

Günümüzde tasarım aşamasında olan cevher hazırlama ve agrega tesislerinin elek seçimleri elek üreticilerinin kullandığı ampirik modellerle sağlanmaktadır. Kullanılan modeller belli derecede başarı sağlamakla birlikte, cevher değişkenliğine (yoğunluk, şekil, sertlik vb.) duyarlı olmamaları nedeniyle yüksek emniyet faktörleri içermektedirler. Elde edilen sayısal model cevher yapısına uygun optimum elek seçiminde yardımcı olacaktır.

Diğer taraftan, beslemede bulunan tanelerin şekil, sertlik ve nem oranı gibi fiziksel özelliklerin tam olarak model yapısına yansıtılamaması, yaş eleme işleminin AEY ile modellenememesi ve çok ince tane boylarında (örn. -200 mikron) AEY simülasyonlarının makul sürelerde gerçekleştirilememesi AEY'in zayıf noktalarını oluşturmaktadır. Bu nedenle, model yapılarının bu parametrelerin simülasyonunu sağlayacak şekilde modifiye edilmesi, ayrıca AEY'in farklı modelleme teknikleri (örn. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği) ile birlikte kullanılmasına yönelik yapılacak çalışmalar sayesinde bu zayıf noktaların asgariye indirilebilmesi mümkün olacaktır.

7 SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez kapsamında sayısal olan ayırık elamanlar yöntemi (AEY) ile endüstriyel eleme işleminin modellenmesi amacıyla pilot testler ve simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Simülasyonların gerçeklik payını sınamak amacıyla yapılan çeşitli pilot ölçekli testler ve bu deneylere eşdeğer koşullarda yapılan simülasyonların sonuçları, AEY'in eleme işlemini oldukça yüksek doğrulukla modelleyebildiğini göstermektedir.

Elek yüzeyinin eğimi, titreşim genliği, titreşim frekansı (sıklığı), titreşim yönü, elek yüzeyinin boyutları, elek açıklığının boyutları, elek açıklığının şekli ve elek yüzeyinin açıklık oranı gibi tasarım değişkenlerinin yanı sıra, besleme akış hızı, besleme tane boyu dağılımı, tane şekli ve tana yoğunluğu gibi işlem değişkenlerinin eleme performansındaki etkilerinin incelenmesi amacıyla her biri en az 2-3 gün süren (bazı koşullarda 1 haftayı bulan) 50'yi 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 (optimum) 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 olan tanelerin eleme verimi, titreşim frekansının düşüşüyle artmaktadır.

- Titreşim eğiminin 30° ve 90° arasındaki değişimi eleme verimliliğini önemli bir ölçüde etkilememekle 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.
- Elek yüzeyinin uzunluğunun artışıyla eleme verimliliği, alt akımın kütlesi ve eleme kesme boyu artmakta ve doğal olarak tanelerin elek yüzeyinde kalma süreleri uzamaktadır.
- Elek açıklığının artışıyla eleme verimliliği, alt akım kütlesi ve elemanın kesme boyu artmaktadır. Ayrıca elek açıklığının artışıyla eleme kapasitesi de artmaktadır.
- Elek açıklığının şeklinin etkisini araştırmak amacıyla, dikdörtgen şekilli açıklıklarda farklı en/boy oranlarında gerçekleştirilen simülasyonlarda, en/boy oranının artmasıyla eleme verimliliğinin arttığı ancak tanelerin elek yüzeyinde kalma süresinin de uzadığı sayısal olarak gösterilmiştir. Dolayısıyla eleme birimlerinde hedefin yüksek kapasite olduğu durumlarda düşük en/boy oranına sahip elekler tercih edilmekte, ama yüksek eleme verimi amaçlandığı durumlarda büyük en/boy oranları tercih edilmektedir.
- Elek yüzeyi açıklık oranının artışıyla eleme verimliliği, eleme kesme boyu ve alt akımın kütlesi azalmaktadır.
- 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. Ancak 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 kütlelerinin 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.
- Elenecek tanelerin yoğunluğunun eleme performansındaki etkileri incelemek amacıyla iki farklı yaklaşım kullanılmıştır. Birinci yaklaşımda farklı yoğunluklara sahip tanelerle yapılan simülasyonlarda tane yoğunluğu arttıkça eleme verimliliği ve alt akımın kütlesi hafifçe artmaktadır. Ayrıca daha yoğun tanelerin elek yüzeyinde durma zamanları uzun olmaktadır. İkinci yaklaşımda farklı yoğunluklara sahip olan tanelerden oluşan bir besleme ile gerçekleştirilen simülasyonda, farklı yoğunluğa sahip olan tanelerin elek altı ve elek üstü ürünlerdeki tane boyu dağılımları arasında belirgin bir farklılık tespit edilmemiştir. Ancak daha yoğun tanelerin elek yüzeyinde durma zamanlarda biraz daha yüksek olduğu görülmüştür.

Yapılan simülasyonların gerçeklik payını sınamak amacıyla yapılan pilot ölçekli testlerde, besleme akış hızı, elek açıklığı ve titreşim frekansı gibi parametrelerin etkileri, aynı koşullarda gerçekleştirilen simülasyon sonuçları ile karşılaştırıldığında,

simülasyon sonuçlarının pilot test sonuçlarına yüksek uyum sergilediği belirlenmiştir. Özellikle, küresel olmayan taneler ile gerçekleştirilen simülasyon sonuçlarının, küresel tanelere kıyasla daha gerçeğe yakın sonuçlar ürettiği ortaya çıkmaktadır.

Tez kapsamında yapılan çalışmalar, AEY yaklaşımının eleme işleminin modellenmesinde yüksek tahmin gücüne sahip olduğunu göstermektedir. 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 incelenebilmesi, vb. pek çok değişkenin sayısal olarak belirlenmesini sağlamaktadır. Tez kapsamında geliştirilmiş olan model yapısının, tesis tasarımı, elek tasarımı, optimizasyonu ve performanslarının değerlendirmesi çalışmalarında kullanılabilecek, yüksek tahmin gücü sağlayan bir araç olduğu ortaya konmaktadır.

Eleme işleminin sayısal modellemesi konusunda, bu kadar kapsamlı bir çalışmaya literatürde rastlanmamakla birlikte, bu çalışmanın devamı niteliğinde, eleme işleminin farklı uygulamaları hakkında halen yapılabilecek çalışmalar bulunmaktadır. Taneli malzemelerin yanı sıra akışkan hareketlerinin modellenmesini de gerektiren yaş eleme işleminin modellenmesi, AEY'in yanı sıra, hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) veya düzleştirilmiş parçacık hidrodinamiği (DPH) modelleme yapılarının da kullanımı ile mümkün olabilecektir. Aynı zamanda benzer yaklaşımlar kullanılarak veya AEY model yapısında değişiklikler yaparak nemli malzemelerin elenmesi konusunun incelenmesi de mümkün görünmektedir. Buna ek olarak, AEY, HAD ve DPH model yapılarının kullanımı sayesinde, farklı tip eleklerde (örn. muz elekler, düz elekler, susuzlandırma elekleri, tromel elekler, vb.) meydana gelen ayırım ayrıntılarıyla incelenebilecektir. Bu sayede, farklı ekipman tasarımlarının üretilebilmesi veya mevcut tasarımların optimize edilmesi mümkün olabilecektir.

KAYNAKLAR

- [1] Mular, A. L., Halbe, D. N., and Barratt, D. J., *Mineral Processing Plant Design , Practice , and Control*. Vancouver, British Columbia: SME, **2002**.
- [2] Elskamp, F. and Kruggel-Emden, H., Review and benchmarking of process models for batch *screening* based on discrete element simulations, *Advanced Powder Technology*, pp. 1–19, **2014**.
- [3] Cleary, P. W., Morrison, R., and Morrell, S., Comparison of DEM and Experiment for a Scale Model SAG Mill, *International Journal of Mineral Processing*, vol. 68, pp. 129–165, **2003**.
- [4] Gaudin, A. ., *Principles of Mineral Dressing*. New York: McGraw-Hill, **1939**.
- [5] Whiten, W. J., The Simulation of Crushing Plants with Models Developed Using Multiple Spline Regression, *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, **1972**.
- [6] Subasinghe, G. K. N. S., Schaap, W., and Kelly, E. G., Modelling the Screening Process — an Empirical Approach, *Minerals Engineering*, vol. 2, no. 2, pp. 235–244, Jan. **1989**.
- [7] Whiten, W. J., Lecture Notes for Winter School on Mineral Processing, *Department of Mining and Metallurgical Engineering, University of Queensland*, **1966**.
- [8] Napier-Munn, T. J., Morrell, S., Morrison, R. D., and Kojovic, T., *Mineral Comminution Circuits Their Operation and Optimisation*. Queensland: Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre, **1996**.
- [9] Karra, V. ., Development of a Model for Predicting the Screening Performance of a Vibrating Screen, *The Canadian Mining and Metallurgical Bulletin*, **1979**
- [10] Hatch, C. . and Mular, A. L., Simulation of the Brenda Mines Ltd. Secondary Crushing Plant, *SME-AIME Annual General Meeting*, **1979**.
- [11] Cundall, P. A. and Strack, O. D. L., A Discrete Numerical Model for Granular Assemblies, *Géotechnique*, vol. 29, no. 1, pp. 47–65, Jan. **1979**.
- [12] Mishra, B. K. and Rajamani, R. K., The Discrete Element Method for the Simulation of Ball Mills, *Applied Mathematical Modelling*, vol. 16, no. 11, pp.

