DOKUZ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MOBİL ELEME ÜNİTESİNDE KAPASİTE HESABI VE OPTİMUM ELEK TASARIMI

Mehmet Umut KAYA

Şubat, 2025

İZMİR

MOBİL ELEME ÜNİTESİNDE KAPASİTE HESABI VE OPTİMUM ELEK TASARIMI

Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Yüksek Lisans Tezi

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Mekanik Yüksek Lisans Programı

Mehmet Umut KAYA

Şubat, 2025

İZMİR

YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU

MEHMET UMUT KAYA tarafından **PROF.DR. RAMAZAN KARAKUZU** yönetiminde hazırlanan **"MOBİL ELEME ÜNİTESİNDE KAPASİTE HESABI VE OPTİMUM ELEK TASARIMI"** başlıklı tez tarafımızdan okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Prof.Dr. Ramazan KARAKUZU

Danışman

Prof. Dr. Yusuf ARMAN

Jüri Üyesi

Prof. Dr. Buket OKUTAN BABA

Jüri Üyesi

Prof. Dr. Abdullah SEÇGİN

Müdür

Fen Bilimleri Enstitüsü

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim ve tez çalışmam boyunca yol gösterici olan ve desteğini esirgemeyen değerli hocam Prof. Dr. Ramazan Karakuzu' ya teşekkürü borç bilirim.

Kariyerimin bu ilk yıllarında tanıştığım ve kendilerinden çok şey öğrendiğim, bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım mesai arkadaşlarıma ve yöneticilerime teşekkür ederim.

Ayrıca beni her zaman destekleyen, bugünlere gelmemde çok büyük emekleri ve fedakarlıkları olan anne babama ve gelecekte meslektaşım olacak kardeşime sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Mehmet Umut KAYA

MOBİL ELEME ÜNİTESİNDE KAPASİTE HESABI VE OPTİMUM ELEK TASARIMI

ÖZ

Farklı boyutlardaki parçacıkları ayıklamak için tarihte kullanılan en eski alet olan elekler, günümüzde endüstriyel makinaların içinde modern çözümler sunarak insan gücüyle çalışmanın ötesine geçmişlerdir. Farklı amaçlar için kullanılan, birbirinden farklı geometrilere ve hareket biçimlerine sahip olan eleklerin verimlerini artırmak, proseslerin iyileştirilmesinde önemli rol oynamaktadır.

Bu çalışmada, atık yönetiminde önemli rol oynayan Mobil Eleme Ünitesi'ne ait Tambur Elek üzerinde verim ve kapasite ölçümü, Ayrık Elemanlar Yöntemi analizi ile yapılmıştır. Piyasada sıklıkla kullanılan dış ölçülere ve toplam delik alanına bağlı kalınarak farklı delik tasarımlarında eleklerin eleme verimleri ve kapasiteleri analiz edilmiştir. Çıkan sonuçlar incelenerek her elek tasarımı için bir iyileştirme yapılmış, iyileştirilen elekler tekrar analiz edilmiştir.

Elekler analiz edilirken besleme koşullarındaki değişiklikler incelenmiştir. Bu değişiklikler besleme hacmi ve besleme yığınındaki parçacıkların kütlesel dağılımlarıdır. Bu incelemeyle farklı parçacık dağılımına sahip yığınların elenmesi için uygulamada değişikliklerin gerekliliği tecrübe edilmiştir. Aynı zamanda yapılan iyileştirmelerin ve besleme miktarlarının elekteki aşınma etkileri incelenmiş, aşınma, kapasite ve verim etkisindeki optimum elek ve optimum besleme koşullarına ulaşılmıştır.

Anahtar kelimeler: Eleme, Ayrık Elemanlar Yöntemi, atık yönetimi, çevre, geri dönüşüm

CAPACITY CALCULATION AND OPTIMUM SCREEN DESIGN IN THE MOBILE SCREENING UNIT

ABSTRACT

Sieves, the oldest tool used in history to separate particles of different sizes, have gone beyond working with human power by offering modern solutions in industrial machines today. Increasing the efficiency of sieves, which are used for different purposes and have different geometries and movement patterns, plays an important role in improving processes.