- 598–604, Nov. **1992**.
- [13] Yokoyama, T., Tamura, K., Usui, H., and Jimbo, G., Simulation of Ball Behavior in a Vibration Mill in Relation With its Grinding Rate: Effects of Fractional Ball Filling and Liquid Viscosity, *International Journal of Mineral Processing*, vol. 44–45, pp. 413–424, Mar. **1996**.
- [14] Langston, P. A., Tüzün, U., and Heyes, D. M., Discrete Element Simulation of Granular Flow in 2D and 3D Hoppers: Dependence of Discharge Rate and Wall Stress on Particle interactions, *Chemical Engineering Science*, vol. 50, no. 6, pp. 967–987, Mar. **1995**.
- [15] Mishra, B. K. and Mehrotra, S. P., A Jig Model Based on the Discrete Element Method and its Experimental Validation, *International Journal of Mineral Processing*, vol. 63, no. 4, pp. 177–189, Dec. **2001**.
- [16] Mio, H., Kano, J., Saito, F., and Kaneko, K., Effects of Rotational Direction and Rotation-to-Revolution Speed Ratio in Planetary Ball Milling, *Materials Science and Engineering. A*, vol. 332, no. 1–2, pp. 75–80, Jul. **2002**.
- [17] Liffman, K., Nguyen, M., Metcalfe, G., and Cleary, P., Forces in Piles of Granular Material: An Analytic And 3D DEM Study, *Granular Material*, vol. 3, no. 3, pp. 165–176, Aug. **2001**.
- [18] Nesbit, P. Q. and Moys, M. H., Load Behaviour in the Hicom Nutating Mill, *Minerals Engineering*, vol. 11, no. 10, pp. 979–988, Oct. **1998**.
- [19] Yang, R. Y., Zou, R. P., and Yu, A. B., Microdynamic Analysis of Particle Flow in a Horizontal Rotating Drum, *Powder Technology*, vol. 130, no. 1–3, pp. 138–146, Feb. **2003**.
- [20] Gera, D., Gautam, M., Tsuji, Y., Kawaguchi, T., and Tanaka, T., Computer Simulation of Bubbles in Large-Particle Fluidized Beds, *Powder Technology*, vol. 98, no. 1, pp. 38–47, Jul. **1998**.
- [21] Delaney, G. W., Morrison, R. D., Sinnott, M. D., Cummins, S., and Cleary, P. W., DEM Modelling of Non-Spherical Particle Breakage and Flow in an Industrial Scale Cone Crusher, *Minerals Engineering*, vol. 74, pp. 112–122, **2015**.
- [22] Sinnott, M. D., Cleary, P. W., and Morrison, R. D., Is Media Shape Important

- for Grinding Performance in Stirred Mills?," *Minerals Engineering*, vol. 24, no. 2, pp. 138–151, **2011**.
- [23] Zhao, L., Zhao, Y., Liu, C., Li, J., and Dong, H., Simulation of the Screening Process on a Circularly Vibrating Screen Using 3D-DEM, *Mining Science and Technology (China)*, vol. 21, no. 5, pp. 677–680, Sep. **2011**.
- [24] Alkhalidi, H., Ergenzinger, C., Fleißner, F., and Eberhard, P., Comparison Between Two Different Mesh Descriptions Used for Simulation of Sieving Processes," *Granular Material*, vol. 10, no. 3, pp. 223–229, Feb. **2008**.
- [25] Tung, K. L., Chang, T. H., Lin, Y.-F., and Chyang, C.-S., DEM Simulation of a 3D Vertical Vibratory Screening Process: The Study of a Simulated Woven-Mesh Structure," *AIChE Journal*, vol. 57, no. 4, pp. 918–928, Apr. **2011**.
- [26] Liu, C., Wang, H., Zhao, Y., Zhao, L., and Dong, H., DEM Simulation of Particle Flow on a Single Deck Banana Screen, *International Journal of Mining Science and Technology*, vol. 23, no. 2, pp. 273–277, Mar. **2013**.
- [27] Dong, K. J., Yu, A. B., and Brake, I., "DEM Simulation of Particle Flow on a Multi-Deck Banana Screen, *Minerals Engineering*, vol. 22, no. 11, pp. 910–920, Oct. **2009**.
- [28] Xiao, J. and Tong, X., Particle Stratification and Penetration of a Linear Vibrating Screen by the Discrete Element Method, *International Journal of Mining Science and Technology*, vol. 22, no. 3, pp. 357–362, May **2012**.
- [29] Fernandez, J. W., Cleary, P. W., Sinnott, M. D., and Morrison, R. D., Using SPH One-Way Coupled to DEM to Model Wet Industrial Banana Screens, *Minerals Engineering*, vol. 24, no. 8, pp. 741–753, Jul. **2011**.
- [30] Orhan, E. ., Yüksek Alan Şiddetli Kalıcı Mıknatıslı Rulo Tipi Kuru Manyetik Ayırıcıların Ayırık Elemanlar Yöntemi ile Modellenmesi, *Hacettepe Üniversitesi*, **2008**.
- [31] Gülsoy, Ö. and Orhan, E. ., Yüksek Alan Şiddetli Kalıcı Mıknatıslı Rulo Tipi Kuru Manyetik Ayırıcıların Ayırık Elemanlar Yöntemi ile Modellenmesi, *TÜBİTAK*, **2006**.
- [32] Ting, J. M. and Corkum, B. T., Computational Laboratory for Discrete Element Geomechanics, *Journal of Computing in Civil Engineering*, vol. 6, no. 2, pp.

- 129–146, **1992**.
- [33] Kuwabara, G. and Kono, K., Restitution Coefficient in a Collision between Two Spheres, *Japanese Journal of Applied Physics*, vol. 26, no. Part 1, No. 8, pp. 1230–1233, Aug. **1987**.
- [34] Cleary, P. W., Predicting Charge Motion, Power Draw, Segregation and Wear in Ball Mills Using Discrete Element Methods, *Minerals Engineering*, vol. 11, no. 11, pp. 1061–1080, Nov. **1998**.
- [35] Balevičius, R., Džiugys, A., Kačianauskas, R., Maknickas, A., and Vislavičius, K., Investigation of Performance of Programming Approaches and Languages Used for Numerical Simulation of Granular Material by the Discrete Element Method, *Computer Physics Communications*, vol. 175, no. 6, pp. 404–415, Sep. **2006**.
- [36] Chen, J., Huang, B., Chen, F., and Shu, X., Application of Discrete Element Method to Superpave Gyrotory Compaction, *Road Materials and Pavement Design*, vol. 13, no. 3, pp. 480–500, Sep. **2012**.
- [37] Goniva, C., Kloss, C., Deen, N. G., Kuipers, J. A. M., and Pirker, S., “Influence of rolling friction on single spout fluidized bed simulation,” *Particuology*, vol. 10, no. 5, pp. 582–591, Oct. 2012.
- [38] “LAMMPS,” 2017. [Online]. Available: <http://lammmps.sandia.gov/doc/Manual.html>. [Accessed: 04-Oct-2017].
- [39] “LIGGGHTS® Open Source Discrete Element Method Particle Simulation Code,” 2017. [Online]. Available: <https://www.cfdem.com/liggghtsr-open-source-discrete-element-method-particle-simulation-code>. [Accessed: 04-Oct-2017].
- [40] Shimosaka, A., Higashihara, S., and Hidaka, J., Estimation of the Sieving Rate of Powders Using Computer Simulation, *Advanced Powder Technology*, vol. 11, no. 4, pp. 487–502, Dec. **2000**.
- [41] CHEN, Y. H. and Tong, X., Application of the DEM to Screening Process: A 3D Simulation, *Mining Science and Technology*, vol. 19, no. 4, pp. 493–497, Jul. **2009**.
- [42] Li, J., Webb, C., Pandiella, S. S., and Campbell, G. M., Discrete Particle

- Motion on Sieves - A Numerical Study Using the DEM Simulation, *Powder Technology.*, vol. 133, pp. 190–202, **2003**.
- [43] Cleary, P. W., Large Scale Industrial DEM Modelling, *Engineering Computations*, vol. 21, no. 2/3/4, pp. 169–204, Mar. **2004**.
- [44] Dong, K. J., Yu, a. B., and Brake, I., DEM Simulation of Particle Flow on a Multi-Deck Banana Screen, *Minerals Engineering*, vol. 22, no. 11, pp. 910–920, **2009**.
- [45] Alkhaldi, H. and Eberhard, P., Particle Screening Phenomena in an Oblique Multi-Level Tumbling Reservoir: A Numerical Study Using Discrete Element Simulation, *Granul Matter*, vol. 9, no. 6, pp. 415–429, Nov. **2007**.
- [46] Chen, Y.-S., Hsiau, S.-S., Lee, H.-Y., Chyou, Y.-P., and Hsu, C.-J., Size Separation of Particulates in A Trommel Screen System, *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*. vol. 49, no. 11, pp. 1214–1221, Nov. **2010**.
- [47] Cleary, P. W., Sinnott, M. D., and Morrison, R. D., Separation Performance of Double Deck Banana Screens – Part 1: Flow and Separation for Different Accelerations, *Minerals Engineering*, vol. 22, no. 14, pp. 1218–1229, **2009**.
- [48] Cleary, P. W., Sinnott, M. D., and Morrison, R. D., Separation Performance of Double Deck Banana Screens - Part 2: Quantitative Predictions, *Minerals Engineering*, vol. 22, no. 14, pp. 1230–1244, **2009**.
- [49] Kruggel-Emden, H. and Elskamp, F., Modeling of Screening Processes with the Discrete Element Method Involving Non-Spherical Particles, *Chemical Engineering & Technology*, vol. 37, no. 5, pp. 847–856, May **2014**.
- [50] Aghlmandi Harzanagh, A., Orhan, E. C., and Ergun, S. L., Discrete Element Modelling of Vibrating Screens, *Minerals Engineering*, vol. 121, pp. 107–121, **2018**
- [51] Zhao, L., Zhao, Y., Liu, C., Li, J., and Dong, H., Simulation of the Screening Process on a Circularly Vibrating Screen Using 3D-DEM, *Mining Science and Technology (China)*, vol. 21, no. 5, pp. 677–680, **2011**.
- [52] Xiao, J. and Tong, X., Particle Stratification and Penetration of a Linear Vibrating Screen by the Discrete Element Method, *International Journal of Mining Science and Technology*, vol. 22, no. 3, pp. 357–362, **2012**.
- [53] Dong, H., Liu, C., Zhao, Y., and Zhao, L., Influence of Vibration Mode on the

- Screening Process, *International Journal of Mining Science and Technology*, vol. 23, no. 1, pp. 95–98, Jan. **2013**.
- [54] Xiao, J. and Tong, X., Characteristics and Efficiency of a New Vibrating Screen With a Swing Trace, *Particuology*, vol. 11, no. 5, pp. 601–606, Oct. **2013**.
- [55] Dong, K. J. and Yu, a. B., Numerical Simulation of the Particle Flow and Sieving Behaviour on Sieve Bend/Low Head Screen Combination, *Minerals Engineering*, vol. 31, pp. 2–9, **2012**.
- [56] Fernandez, J. W., Cleary, P. W., Sinnott, M. D., and Morrison, R. D., Using SPH One-Way Coupled to DEM to Model Wet Industrial Banana Screens, *Minerals Engineering*, vol. 24, no. 8, pp. 741–753, **2011**.
- [57] Hilden, M. M., A Dimensional Analysis Approach to the Scale-Up and Modelling of Industrial Screens, *PhD-thesis, University of Queensland*, **2007**.
- [58] Jahani, M., Farzanegan, A., and Noaparast, M., Investigation of Screening Performance of Banana Screens Using LIGGGHTS DEM Solver, *Powder Technology*, vol. 283, pp. 32–47, **2015**.
- [59] Jafari, A. and Saljooghi Nezhad, V., Employing DEM to Study the Impact of Different Parameters on the Screening Efficiency and Mesh Wear, *Powder Technology*, vol. 297, pp. 126–143, **2016**.
- [60] Yin, Z., Zhang, H., and Han, T., Simulation of Particle Flow on an Elliptical Vibrating Screen Using the Discrete Element Method, *Powder Technology*, vol. 302, pp. 443–454, **2016**.
- [61] Dong, K., Esfandiary, A. H., and Yu, A. B., Discrete Particle Simulation of Particle Flow and Separation on a Vibrating Screen: Effect of Aperture Shape, *Powder Technology*, **2016**.
- [62] Zhao, L., Zhao, Y., Bao, C., Hou, Q., and Yu, A., Laboratory-Scale Validation of a DEM Model of Screening Processes with Circular Vibration, *Powder Technology*, vol. 303, pp. 269–277, **2016**.

EKLER

EK 1 Simülasyon Kodları

EK 1.1. Elek eğimi simülasyonlarının örnek kodu

```
# one Deck vibrating screen Ahad Aghlmandi
#time=25 s
#sim1 (referans)
atom_style granular
atom_modify map array
boundary f f f
newton off
communicate multi vel yes
units si
region reg block -0.1 1.05 0 0.260 -0.02 1 units box
create_box 1 reg
#read_restart poly.%.1
neighbor 1.65e-3 bin
neigh_modify delay 0
#Material properties
fix m1 all property/global youngsModulus peratomtype 5.0e7
fix m2 all property/global poissonsRatio peratomtype 0.45
fix m3 all property/global coefficientRestitution peratomtypepair 1 0.3
fix m4 all property/global coefficientFriction peratomtypepair 1 0.5
fix m5 all property/global coefficientRollingFriction peratomtypepair 1 0.01 #
The optional rolling friction model is activated via rolling_friction = 'cdt'
#pair style
pair_style gran/hertz/history rolling_friction cdt tangential_damping on
pair_coeff * *
timestep 0.000005
fix 1 all nve/sphere
fix 2 all gravity 9.81 vector 0.0 0.0 -1.0
#the Screen
fix cad all mesh/surface/stress file 10.5mm_10der.stl type 1

#motion: Z yönünde sade hareket
fix drum_move3 all move/mesh mesh cad viblin axis 0 0 1 order 1 amplitude
0.005 phase 0 period 0.04
#Wall Properties
fix granwalls all wall/gran/hertz/history mesh n_meshes 1 meshes cad
rolling_friction cdt tangential_damping on
#distributions for insertion
fix pts1 all particletemplate/sphere 1 atom_type 1 density constant
2700 radius constant 0.01331912
fix pts2 all particletemplate/sphere 1 atom_type 1 density constant
2700 radius constant 0.010315038
fix pts3 all particletemplate/sphere 1 atom_type 1 density constant
2700 radius constant 0.007858117
fix pts4 all particletemplate/sphere 1 atom_type 1 density constant
2700 radius constant 0.006033241
fix pts5 all particletemplate/sphere 1 atom_type 1 density constant
2700 radius constant 0.004732864
fix pts6 all particletemplate/sphere 1 atom_type 1 density constant
2700 radius constant 0.00334664
fix pts7 all particletemplate/sphere 1 atom_type 1 density constant
2700 radius constant 0.002366432
fix pts8 all particletemplate/sphere 1 atom_type 1 density constant
2700 radius constant 0.001414214
fix pdd1 all particledistribution/discrete 1 8 pts1 0.1 pts2 0.1 pts3
0.2 pts4 0.08 pts5 0.14 pts6 0.14 pts7 0.14 pts8 0.1
#region for insertion
region factory block 0.055 0.15 0.015 0.245 0.28 0.555 units box
#particle insertion
#particle insertion
#fix ins nve_group insert/stream seed 5330 distributiontemplate
pdd1 &
```

```

nparticles 8000 massrate 80 insert_every 10000 overlapcheck yes all_in no vel
constant 0.0 0.0 -1.0 &
insertion_face inface
fix          insertion all insert/rate/region seed 42 distributiontemplate pdd1
nparticles 10000000 particlerate 12743 insert_every 10000 all_in yes vel constant
0.0 0.0 -1 region factory
#apply nve integration to all particles that are inserted as single particles
#fix integr nve_group nve/sphere
#Restart order
restart 1000 poly.%.1 poly.%.2
#thermo settings
compute 1 all erotate/sphere
thermo_style custom step atoms ke c_1 vol
thermo 1000
thermo_modify lost ignore norm no
compute_modify thermo_temp dynamic yes
#insert the first particles so that dump is not empty
run 1
dump dmp all custom 1000 post/dump*.liggghts id type radius mass x y z ix iy iz
vx vy vz fx fy fz omegax omegay omegaz diameter tqx tqy tqz
dump          dumpstress all mesh/gran/VTK 1000 post/dump*.vtk stress cad
#insert particles
run 5000000 upto
unfix insertion
#run
#run 400000 upto

```

EK 1.2. Titreşim genliği simülasyonlarının örnek kodu

```

# one Deck vibrating screen Ahad Aghlmandi
#time=25 s
#sim1 (referans+Genlik 3mm)
atom_style granular
atom_modify map array
boundary f f f
newton off
communicate multi vel yes
units si
region reg block -0.1 1.05 0 0.260 -0.02 1 units box
#create_box 1 reg
read_restart poly.%.1
neighbor 1.65e-3 bin
neigh_modify delay 0
#Material properties
fix m1 all property/global youngsModulus peratomtype 5.0e7
fix m2 all property/global poissonsRatio peratomtype 0.45
fix m3 all property/global coefficientRestitution peratomtypepair 1 0.3
fix m4 all property/global coefficientFriction peratomtypepair 1 0.5
fix m5 all property/global coefficientRollingFriction peratomtypepair 1 0.01 #
The optional rolling friction model is activated via rolling_friction = 'cdt'

#pair style
pair_style gran/hertz/history rolling_friction cdt tangential_damping on
pair_coeff * *
timestep 0.000005
fix 1 all nve/sphere
fix 2 all gravity 9.81 vector 0.0 0.0 -1.0
#the Screen
fix          cad all mesh/surface/stress file 10.5mm_10der.stl type 1

#motion: Z yönünde sade hareket
fix          drum_move3 all move/mesh mesh cad viblin axis 0 0 1 order 1 amplitude
0.003 phase 0 period 0.04
#Wall Properties
fix          granwalls all wall/gran/hertz/history mesh n_meshes 1 meshes cad
rolling_friction cdt tangential_damping on

```

```

#distributions for insertion
fix          pts1 all particletemplate/sphere 1 atom_type 1 density constant
2700 radius constant 0.01331912
fix          pts2 all particletemplate/sphere 1 atom_type 1 density constant
2700 radius constant 0.010315038
fix          pts3 all particletemplate/sphere 1 atom_type 1 density constant
2700 radius constant 0.007858117
fix          pts4 all particletemplate/sphere 1 atom_type 1 density constant
2700 radius constant 0.006033241
fix          pts5 all particletemplate/sphere 1 atom_type 1 density constant
2700 radius constant 0.004732864
fix          pts6 all particletemplate/sphere 1 atom_type 1 density constant
2700 radius constant 0.00334664
fix          pts7 all particletemplate/sphere 1 atom_type 1 density constant
2700 radius constant 0.002366432
fix          pts8 all particletemplate/sphere 1 atom_type 1 density constant
2700 radius constant 0.001414214
fix          pdd1 all particledistribution/discrete 1 8 pts1 0.1 pts2 0.1 pts3
0.2 pts4 0.08 pts5 0.14 pts6 0.14 pts7 0.14 pts8 0.1
#region for insertion
region factory block 0.055 0.15 0.015 0.245 0.28 0.555 units box
#particle insertion
#particle insertion
#fix          ins nve_group insert/stream seed 5330 distributiontemplate
pdd1 &
          nparticles 8000 massrate 80 insert_every 10000
overlapcheck yes all_in no vel constant 0.0 0.0 -1.0 &
          insertion_face inface
fix          insertion all insert/rate/region seed 42 distributiontemplate pdd1
nparticles 10000000 particlerate 12743 insert_every 10000 all_in yes vel constant
0.0 0.0 -1 region factory

#apply nve integration to all particles that are inserted as single particles
#fix integr nve_group nve/sphere

#Restart order
restart 1000 poly.%1 poly.%2
#thermo settings
compute 1 all erotate/sphere
thermo_style custom step atoms ke c_1 vol
thermo 1000
thermo_modify lost ignore norm no
compute_modify thermo_temp dynamic yes
#insert the first particles so that dump is not empty
run 1
dump dmp all custom 1000 post/dump*.liggghts id type radius mass x y z ix iy iz
vx vy vz fx fy fz omegax omegay omegaz diameter tqx tqy tqz
dump          dumpstress all mesh/gran/VTK 1000 post/dump*.vtk stress cad
#insert particles
run 5000000 upto
unfix insertion
#run
#run 400000 upto