In this study, efficiency and capacity measurements on the Drum Screen of the Mobile Screening Unit, which plays an important role in waste management, were made with Discrete Element Method analysis. The screening efficiencies and capacities of the sieves in different hole designs were analyzed by adhering to the external dimensions and total hole area frequently used in the market. By examining the results, an improvement was made for each sieve design, and the improved sieves were analyzed again.

Changes in the feeding conditions were examined while analyzing the sieves. These changes are the feeding volume and the mass distribution of the particles in the feed pile. With this examination, the necessity of changes in the application for the screening of piles with different particle distributions was experienced. At the same time, the effects of improvements and feeding amounts on the wear of the screen were examined, and the optimum screen and optimum feeding conditions in terms of wear, capacity and efficiency were achieved.

Keywords: Screening, Discrete Elements Method, waste management, environment, recycling

İÇİNDEKİLER

Sayfa

YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU iii
TEŞEKKÜR iv
ÖZ v
ABSTRACT vi
İÇİNDEKİLER vii
ŞEKİLLER LİSTESİ x

BÖLÜM BİR - GİRİŞ 1

1.1 Amaç 1
1.2 Endüstriyel Elek Tipleri 2
1.2.1 Doğrusal Titreşimli Elekler 2
1.2.2 Döner (Trommel) Elekler 3
1.2.3 Statik (Sabit) Elekler 4
1.2.4 Flip-Flow (Çift Titreşimli) Elekler 5
1.2.5 Tumbler (Dairesel Titreşimli) Elekler 5
1.3 Mobil Eleme Ünitesi 6
1.3.1 Tambur Elek 7
1.3.2 Yürüyüş Grubu 9
1.3.3 Konveyör Bantlar 10
1.4 Tambur Elek Tasarımı 11

BÖLÜM İKİ - ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR 16

2.1 Ayrık Elemanlar Yöntemi 16
2.1.1 Ayrık Elemanlar Yönteminin Teorik Altyapısı 16
2.1.2. Ayrık Elemanlar Yönteminin Sonlu Elemanlar Yönteminden Farkları 22
2.1.3. Ayrık Elemanlar Yönteminin Tarihsel Gelişimi 23
2.2.1. Eleme Uygulamaları 25
2.2.2. Aşınma Uygulamaları 27

2.2.3. Doğrulama Uygulamaları 28

BÖLÜM ÜÇ - ANALİZ YÖNTEMİ 31

3.1 Yöntem 31
3.2 Girdilerin Belirlenmesi 32
3.2.1 Malzeme ve Parçacık Boyutlarının Belirlenmesi 32
3.2.2 Eleklerin Modellenmesi 34
3.2.3 Elek Dönme Hızının Belirlenmesi 36
3.2.4 Eleme Sisteminin Oluşturulması 37
3.2.5 Yığın Hacminin Ölçülmesi 40
3.2.6 Aşınma Eleğinin Oluşturulması 41
3.3.1. Elekler 43
3.3.2. Besleme Hacmi 43
3.3.3. Parçacıkların Kütlesel Oranı 43
3.3.4. İyileştirmeler 44

BÖLÜM DÖRT - ANALİZLER VE SONUÇLAR 45

4.1 Başlangıç Analizleri 45
4.1.1 Elek Hızı 45
4.1.2 Yığın Hacmi 46
4.2 Eleme Analizleri 48
4.2.1 Besleme Hacmi Değişkeni 50
4.2.2 Parçacıkların Kütlesel Yüzdeleri Değişkeni 54
4.3 Kapasite İyileştirmeleri 59
4.3.1 Besleme Hacmine Göre İyileştirmeler 59
4.3.2 Parçacık Dağılımına Göre İyileştirmeler 65
4.4 Aşınma Analizleri 69
4.4.1 İyileştiriliş Eleklerin Aşınma Performansları 75