```

EK 1.3. Titreşim frekansı simülasyonlarının örnek kodu

```

# one Deck vibrating screen Ahad Aghlmandi
#time=25 s
#sim10 (referans+periyod 0.066666667)
atom_style granular
atom_modify map array
boundary f f f
newton off
communicate multi vel yes
units si
region reg block -0.1 1.05 0 0.260 -0.02 1 units box
create box 1 reg

```

```

#read_restart poly.%.1
neighbor 1.65e-3 bin
neigh_modify delay 0
#Material properties
fix m1 all property/global youngsModulus peratomtype 5.0e7
fix m2 all property/global poissonsRatio peratomtype 0.45
fix m3 all property/global coefficientRestitution peratomtypepair 1 0.3
fix m4 all property/global coefficientFriction peratomtypepair 1 0.5
fix m5 all property/global coefficientRollingFriction peratomtypepair 1 0.01 #
The optional rolling friction model is activated via rolling_friction = 'cdt'

#pair style
pair_style gran/hertz/history rolling_friction cdt tangential_damping on
pair_coeff * *
timestep 0.000005
fix 1 all nve/sphere
fix 2 all gravity 9.81 vector 0.0 0.0 -1.0
#the Screen
fix cad all mesh/surface/stress file 10.5mm_10der.stl type 1

#motion: Z yönünde sade hareket
fix drum_move3 all move/mesh mesh cad viblin axis 0 0 1 order 1 amplitude
0.005 phase 0 period 0.066666667

#Wall Properties
fix granwalls all wall/gran/hertz/history mesh n_meshes 1 meshes cad
rolling_friction cdt tangential_damping on
#distributions for insertion
fix pts1 all particletemplate/sphere 1 atom_type 1 density constant
2700 radius constant 0.01331912
fix pts2 all particletemplate/sphere 1 atom_type 1 density constant
2700 radius constant 0.010315038
fix pts3 all particletemplate/sphere 1 atom_type 1 density constant
2700 radius constant 0.007858117
fix pts4 all particletemplate/sphere 1 atom_type 1 density constant
2700 radius constant 0.006033241
fix pts5 all particletemplate/sphere 1 atom_type 1 density constant
2700 radius constant 0.004732864
fix pts6 all particletemplate/sphere 1 atom_type 1 density constant
2700 radius constant 0.00334664
fix pts7 all particletemplate/sphere 1 atom_type 1 density constant
2700 radius constant 0.002366432
fix pts8 all particletemplate/sphere 1 atom_type 1 density constant
2700 radius constant 0.001414214
fix pdd1 all particledistribution/discrete 1 8 pts1 0.1 pts2 0.1 pts3
0.2 pts4 0.08 pts5 0.14 pts6 0.14 pts7 0.14 pts8 0.1
#region for insertion
region factory block 0.055 0.15 0.015 0.245 0.28 0.555 units box
#particle insertion
#particle insertion
#fix ins nve_group insert/stream seed 5330 distributiontemplate
pdd1 &
nparticles 8000 massrate 80 insert_every 10000
overlapcheck yes all_in no vel constant 0.0 0.0 -1.0 &
insertion_face inface
fix insertion all insert/rate/region seed 42 distributiontemplate pdd1
nparticles 10000000 particlerate 12743 insert_every 10000 all_in yes vel constant
0.0 0.0 -1 region factory
#apply nve integration to all particles that are inserted as single particles
#fix integr nve_group nve/sphere
#Restart order
restart 1000 poly.%.1 poly.%.2
#thermo settings
compute 1 all erotate/sphere
thermo_style custom step atoms ke c_1 vol
thermo 1000
thermo_modify lost ignore norm no
compute_modify thermo temp dynamic yes

```

```

#insert the first particles so that dump is not empty
run 1
dump dmp all custom 1000 post/dump*.liggghts id type radius mass x y z ix iy iz
vx vy vz fx fy fz omegax omegay omegaz diameter tqx tqy tqz
dump          dumpstress all mesh/gran/VTK 1000 post/dump*.vtk stress cad
#insert particles
run 5000000 upto
unfix insertion
#run
#run 400000 upto

```

EK 1.4. Titreşim Yönü simülasyonlarının örnek kodu

```

# one Deck vibrating screen Ahad Aghlmandi
#time=25 s
#sim13 (referans+Vi. Yönü 30)
atom_style granular
atom_modify map array
boundary f f f
newton off
communicate multi vel yes
units si
region reg block -0.1 1.05 0 0.260 -0.02 1 units box
create_box 1 reg
#read_restart poly.%.1
neighbor 1.65e-3 bin
neigh_modify delay 0

#Material properties
fix m1 all property/global youngsModulus peratomtype 5.0e7
fix m2 all property/global poissonsRatio peratomtype 0.45
fix m3 all property/global coefficientRestitution peratomtypepair 1 0.3
fix m4 all property/global coefficientFriction peratomtypepair 1 0.5
fix m5 all property/global coefficientRollingFriction peratomtypepair 1 0.01 #
The optional rolling friction model is activated via rolling_friction = 'cdt'

#pair style
pair_style gran/hertz/history rolling_friction cdt tangential_damping on
pair_coeff * *
timestep 0.000005
fix 1 all nve/sphere
fix 2 all gravity 9.81 vector 0.0 0.0 -1.0
#the Screen
fix          cad all mesh/surface/stress file 10.5mm_10der.stl type 1

#motion: Z yönünde sade hareket
fix          drum_move3 all move/mesh mesh cad viblin axis 0.866 0 0.500 order 1
amplitude 0.005 phase 0 period 0.04

#Wall Properties
fix          granwalls all wall/gran/hertz/history mesh n_meshes 1 meshes cad
rolling_friction cdt tangential_damping on
#distributions for insertion
fix          pts1 all particletemplate/sphere 1 atom_type 1 density constant
2700 radius constant 0.01331912
fix          pts2 all particletemplate/sphere 1 atom_type 1 density constant
2700 radius constant 0.010315038
fix          pts3 all particletemplate/sphere 1 atom_type 1 density constant
2700 radius constant 0.007858117
fix          pts4 all particletemplate/sphere 1 atom_type 1 density constant
2700 radius constant 0.006033241
fix          pts5 all particletemplate/sphere 1 atom_type 1 density constant
2700 radius constant 0.004732864
fix          pts6 all particletemplate/sphere 1 atom_type 1 density constant
2700 radius constant 0.00334664
fix          pts7 all particletemplate/sphere 1 atom_type 1 density constant
2700 radius constant 0.002366432

```

```

fix      pts8 all particletemplate/sphere 1 atom_type 1 density constant
2700 radius constant 0.001414214
fix      pdd1 all particledistribution/discrete 1 8 pts1 0.1 pts2 0.1 pts3
0.2 pts4 0.08 pts5 0.14 pts6 0.14 pts7 0.14 pts8 0.1
#region for insertion
region factory block 0.055 0.15 0.015 0.245 0.28 0.555 units box

#particle insertion
#particle insertion
#fix      ins nve_group insert/stream seed 5330 distributiontemplate
pdd1 &
                nparticles 8000 massrate 80 insert_every 10000
overlapcheck yes all_in no vel constant 0.0 0.0 -1.0 &
                insertion_face iface
fix      insertion all insert/rate/region seed 42 distributiontemplate pdd1
nparticles 10000000 particlerate 12743 insert_every 10000 all_in yes vel constant
0.0 0.0 -1 region factory

#apply nve integration to all particles that are inserted as single particles
#fix integr nve_group nve/sphere

#Restart order
restart 1000 poly.%.1 poly.%.2

#thermo settings
compute 1 all erotate/sphere
thermo_style custom step atoms ke c_1 vol
thermo 1000
thermo_modify lost ignore norm no
compute_modify thermo_temp dynamic yes

#insert the first particles so that dump is not empty
run 1
dump dmp all custom 1000 post/dump*.liggghts id type radius mass x y z ix iy iz
vx vy vz fx fy fz omegax omegay omegaz diameter tqx tqy tqz
dump      dumpstress all mesh/gran/VTK 1000 post/dump*.vtk stress cad
#insert particles
run 5000000 upto
unfix insertion
#run
#run 400000 upto

```

EK 1.5. Yüzey boyutları simülasyonlarının örnek kodu

```

#Multisphere

atom_style  sphere
atom_modify map array sort 0 0
boundary    f f f
newton      off

communicate multi vel yes
#communicate multi vel yes

#PUBLIC version only supports serial execution
processors  4 1 3

units      si

region reg block -0.1 0.850 0 0.290 -0.02 1 units box
create_box 1 reg
#read_restart ahad.0

neighbor    0.004 bin
neigh_modify delay 0

#Material properties required for new pair styles