BÖLÜM BEŞ - TARTIŞMA VE ÖNERİLER 79

5.1. Sonuçların Yorumlanması 79
5.2. Sonraki Çalışmalar 81

5.3. Çalışmanın Sağlayacağı Faydalar 81

KAYNAKLAR 82

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 Doğrusal Titreşimli Elek 2

Şekil 1.2 Sabit Döner (trommel) Elek 3

Şekil 1.3 Statik (Sabit) Elek 4

Şekil 1.4 Flip-Flow - esnek elek yüzeyleri 5

Şekil 1.5 Tumbler Elek 6

Şekil 1.6 Mobil Eleme Ünitesi 6

Şekil 1.7 Tambur Elek 7

Şekil 1.8 Üç farklı kademede boyut ayrımı yapan bir elek 8

Şekil 1.9 Kullanım sırasında eleği taşıyan özel kaplamalı tekerlekler 8

Şekil 1.10 Kauçuk Bant Desenleri 11

Şekil 1.11 Farklı dönme hızlarına göre parçacıkların davranışı 12

Şekil 1.12 Parçacığın elek yüzeyine tutunma ve ayrılma aşamaları 13

Şekil 1.13 Tambur elek tasarım parametreleri 14

Şekil 2.1 Parçacıklarda temas kuvvetleri 18

Şekil 2.2 HLS modelinde kuvvet-uzama grafiği 18

Şekil 2.3 Temas normal kuvvetleri katsayılarının gösterimi 19

Şekil 2.4 Temas teğetsel kuvvetleri katsayılarının gösterimi 21

Şekil 2.5 Geri kazanım faktörü analizi 29

Şekil 2.6 Yığın açısı kalibrasyonu 29

Şekil 3.1 Parçacıkların detaylı görünümü 33

Şekil 3.2 Kare delikli eleğe ait delik ölçüleri ve dizilimleri 35

Şekil 3.3 Dairesel ve slot delikli eleklere ait delik ölçüleri ve dizilimleri 36

Şekil 3.4 Deliklerinin yarısı kapalı olarak tasarlanmış “Hız Belirleme Eleği” 36

Şekil 3.5 Besleme konveyörünün detaylı görünümü..... 37

Şekil 3.6 Elek altı hacminin analiz sisteminde tanımlandığı bölge..... 38

Şekil 3.7 Çıkış hacminin analiz sisteminde tanımlandığı bölge..... 39

Şekil 3.8 Yığın Hacminin ölçülmesi için tasarlanan geometri 41

Şekil 3.9 Aşınma eleğinin genel görünümü 42

Şekil 4.1 Sırasıyla üstte 15,20 ve 25; altta 30 ve 35 devir/dakika hızlarda parçacıkların hareketleri 45

Şekil 4.2 25 devir/dakika hızda analiz koşullarında parçacıkların hareketleri 46

Şekil 4.3 Küçük ve büyük parçacıkların eşit olduğu 1 m3 mutlak hacimde yığın hacmi ölçülmesi 47

Şekil 4.4 1 metreküp besleme hacminde Elek1’in parçacık sayısı grafiği 48

Şekil 4.5 Konveyördeki malzemelerin eleğe ulaşması (2,5 saniye sonra) 49

Şekil 4.6 Besleme biterken eleğin durumu (11 saniye sonra) 49

Şekil 4.7 1 metreküp besleme hacminde Elek1’in anlık kütle grafiği..... 50

Şekil 4.8 Elek tasarımlarının artan hacimle birlikte değişen kapasiteleri 53

Şekil 4.9 Elek tasarımlarının artan hacimle birlikte değişen eleme süreleri 53

Şekil 4.10 Elek tasarımlarının artan hacimle birlikte değişen bertaraf süreleri 54

Şekil 4.11 1 metreküp beslemeyle küçük parçacıkların kütlesel değişimine göre kapasite 57

Şekil 4.12 1 metreküp beslemeyle küçük parçacıkların kütlesel değişimine göre eleme verimi 57

Şekil 4.13 1 metreküp beslemeyle küçük parçacıkların kütlesel değişimine göre eleme süresi 58

Şekil 4.14 1 metreküp beslemeyle küçük parçacıkların kütlesel değişimine göre bertaraf süresi 59

Şekil 4.15 Eleklerin ortalama verimleri 62

Şekil 4.16 Elek1 için yapılan iyileştirmenin efektif kapasiteye etkisi 62

Şekil 4.17 Elek2 için yapılan iyileştirmenin efektif kapasiteye etkisi 63

Şekil 4.18 Elek3 için yapılan iyileştirmenin efektif kapasiteye etkisi 63

Şekil 4.19 Yapılan iyileştirmelerin eleklerin eleme süresine etkisi 64

Şekil 4.20 Yapılan iyileştirmelerin eleklerin bertaraf süresine etkisi 64

Şekil 4.21 İyileştirmeler sonrası eleklerin efektif kapasitelerinin parçacık dağılımına göre değişimi 67