```



```

fix      m1 all property/global youngsModulus peratomtype 1.e7
fix      m2 all property/global poissonsRatio peratomtype 0.45
fix      m3 all property/global coefficientRestitution peratomtypepair 1 0.3
fix      m4 all property/global coefficientFriction peratomtypepair 1 0.5
fix      m5 all property/global characteristicVelocity scalar 2.

#New pair style
pair_style gran model hertz tangential history #Hertzian without cohesion
pair_coeff * *

timestep 0.000005

fix      gravi all gravity 9.81 vector 0.0 0.0 -1.0

fix      cad all mesh/surface/stress file 10mm_5p.stl type 1
fix      drum_move3 all move/mesh mesh cad viblin axis 0 0 1 order 1 amplitude
0.004 phase 0 period 0.04
fix meshwalls all wall/gran model hertz tangential history mesh n_meshes 1 meshes
cad

#distributions for insertion
fix      pts1 all particletemplate/multisphere 15485863 atom_type 1 density
constant 2500 nspheres 12 ntry 1000000 spheres file
data/02_landscape_rocks_forliggghts.data scale 0.008238986669154 type 1
fix      pts2 all particletemplate/multisphere 32452843 atom_type 1 density
constant 2500 nspheres 12 ntry 1000000 spheres file
data/02_landscape_rocks_forliggghts.data scale 0.006409139975164 type 2
fix      pts3 all particletemplate/multisphere 32452867 atom_type 1 density
constant 2500 nspheres 12 ntry 1000000 spheres file
data/02_landscape_rocks_forliggghts.data scale 0.004860905893011 type 3
fix      pts4 all particletemplate/multisphere 49979687 atom_type 1 density
constant 2500 nspheres 12 ntry 1000000 spheres file
data/02_landscape_rocks_forliggghts.data scale 0.003732066933511 type 4
fix      pts5 all particletemplate/multisphere 49979693 atom_type 1 density
constant 2500 nspheres 12 ntry 1000000 spheres file
data/02_landscape_rocks_forliggghts.data scale 0.002927674172309 type 5
fix      pts6 all particletemplate/multisphere 67867967 atom_type 1 density
constant 2500 nspheres 12 ntry 1000000 spheres file
data/02_landscape_rocks_forliggghts.data scale 0.002070178260345 type 6
fix      pts7 all particletemplate/multisphere 67867979 atom_type 1 density
constant 2500 nspheres 12 ntry 1000000 spheres file
data/02_landscape_rocks_forliggghts.data scale 0.001463837086155 type 7
fix      pts8 all particletemplate/multisphere 86028157 atom_type 1 density
constant 2500 nspheres 12 ntry 1000000 spheres file
data/02_landscape_rocks_forliggghts.data scale 0.000874809982388 type 8

fix      pdd1 all particledistribution/discrete 15485867 8 pts1 0.1 pts2 0.1
pts3 0.2 pts4 0.08 pts5 0.14 pts6 0.14 pts7 0.14 pts8 0.1

#region and insertion
#region bc cylinder z 0.0 0.0 0.25 0.1 0.4 units box
region factory block 0.075 0.2 0.014 0.24 0.28 0.555 units box

fix      ins all insert/pack seed 86028121 distributiontemplate pdd1 vel
constant 0. 0. -1. &
insert_every 1000 overlapcheck yes all_in yes region factory
ntry_mc 10000 volumefraction_region 0.0025

#integrator for multisphere rigid bodies
fix      integr all multisphere
#Restart order
write_restart ahad.*

#output settings, include total thermal energy
compute 1 all erotate/sphere
fix      ts all check/timestep/gran 1000 0.1 0.1
thermo_style custom step atoms ke c_1 f_ts[1] f_ts[2] vol
thermo 1000

```

```

thermo_modify lost ignore norm no

#insert the first particles so that dump is not empty
dump          dmp all custom 1000 post/dump*.liggghts id id_multisphere type mass
mol x y z vx vy vz fx fy fz omegax omegay omegaz radius
dump          dumpstress all mesh/gran/VTK 1000 post/dump*.vtk stress cad
#insert particles
run           4000000 upto

```

EK 1.6. Elek açıklığı boyutu simülasyonlarının örnek kodu

```

#Multisphere

atom_style    sphere
atom_modify   map array sort 0 0
boundary      f f f
newton        off

#communicate single vel yes
communicate   multi vel yes

#PUBLIC version only supports serial execution
processors    0 3 4

units         si

region reg block -0.1 1.05 0 0.272 -0.02 1 units box
create_box    1 reg
#read_restart ahad.%

neighbor      0.004 bin
neigh_modify  delay 0

#Material properties required for new pair styles

fix           m1 all property/global youngsModulus peratomtype 1.e7
fix           m2 all property/global poissonsRatio peratomtype 0.45
fix           m3 all property/global coefficientRestitution peratomtypepair 1 0.3
fix           m4 all property/global coefficientFriction peratomtypepair 1 0.5
fix           m5 all property/global characteristicVelocity scalar 2.

#New pair style
pair_style    gran model hertz tangential history #Hertzian without cohesion
pair_coeff     * *

timestep      0.000005

fix           gravi all gravity 9.81 vector 0.0 0.0 -1.0

fix           cad all mesh/surface/stress file 13mm_10der.stl type 1
fix           drum move3 all move/mesh mesh cad viblin axis -0.087488664 0 1 order 1
amplitude 0.004 phase 0 period 0.04
fix meshwalls all wall/gran model hertz tangential history mesh n_meshes 1 meshes
cad

#distributions for insertion
fix           pts1 all particletemplate/multisphere 15485863 atom_type 1 density
constant      2750 nspheres 12 ntry 1000000 spheres file
data/02_landscape_rocks_forliggghts.data scale 0.009370521318994 type 1
fix           pts2 all particletemplate/multisphere 32452843 atom_type 1 density
constant      2750 nspheres 12 ntry 1000000 spheres file
data/02_landscape_rocks_forliggghts.data scale 0.007289365207804 type 2
fix           pts3 all particletemplate/multisphere 32452867 atom_type 1 density
constant      2750 nspheres 12 ntry 1000000 spheres file
data/02_landscape_rocks_forliggghts.data scale 0.005528498118661 type 3
fix           pts4 all particletemplate/multisphere 49979687 atom_type 1 density
constant      2750 nspheres 12 ntry 1000000 spheres file

```

```

data/02_landscape_rocks_forliggghts.data scale 0.00464462548232 type 4
fix pts5 all particletemplate/multisphere 49979693 atom_type 1 density
constant 2750 nspheres 12 ntry 1000000 spheres file
data/02_landscape_rocks_forliggghts.data scale 0.003329758178807 type 5
fix pts6 all particletemplate/multisphere 67867967 atom_type 1 density
constant 2750 nspheres 12 ntry 1000000 spheres file
data/02_landscape_rocks_forliggghts.data scale 0.002354494587945 type 6
fix pts7 all particletemplate/multisphere 67867979 atom_type 1 density
constant 2750 nspheres 12 ntry 1000000 spheres file
data/02_landscape_rocks_forliggghts.data scale 0.001664879089403 type 7
fix pts8 all particletemplate/multisphere 86028157 atom_type 1 density
constant 2750 nspheres 12 ntry 1000000 spheres file
data/02_landscape_rocks_forliggghts.data scale 0.000994955559369 type 8
fix pts9 all particletemplate/multisphere 10007 atom_type 1 density
constant 2750 nspheres 5 ntry 1000000 spheres file data/5kure.data scale
0.020509065528365 type 9
fix pts10 all particletemplate/multisphere 10009 atom_type 1 density
constant 2750 nspheres 5 ntry 1000000 spheres file data/5kure.data scale
0.015954082341609 type 10
fix pts11 all particletemplate/multisphere 10037 atom_type 1 density
constant 2750 nspheres 5 ntry 1000000 spheres file data/5kure.data scale
0.0121001090899 type 11
fix pts12 all particletemplate/multisphere 10039 atom_type 1 density
constant 2750 nspheres 5 ntry 1000000 spheres file data/5kure.data scale
0.009290123697153 type 12
fix pts13 all particletemplate/multisphere 10061 atom_type 1 density
constant 2750 nspheres 5 ntry 1000000 spheres file data/5kure.data scale
0.007287772617765 type 13
fix pts14 all particletemplate/multisphere 10067 atom_type 1 density
constant 2750 nspheres 5 ntry 1000000 spheres file data/5kure.data scale
0.005153233437767 type 14
fix pts15 all particletemplate/multisphere 10069 atom_type 1 density
constant 2750 nspheres 5 ntry 1000000 spheres file data/5kure.data scale
0.003643886308883 type 15
fix pts16 all particletemplate/multisphere 10079 atom_type 1 density
constant 2750 nspheres 5 ntry 1000000 spheres file data/5kure.data scale
0.002177638582769 type 16

fix pdd1 all particledistribution/discrete 15485867 16 pts1
0.020315723205695 pts2 0.097259891591405 pts3 0.105582567517807 pts4
0.04135403839834 pts5 0.0685274565158 pts6 0.076948127793857 pts7
0.063366367995312 pts8 0.026645826981783 pts9 0.020315723205695 pts10
0.097259891591405 pts11 0.105582567517807 pts12 0.04135403839834 pts13
0.0685274565158 pts14 0.076948127793857 pts15 0.063366367995312 pts16
0.026645826981783

#region and insertion
#region bc cylinder z 0.0 0.0 0.25 0.1 0.4 units box
region factory block 0.045 0.21 0.021 0.24 0.28 0.555 units box

fix ins all insert/pack seed 86028121 distributiontemplate pdd1 vel
constant 0. 0. -1. &
insert_every 1000 overlapcheck yes all_in yes region factory
ntry_mc 1000 volumefraction_region 0.00444320314406

#integrator for multisphere rigid bodies
fix integr all multisphere
#Restart order
write_restart ahad.%

#output settings, include total thermal energy
compute 1 all erotate/sphere
fix ts all check/timestep/gran 1000 0.1 0.1
thermo_style custom step atoms ke c_1 f_ts[1] f_ts[2] vol
thermo 1000
thermo_modifylost ignore norm no

```

```

#insert the first particles so that dump is not empty
dump      dmp all custom 1000 post/dump*.ligggghts id id_multisphere type mass
mol x y z vx vy vz fx fy fz omegax omegay omegaz radius
dump      dumpstress all mesh/gran/VTK 1000 post/dump*.vtk stress cad
#insert particles
run       4000000 upto

```

EK 1.7. Elek açıklığı şekli simülasyonlarının örnek kodu

```

#Multisphere

atom_style  sphere
atom_modify map array sort 0 0
boundary    f f f
newton      off

#communicate single vel yes
communicate multi vel yes

#PUBLIC version only supports serial execution
processors  4 1 3

units       si

region reg block -0.1 1.3 -0.05 0.6 -0.02 0.58 units box
create_box  1 reg
#read_restart ahad.%

neighbor     0.004 bin
neigh_modify delay 0

#Material properties required for new pair styles

fix          m1 all property/global youngsModulus peratomtype 1.e7
fix          m2 all property/global poissonsRatio peratomtype 0.45
fix          m3 all property/global coefficientRestitution peratomtypepair 1 0.3
fix          m4 all property/global coefficientFriction peratomtypepair 1 0.5
fix          m5 all property/global characteristicVelocity scalar 2.

#New pair style
pair_style   gran model hertz tangential history #Hertzian without cohesion
pair_coeff   * *

timestep     0.000005

fix          gravi all gravity 9.81 vector 0.0 0.0 -1.0

fix          cad all mesh/surface/stress file ar4_h_complete.stl type 1
fix          drum_move3 all move/mesh mesh cad viblin axis -0.087488664 0 1 order 1
amplitude    0.003 phase 0 period 0.04
fix meshwalls all wall/gran model hertz tangential history mesh n_meshes 1 meshes
cad

#distributions for insertion
fix          pts1 all particletemplate/multisphere 10007 atom_type 1 density
constant     5500 nspheres 12 ntry 1000000 spheres file
data/02_landscape_rocks_forligggghts.data scale 0.009370521318994 type 1
fix          pts2 all particletemplate/multisphere 10009 atom_type 1 density
constant     5500 nspheres 12 ntry 1000000 spheres file
data/02_landscape_rocks_forligggghts.data scale 0.007289365207804 type 2
fix          pts3 all particletemplate/multisphere 10037 atom_type 1 density
constant     5500 nspheres 12 ntry 1000000 spheres file
data/02_landscape_rocks_forligggghts.data scale 0.005528498118661 type 3
fix          pts4 all particletemplate/multisphere 10039 atom_type 1 density
constant     5500 nspheres 12 ntry 1000000 spheres file
data/02_landscape_rocks_forligggghts.data scale 0.004109565040622 type 4
fix          pts5 all particletemplate/multisphere 10061 atom_type 1 density

```

```

constant      5500      nspheres      12      ntry      1000000      spheres      file
data/02_landscape_rocks_forliggghts.data scale 0.00341936480165 type 5
fix          pts6      all      particletemplate/multisphere 10067      atom_type 1      density
constant      5500      nspheres      12      ntry      1000000      spheres      file
data/02_landscape_rocks_forliggghts.data scale 0.002984666291853 type 6
fix          pts7      all      particletemplate/multisphere 10069      atom_type 1      density
constant      5500      nspheres      12      ntry      1000000      spheres      file
data/02_landscape_rocks_forliggghts.data scale 0.002632228251587 type 7
fix          pts8      all      particletemplate/multisphere 10091      atom_type 1      density
constant      5500      nspheres      12      ntry      1000000      spheres      file
data/02_landscape_rocks_forliggghts.data scale 0.002279576534433 type 8
fix          pts9      all      particletemplate/multisphere 10093      atom_type 1      density
constant      5500      nspheres      12      ntry      1000000      spheres      file
data/02_landscape_rocks_forliggghts.data scale 0.001723197887043 type 9

fix          pdd1      all      particledistribution/discrete 15485867 9 pts1 0.15 pts2
0.15 pts3 0.1 pts4 0.1 pts5 0.1 pts6 0.1 pts7 0.1 pts8 0.1 pts9 0.1

#region and insertion
#region          bc cylinder z 0.0 0.0 0.25 0.1 0.4 units box
region factory block 0.035 0.135 0.035 0.435 0.275 0.525 units box

fix          ins      all      insert/pack seed 10259      distributiontemplate pdd1 vel
constant 0. 0. -1. &
          insert_every 1000 overlapcheck yes all_in yes region factory
ntry_mc 10000 volumefraction_region 0.01

#integrator for multisphere rigid bodies
fix          integr all multisphere
#Restart order
write_restart ahad.%

#output settings, include total thermal energy
compute      1 all erotate/sphere
fix          ts      all      check/timestep/gran 1000 0.1 0.1
thermo_style custom step atoms ke c_1 f_ts[1] f_ts[2] vol
thermo      1000
thermo_modify lost ignore norm no

#insert the first particles so that dump is not empty
dump          dmp      all      custom 1000 post/dump*.liggghts id id_multisphere type mass
mol x y z vx vy vz fx fy fz omegax omegay omegaz radius
dump          dumpstress all mesh/gran/VTK 1000 post/dump*.vtk stress cad
#insert particles
run          4000000 upto

```

EK 1.8. Elek yüzeyi açıklık oranı simülasyonlarının örnek kodu

```

#Multisphere

atom_style      sphere
atom_modify     map array sort 0 0
boundary        f f f
newton          off

#communicate single vel yes
communicate multi vel yes

#PUBLIC version only supports serial execution
processors      4 1 3

units          si

region reg block -0.1 0.85 -0.01 0.35 -0.05 0.6 units box
create_box      1 reg
#read_restart ahad.%

```

```

neighbor      0.004 bin
neigh_modify delay 0

#Material properties required for new pair styles

fix          m1 all property/global youngsModulus peratomtype 1.e7
fix          m2 all property/global poissonsRatio peratomtype 0.45
fix          m3 all property/global coefficientRestitution peratomtypepair 1 0.3
fix          m4 all property/global coefficientFriction peratomtypepair 1 0.5
fix          m5 all property/global characteristicVelocity scalar 2.

#New pair style
pair_style gran model hertz tangential history #Hertzian without cohesion
pair_coeff   * *

timestep     0.000005

fix          gravi all gravity 9.81 vector 0.0 0.0 -1.0

fix          cad all mesh/surface/stress file 10_20.stl type 1
fix          drum_move3 all move/mesh mesh cad viblin axis -0.087488664 0 1 order 1
amplitude 0.004 phase 0 period 0.04
fix meshwalls all wall/gran model hertz tangential history mesh n_meshes 1 meshes
cad

#distributions for insertion
fix          pts1 all particletemplate/multisphere 10007 atom_type 1 density
constant    5500 nspheres 12 ntry 1000000 spheres file
data/02_landscape_rocks_forligggghts.data scale 0.009370521318994 type 1
fix          pts2 all particletemplate/multisphere 10009 atom_type 1 density
constant    5500 nspheres 12 ntry 1000000 spheres file
data/02_landscape_rocks_forligggghts.data scale 0.007289365207804 type 2
fix          pts3 all particletemplate/multisphere 10037 atom_type 1 density
constant    5500 nspheres 12 ntry 1000000 spheres file
data/02_landscape_rocks_forligggghts.data scale 0.005528498118661 type 3
fix          pts4 all particletemplate/multisphere 10039 atom_type 1 density
constant    5500 nspheres 12 ntry 1000000 spheres file
data/02_landscape_rocks_forligggghts.data scale 0.004109565040622 type 4
fix          pts5 all particletemplate/multisphere 10061 atom_type 1 density
constant    5500 nspheres 12 ntry 1000000 spheres file
data/02_landscape_rocks_forligggghts.data scale 0.00341936480165 type 5
fix          pts6 all particletemplate/multisphere 10067 atom_type 1 density
constant    5500 nspheres 12 ntry 1000000 spheres file
data/02_landscape_rocks_forligggghts.data scale 0.002984666291853 type 6
fix          pts7 all particletemplate/multisphere 10069 atom_type 1 density
constant    5500 nspheres 12 ntry 1000000 spheres file
data/02_landscape_rocks_forligggghts.data scale 0.002632228251587 type 7
fix          pts8 all particletemplate/multisphere 10091 atom_type 1 density
constant    5500 nspheres 12 ntry 1000000 spheres file
data/02_landscape_rocks_forligggghts.data scale 0.002279576534433 type 8
fix          pts9 all particletemplate/multisphere 10093 atom_type 1 density
constant    5500 nspheres 12 ntry 1000000 spheres file
data/02_landscape_rocks_forligggghts.data scale 0.001723197887043 type 9

fix          pdd1 all particledistribution/discrete 15485867 9 pts1 0.15 pts2
0.1 pts3 0.15 pts4 0.1 pts5 0.1 pts6 0.1 pts7 0.1 pts8 0.1 pts9 0.1

#region and insertion
#region      bc cylinder z 0.0 0.0 0.25 0.1 0.4 units box
region factory block 0.03 0.18 0.0275 0.312 0.213 0.5 units box

fix          ins all insert/pack seed 10259 distributiontemplate pdd1 vel
constant 0. 0. -1. &
            insert_every 1000 overlapcheck yes all_in yes region factory
ntry_mc 10000 volumefraction_region 0.01

#integrator for multisphere rigid bodies
fix          integr all multisphere

```

```

#Restart order
write_restart ahad.%

#output settings, include total thermal energy
compute          1 all erotate/sphere
fix              ts all check/timestep/gran 1000 0.1 0.1
thermo_style     custom step atoms ke c_1 f_ts[1] f_ts[2] vol
thermo           1000
thermo_modify    lost ignore norm no

#insert the first particles so that dump is not empty
dump             dmp all custom 1000 post/dump*.liggghts id id_multisphere type mass
mol x y z vx vy vz fx fy fz omegax omegay omegaz radius
dump             dumpstress all mesh/gran/VTK 1000 post/dump*.vtk stress cad
#insert particles
run              4000000 upto

```

EK 1.9. Elek yüzeyi açıklık oranı simülasyonlarının örnek kodu

```

#Multisphere

atom_style       sphere
atom_modify      map array sort 0 0
boundary         f f f
newton           off

#communicate single vel yes
communicate multi vel yes

#PUBLIC version only supports serial execution
processors       0 3 4

units            si

region reg block -0.1 1.05 0 0.260 -0.02 1 units box
#create_box      1 reg
read_restart     ahad.base%

neighbor         0.004 bin
neigh_modify     delay 0

#Material properties required for new pair styles

fix              m1 all property/global youngsModulus peratomtype 1.e7
fix              m2 all property/global poissonsRatio peratomtype 0.45
fix              m3 all property/global coefficientRestitution peratomtypepair 1 0.3
fix              m4 all property/global coefficientFriction peratomtypepair 1 0.5
fix              m5 all property/global characteristicVelocity scalar 2.

#New pair style
pair_style       gran model hertz tangential history #Hertzian without cohesion
pair_coeff       * *

timestep         0.000005

fix              gravi all gravity 9.81 vector 0.0 0.0 -1.0

fix              cad all mesh/surface/stress file 10.5mm_10der.stl type 1
fix              drum_move3 all move/mesh mesh cad viblin axis -0.087488664 0 1 order 1
amplitude        0.005 phase 0 period 0.04
fix meshwalls all wall/gran model hertz tangential history mesh n_meshes 1 meshes cad

#distributions for insertion
fix              pts1 all particletemplate/multisphere 15485863 atom_type 1 density
constant         2750 nspheres 12 ntry 1000000 spheres file
data/02_landscape rocks forliggghts.data scale 0.009370521318994 type 1