Şekil 4.22 İyileştirmeler sonrası eleklerin eleme verimlerinin parçacık dağılımına göre değişimi 68

Şekil 4.23 İyileştirmeler sonrası eleklerin eleme sürelerinin parçacık dağılımına göre değişimi 68

Şekil 4.24 İyileştirmeler sonrası eleklerin bertaraf sürelerinin parçacık dağılımına göre değişimi 69

Şekil 4.25 Aşınma analizi esnasında bir görüntü 70

Şekil 4.26 Yazılım çıktısı olan örnek aşınma grafiği 71

Şekil 4.27 Aşınma analizi sonrası eleğin görünümü 72

Şekil 4.28 1200 mm hatveli geometride aşınma çarpanının besleme hacmine göre değişimi 73

Şekil 4.29 1200 mm hatveli geometride aşınma çarpanının küçük parçacık oranına göre değişimi 73

Şekil 4.30 1200 mm hatveli eleklerde kapasite ve ömür etkisi (besleme hacmine göre)..... 74

Şekil 4.31 1200 mm hatveli eleklerde kapasite ve ömür etkisi (parçacık dağılımına göre)..... 74

Şekil 4.32 Tüm eleklerde besleme miktarına göre kapasite ve ömür etkisi 76

Şekil 4.33 Tüm eleklerde parçacık dağılımına göre kapasite ve ömür etkisi 77

TABLOLAR LİSTESİ

Sayfa

Tablo 3.1 Programa tanımlanan malzeme özellikleri 34

Tablo 3.2 Delik geometrileri ve sayılarının belirlenmesi..... 35

Tablo 3.3 Besleme konveyörüne ait önemli parametreler 38

Tablo 4.1 Yığındaki parçacıkların kütlesel dağılımları için ölçülen yığın hacimleri 47

Tablo 4.2 0,5 metreküp mutlak besleme hacmiyle alınan sonuçlar 51

Tablo 4.3 1 metreküp mutlak besleme hacmiyle alınan sonuçlar 51

Tablo 4.4 1,5 metreküp mutlak besleme hacmiyle alınan sonuçlar 51

Tablo 4.5 2 metreküp mutlak besleme hacmiyle alınan sonuçlar 52

Tablo 4.6 3 metreküp mutlak besleme hacmiyle alınan sonuçlar 52

Tablo 4.7 1 metreküp mutlak besleme hacmiyle ve toplam kütlenin %70'i küçük %30'u büyük parçacıklarla yapılan beslemede alınan sonuçlar..... 55

Tablo 4.8 1 metreküp mutlak besleme hacmiyle ve toplam kütlenin %60'ı küçük %40'ı büyük parçacıklarla yapılan beslemede alınan sonuçlar..... 55

Tablo 4.9 1 metreküp mutlak besleme hacmiyle ve toplam kütlenin %50'si küçük %50'si büyük parçacıklarla yapılan beslemede alınan sonuçlar 56

Tablo 4.10 1 metreküp mutlak besleme hacmiyle ve toplam kütlenin %40'ı küçük %60'ı büyük parçacıklarla yapılan beslemede alınan sonuçlar..... 56

Tablo 4.11 1 metreküp mutlak besleme hacmiyle ve toplam kütlenin %30'u küçük %70'i büyük parçacıklarla yapılan beslemede alınan sonuçlar..... 56

Tablo 4.12 0,5 metreküp mutlak besleme hacmi için iyileştirmelerin etkileri..... 60

Tablo 4.13 1 metreküp mutlak besleme hacmi için iyileştirmelerin etkileri..... 60

Tablo 4.14 1,5 metreküp mutlak besleme hacmi için iyileştirmelerin etkileri..... 61

Tablo 4.15 2 metreküp mutlak besleme hacmi için iyileştirmelerin etkileri..... 61

Tablo 4.16 3 metreküp mutlak besleme hacmi için iyileştirmelerin etkileri..... 61

Tablo 4.17 1 metreküp mutlak besleme hacmi ve toplam kütlenin %70'i küçük %30'u büyük parçacıklarla yapılan beslemede iyileştirmelerin etkileri ... 65

Tablo 4.18 1 metreküp mutlak besleme hacmi ve toplam kütlenin %60'ı küçük %40'ı büyük parçacıklarla yapılan beslemede iyileştirmelerin etkileri 65