```

```

fix          pts2 all particletemplate/multisphere 32452843 atom_type 1 density
constant    2750 nspheres      12      ntry      1000000      spheres      file
data/02_landscape_rocks_forligggghts.data scale 0.007289365207804 type 2
fix          pts3 all particletemplate/multisphere 32452867 atom_type 1 density
constant    2750 nspheres      12      ntry      1000000      spheres      file
data/02_landscape_rocks_forligggghts.data scale 0.005528498118661 type 3
fix          pts4 all particletemplate/multisphere 49979687 atom_type 1 density
constant    2750 nspheres      12      ntry      1000000      spheres      file
data/02_landscape_rocks_forligggghts.data scale 0.00464462548232 type 4
fix          pts5 all particletemplate/multisphere 49979693 atom_type 1 density
constant    2750 nspheres      12      ntry      1000000      spheres      file
data/02_landscape_rocks_forligggghts.data scale 0.003329758178807 type 5
fix          pts6 all particletemplate/multisphere 67867967 atom_type 1 density
constant    2750 nspheres      12      ntry      1000000      spheres      file
data/02_landscape_rocks_forligggghts.data scale 0.002354494587945 type 6
fix          pts7 all particletemplate/multisphere 67867979 atom_type 1 density
constant    2750 nspheres      12      ntry      1000000      spheres      file
data/02_landscape_rocks_forligggghts.data scale 0.001664879089403 type 7
fix          pts8 all particletemplate/multisphere 86028157 atom_type 1 density
constant    2750 nspheres      12      ntry      1000000      spheres      file
data/02_landscape_rocks_forligggghts.data scale 0.000994955559369 type 8
fix          pts9 all particletemplate/multisphere 10007 atom_type 1 density
constant    2750 nspheres      5      ntry      1000000      spheres      file data/5kure.data scale
0.020509065528365 type 9
fix          pts10 all particletemplate/multisphere 10009 atom_type 1 density
constant    2750 nspheres      5      ntry      1000000      spheres      file data/5kure.data scale
0.015954082341609 type 10
fix          pts11 all particletemplate/multisphere 10037 atom_type 1 density
constant    2750 nspheres      5      ntry      1000000      spheres      file data/5kure.data scale
0.0121001090899 type 11
fix          pts12 all particletemplate/multisphere 10039 atom_type 1 density
constant    2750 nspheres      5      ntry      1000000      spheres      file data/5kure.data scale
0.009290123697153 type 12
fix          pts13 all particletemplate/multisphere 10061 atom_type 1 density
constant    2750 nspheres      5      ntry      1000000      spheres      file data/5kure.data scale
0.007287772617765 type 13
fix          pts14 all particletemplate/multisphere 10067 atom_type 1 density
constant    2750 nspheres      5      ntry      1000000      spheres      file data/5kure.data scale
0.005153233437767 type 14
fix          pts15 all particletemplate/multisphere 10069 atom_type 1 density
constant    2750 nspheres      5      ntry      1000000      spheres      file data/5kure.data scale
0.003643886308883 type 15
fix          pts16 all particletemplate/multisphere 10079 atom_type 1 density
constant    2750 nspheres      5      ntry      1000000      spheres      file data/5kure.data scale
0.002177638582769 type 16

fix          pdd1 all particledistribution/discrete 15485867 16 pts1
0.007483213332255 pts2 0.061321899522692 pts3 0.089798559987056 pts4
0.047245368497694 pts5 0.094369387590001 pts6 0.074468085106383 pts7
0.080697354582963 pts8 0.044616131380956 pts9 0.007483213332255 pts10
0.061321899522692 pts11 0.089798559987056 pts12 0.047245368497694 pts13
0.094369387590001 pts14 0.074468085106383 pts15 0.080697354582963 pts16
0.044616131380956
#region and insertion
#region bc cylinder z 0.0 0.0 0.25 0.1 0.4 units box
region factory block 0.075 0.25 0.014 0.24 0.28 0.555 units box

fix          ins all insert/pack seed 86028121 distributiontemplate pdd1 vel
constant 0. 0. -1. &
insert_every 1000 overlapcheck yes all_in yes region factory
ntry_mc 10000 volumefraction_region 0.007477561

#integrator for multisphere rigid bodies
fix          integr all multisphere
#Restart order
write_restart ahad.%

#output settings, include total thermal energy

```



```

compute          1 all erotate/sphere
fix              ts all check/timestep/gran 1000 0.1 0.1
thermo_style    custom step atoms ke c_1 f_ts[1] f_ts[2] vol
thermo          1000
thermo_modify   lost ignore norm no

#insert the first particles so that dump is not empty
dump            dmp all custom 1000 post/dump*.liggghts id id_multisphere type mass
mol x y z vx vy vz fx fy fz omegax omegay omegaz radius
dump            dumpstress all mesh/gran/VTK 1000 post/dump*.vtk stress cad
#insert particles
run             4000000 upto

```

EK 1.10. Besleme tane boyu dağılımı simülasyonlarının örnek kodu

```

# one Deck vibrating screen Ahad Aghlmandi
#time=20 s
#sim19 (referans 2.taneboyudağılımı)
atom_style granular
atom_modify map array
boundary f f f
newton off
communicate multi vel yes
units si
region reg block -0.1 1.05 0 0.260 -0.02 1 units box
create_box 1 reg
#read_restart poly.%.1
neighbor 1.65e-3 bin
neigh_modify delay 0

#Material properties
fix m1 all property/global youngsModulus peratomtype 5.0e7
fix m2 all property/global poissonsRatio peratomtype 0.45
fix m3 all property/global coefficientRestitution peratomtypepair 1 0.3
fix m4 all property/global coefficientFriction peratomtypepair 1 0.5
fix m5 all property/global coefficientRollingFriction peratomtypepair 1 0.01 #
The optional rolling friction model is activated via rolling_friction = 'cdt'

#pair style
pair_style      gran/hertz/history rolling_friction cdt tangential_damping on
pair_coeff * *
timestep 0.000005
fix 1 all nve/sphere
fix 2 all gravity 9.81 vector 0.0 0.0 -1.0
#the Screen
fix            cad all mesh/surface/stress file 10.5mm_10der.stl type 1

#motion: Z yönünde sade hareket
fix            drum_move3 all move/mesh mesh cad viblin axis 0 0 1 order 1 amplitude
0.005 phase 0 period 0.04

#Wall Properties
fix            granwalls all wall/gran/hertz/history mesh n_meshes 1 meshes cad
rolling_friction cdt tangential_damping on
#distributions for insertion
fix            pts1 all particletemplate/sphere 1 atom_type 1 density constant
2700 radius constant 0.01331912
fix            pts2 all particletemplate/sphere 1 atom_type 1 density constant
2700 radius constant 0.010315038
fix            pts3 all particletemplate/sphere 1 atom_type 1 density constant
2700 radius constant 0.007858117
fix            pts4 all particletemplate/sphere 1 atom_type 1 density constant
2700 radius constant 0.006033241
fix            pts5 all particletemplate/sphere 1 atom_type 1 density constant
2700 radius constant 0.004732864
fix            pts6 all particletemplate/sphere 1 atom_type 1 density constant
2700 radius constant 0.00334664

```

```

fix      pts7 all particletemplate/sphere 1 atom_type 1 density constant
2700 radius constant 0.002366432
fix      pts8 all particletemplate/sphere 1 atom_type 1 density constant
2700 radius constant 0.001414214
fix      pdd1 all particledistribution/discrete 1 8 pts1 0.1 pts2 0.1 pts3
0.1 pts4 0.2 pts5 0.2 pts6 0.1 pts7 0.1 pts8 0.1
#region for insertion
region factory block 0.06 0.17 0.015 0.245 0.28 0.555 units box

#particle insertion
#particle insertion
#fix      ins nve_group insert/stream seed 5330 distributiontemplate
pdd1 &
          nparticles 8000 massrate 80 insert_every 10000
overlapcheck yes all_in no vel constant 0.0 0.0 -1.0 &
          insertion_face iface
fix      insertion all insert/rate/region seed 42 distributiontemplate pdd1
nparticles 10000000 particlerate 11962 insert_every 10000 all_in yes vel constant
0.0 0.0 -1 region factory

#apply nve integration to all particles that are inserted as single particles
#fix integr nve_group nve/sphere

#Restart order
restart 1000 poly.%.1 poly.%.2

#thermo settings
compute 1 all erotate/sphere
thermo_style custom step atoms ke c_1 vol
thermo 1000
thermo_modify lost ignore norm no
compute_modify thermo_temp dynamic yes

#insert the first particles so that dump is not empty
run 1
dump dmp all custom 1000 post/dump*.liggghts id type radius mass x y z ix iy iz
vx vy vz fx fy fz omegax omegay omegaz diameter tqx tqy tqz
dump      dumpstress all mesh/gran/VTK 1000 post/dump*.vtk stress cad
#insert particles
run 4000000 upto
unfix insertion
#run
#run 400000 upto

```

EK 1.11. Tane şekli simülasyonlarının örnek kodu

```

#Multisphere

atom_style sphere
atom_modify map array sort 0 0
boundary f f f
newton off

#communicate single vel yes
communicate multi vel yes

#PUBLIC version only supports serial execution
processors 4 1 3

units si

region reg block -0.1 0.68 -0.01 0.21 -0.05 0.6 units box
create_box 1 reg
#read_restart ahad.%

neighbor 0.004 bin
neigh_modify delay 0

```

```

#Material properties required for new pair styles
fix          m1 all property/global youngsModulus peratomtype 1.e7
fix          m2 all property/global poissonsRatio peratomtype 0.45
fix          m3 all property/global coefficientRestitution peratomtypepair 1 0.3
fix          m4 all property/global coefficientFriction peratomtypepair 1 0.5
fix          m5 all property/global characteristicVelocity scalar 2.

#New pair style
pair_style gran model hertz tangential history #Hertzian without cohesion
pair_coeff   * *

timestep    0.000005

fix         gravi all gravity 9.81 vector 0.0 0.0 -1.0

fix         cad all mesh/surface/stress file 10mm.315_165.stl type 1
fix         drum_move3 all move/mesh mesh cad viblin axis 0 0 1 order 1 amplitude
0.004 phase 0 period 0.04
fix meshwalls all wall/gran model hertz tangential history mesh n_meshes 1 meshes
cad

#distributions for insertion
fix         pts1 all particletemplate/multisphere 10007 atom_type 1 density
constant 5500 nspheres 3 ntry 1000000 spheres file data/three_sphere_3mm.data
scale 1 type 1

fix         pdd1 all particledistribution/discrete 15485867 1 pts1 1

#region and insertion
#region          bc cylinder z 0.0 0.0 0.25 0.1 0.4 units box
region factory block 0.03 0.18 0.0275 0.180 0.213 0.5 units box

fix         ins all insert/pack seed 10259 distributiontemplate pdd1 vel
constant 0. 0. -1. &
            insert_every 1000 overlapcheck yes all_in yes region factory
ntry_mc 10000 volumefraction_region 0.01

#integrator for multisphere rigid bodies
fix         integr all multisphere
#Restart order
write_restart ahad.%

#output settings, include total thermal energy
compute     1 all erotate/sphere
fix         ts all check/timestep/gran 1000 0.1 0.1
thermo_style custom step atoms ke c_1 f_ts[1] f_ts[2] vol
thermo      1000
thermo_modifylost ignore norm no

#insert the first particles so that dump is not empty
dump        dmp all custom 1000 post/dump*.liggghts id id_multisphere type mass
mol x y z vx vy vz fx fy fz omegax omegay omegaz radius
dump        dumpstress all mesh/gran/VTK 1000 post/dump*.vtk stress cad
#insert particles
run         4000000 upto

```

EK 1.11. Tane yoğunluğu simülasyonlarının örnek kodu

```

#Multisphere

atom_style sphere

```

```

atom_modify map array sort 0 0
boundary      f f f
newton                off

#communicate      single vel yes
communicate multi vel yes

#PUBLIC version only supports serial execution
processors 0 3 4

units          si

region reg block -0.1 1.05 0 0.260 -0.02 1 units box
create_box 1 reg
#read_restart ahad.%

neighbor      0.004 bin
neigh_modify      delay 0

#Material properties required for new pair styles

fix          m1 all property/global youngsModulus peratomtype 1.e7
fix          m2 all property/global poissonsRatio peratomtype 0.45
fix          m3 all property/global coefficientRestitution
peratomtypepair 1 0.3
fix          m4 all property/global coefficientFriction peratomtypepair 1
0.5
fix          m5 all property/global characteristicVelocity scalar 2.

#New pair style
pair_style gran model hertz tangential history #Hertzian without cohesion
pair_coeff * *

timestep      0.000005

fix          gravi all gravity 9.81 vector 0.0 0.0 -1.0

fix          cad all mesh/surface/stress file 10.5mm_10der.stl type 1
fix          drum_move3 all move/mesh mesh cad viblin axis -0.087488664 0 1
order 1 amplitude 0.005 phase 0 period 0.04
fix meshwalls all wall/gran model hertz tangential history mesh n_meshes
1 meshes cad

#distributions for insertion
fix          pts1 all particletemplate/multisphere 15485863 atom_type 1
density constant 4500 nspheres 12 ntry 1000000 spheres file
data/02_landscape_rocks_forligggghts.data scale 0.009370521318994 type 1
fix          pts2 all particletemplate/multisphere 32452843 atom_type 1
density constant 4500 nspheres 12 ntry 1000000 spheres file
data/02_landscape_rocks_forligggghts.data scale 0.007289365207804 type 2
fix          pts3 all particletemplate/multisphere 32452867 atom_type 1
density constant 4500 nspheres 12 ntry 1000000 spheres file
data/02_landscape_rocks_forligggghts.data scale 0.005528498118661 type 3
fix          pts4 all particletemplate/multisphere 49979687 atom_type 1
density constant 4500 nspheres 12 ntry 1000000 spheres file
data/02_landscape_rocks_forligggghts.data scale 0.00464462548232 type 4
fix          pts5 all particletemplate/multisphere 49979693 atom_type 1
density constant 4500 nspheres 12 ntry 1000000 spheres file
data/02_landscape_rocks_forligggghts.data scale 0.003329758178807 type 5
fix          pts6 all particletemplate/multisphere 67867967 atom_type 1
density constant 4500 nspheres 12 ntry 1000000 spheres file

```

```

data/02_landscape_rocks_forliggghts.data scale 0.002354494587945 type 6
fix      pts7 all particletemplate/multisphere 67867979 atom_type 1
density  constant 4500 nspheres 12 ntry 1000000 spheres file
data/02_landscape_rocks_forliggghts.data scale 0.001664879089403 type 7
fix      pts8 all particletemplate/multisphere 86028157 atom_type 1
density  constant 4500 nspheres 12 ntry 1000000 spheres file
data/02_landscape_rocks_forliggghts.data scale 0.000994955559369 type 8
fix      pts9 all particletemplate/multisphere 10007 atom_type 1
density  constant 4500 nspheres 5 ntry 1000000 spheres file
data/5kure.data scale 0.020509065528365 type 9
fix      pts10 all particletemplate/multisphere 10009 atom_type 1
density  constant 4500 nspheres 5 ntry 1000000 spheres file
data/5kure.data scale 0.015954082341609 type 10
fix      pts11 all particletemplate/multisphere 10037 atom_type 1
density  constant 4500 nspheres 5 ntry 1000000 spheres file
data/5kure.data scale 0.0121001090899 type 11
fix      pts12 all particletemplate/multisphere 10039 atom_type 1
density  constant 4500 nspheres 5 ntry 1000000 spheres file
data/5kure.data scale 0.009290123697153 type 12
fix      pts13 all particletemplate/multisphere 10061 atom_type 1
density  constant 4500 nspheres 5 ntry 1000000 spheres file
data/5kure.data scale 0.007287772617765 type 13
fix      pts14 all particletemplate/multisphere 10067 atom_type 1
density  constant 4500 nspheres 5 ntry 1000000 spheres file
data/5kure.data scale 0.005153233437767 type 14
fix      pts15 all particletemplate/multisphere 10069 atom_type 1
density  constant 4500 nspheres 5 ntry 1000000 spheres file
data/5kure.data scale 0.003643886308883 type 15
fix      pts16 all particletemplate/multisphere 10079 atom_type 1
density  constant 4500 nspheres 5 ntry 1000000 spheres file
data/5kure.data scale 0.002177638582769 type 16

fix      pdd1 all particledistribution/discrete 15485867 16 pts1
0.023201485368554 pts2 0.077699507091643 pts3 0.077699507091643 pts4
0.053162820641651 pts5 0.058549811248171 pts6 0.066408905242875 pts7
0.082197227754495 pts8 0.038416576218436 pts9 0.023201485368554 pts10
0.077699507091643 pts11 0.077699507091643 pts12 0.053162820641651 pts13
0.058549811248171 pts14 0.066408905242875 pts15 0.082197227754495 pts16
0.038416576218436
#region and insertion
#region      bc cylinder z 0.0 0.0 0.25 0.1 0.4 units box
region      factory block 0.075 0.25 0.014 0.24 0.28 0.555 units box

fix      ins all insert/pack seed 86028121 distributiontemplate pdd1
vel constant 0. 0. -1. &
insert_every 1000 overlapcheck yes all_in yes region factory
ntry_mc 10000 volumefraction_region 0.004436432

#integrator for multisphere rigid bodies
fix      integr all multisphere
#Restart order
write_restart ahad.%

#output settings, include total thermal energy
compute      1 all erotate/sphere
fix      ts all check/timestep/gran 1000 0.1 0.1
thermo_style      custom step atoms ke c_1 f_ts[1] f_ts[2] vol
thermo      1000
thermo_modify      lost ignore norm no

```

```
#insert the first particles so that dump is not empty
dump      dmp all custom 1000 post/dump*.liggghts id id_multisphere
type mass mol x y z vx vy vz fx fy fz omegax omegay omegaz radius
dump      dumpstress all mesh/gran/VTK 1000 post/dump*.vtk stress cad
#insert particles
run       4000000 upto
```

EK 2 Tezden Türetilmiş Yayınlar

ORHAN E. C., AGHLMANDI H. A., ERGÜN L. (2019). Numerical Modelling of Industrial Screening (Part 1): Development and Validation of Dem Model, Scientific Mining Journal, 2019, 58(1), 7-15

ORHAN E. C., AGHLMANDI H. A., ERGÜN L. (2019). Numerical Modelling of Industrial Screening (Part II): Effects of Design and Operational Variables On Screening Performance, Scientific Mining Journal, 2019, 58(1), 31-44

AGHLMANDI H. A., ORHAN E. C., ERGÜN L. (2018). Discrete Element Modeling of Vibrating Screens. Minerals Engineering, 121, 107-121.

EK 3 Tezden Türetilmiş Bildiriler

AGHLMANDI H. A., ORHAN E. C., ERGÜN L. (2017). Numerical Study of Parameters Affecting Industrial Screening Performance. international mining congress and exhibition of Turkey, Antalya, Turkey (Oral presentation and proceedings)

EK 4 Tezden Üretilmiş Projeler ve Bütçesi

TÜBİTAK Projesi (No:216M368): Endüstriyel Eleklerin Sayısal Modellemesi (Bütçe:60000 TL)