Tablo 4.19 1 metreküp mutlak besleme hacmi ve toplam kütlenin %50'si küçük %50'si büyük parçacıklarla yapılan beslemede iyileştirmelerin etkileri... 66

Tablo 4.20 1 metreküp mutlak besleme hacmi ve toplam kütlenin %40'ı küçük %60'ı büyük parçacıklarla yapılan beslemede iyileştirmelerin etkileri 66

Tablo 4.21 1 metreküp mutlak besleme hacmi ve toplam kütlenin %30'u küçük %70'i büyük parçacıklarla yapılan beslemede iyileştirmelerin etkileri 66

Tablo 4.22 Farklı mutlak hacimdeki beslemelere göre aşınma değerleri 71

Tablo 4.23 Küçük parçacıkların kütlesel oranına göre aşınma değerleri..... 71

Tablo 4.24 İyileştirilen eleklerin besleme hacmine bağlı olarak aşınma değerleri.... 75

Tablo 4.25 İyileştirilen eleklerin parçacık dağılımına bağlı olarak aşınma değerleri 75

BÖLÜM BİR
GİRİŞ

1.1 Amaç

Eleme, bir yığındaki farklı tanecik boyutuna sahip parçacıkları birbirinden ayırmak için kullanılan yöntemdir. Eleme yöntemi parçacıkları mekanik olarak ayrıştırmanın en basit prensipli şeklidir.

Geçmişten günümüze üretim faaliyetlerinde verimliliği artıran bu yöntem, ilk çağlarda insan gücüyle mekanik olarak gerçekleştirilirken, daha büyük ölçekte (miktarda) eleme yapma ihtiyacı sonucunda eleme işlemi yapan makinalar günümüzde bir sanayi unsuru olmuş ve endüstride önemli pay sahibi olmuş ve çalışma alanlarına göre çeşitlenmiştir.

Tüm mühendislik problemlerinde görüldüğü gibi verimlilik ve kapasite, eleme üniteleri için de incelenmesi gereken bir konu olmuştur. Burada verimlilik artışı, eleme ünitesinin güç kaynağı olan unsurun ve hareketin iletildiği mekanik aksam ile birlikte çalışmasının tükettiği enerjinin azaltılması konusunda bir fayda olurken kapasite ise eleme işlemini gerçekleştiren yüzeyi ilgilendiren bir konu olup; özetle yığının eleme prosesini tamamlamış olarak en iyi elenmiş ve en hızlı şekilde sistemi terk etmesini sağlamak olacaktır. (Chen vd., 2010)

Bu çalışmanın amacı, trommel eleklerde ve diğer eleme sistemlerinde kapasiteyi ilgilendiren çalışmaların incelenerek trommel eleğe ait parametrelerin belirlenmesi, belirlenen parametrelerin değerleri değiştirilerek elek ve parçacıklar üzerinde Ayrık Elemanlar Yöntemi analizlerini yapmak ve sonuçlarını yorumlamaktır. Ayrık Elemanlar Analizinin doğruluğunu test etmek için, analizi yapılacak parametre kombinasyonlarından biri, üretilen bir Mobil Eleme Ünitesi üzerinde test edilecektir. Tüm bu çalışmalar sonucunda standart biçimlerde üretimi yapılan Mobil Eleme Ünitelerinin Trommel Elekleri için veya çalışma koşulları için kapasitenin artırılması ve bu sistemlerin daha az zaman ve maliyetle daha çok malzemenin eleme işlemini tamamlaması hedeflenmektedir.

1.2 Endüstriyel Elek Tipleri

Eleme işlemini farklı amaç ve malzemeye göre kategorize etmek istediğimizde, günümüz endüstrisinde gıda, madencilik, metalurji ve geri dönüşüm başta olmak üzere birçok farklı sektörde kullanılmakta olan farklı tasarımlar olarak ortaya çıkmaktadır. (Hacıfazlıoğlu, 2017)

Farklı elek/eleme ünitesi tasarımları, kullanım alanına ve elenecek malzemenin özelliklerine göre ortaya çıkan ihtiyaç sonucunda kullanılmaktadır. Bu tasarımları ve kullanım alanlarını inceleyip karşılaştırma yapabilmek için en sağlıklı yöntem, eleklerin hareket şekillerine göre sınıflandırma yapmak olacaktır.

1.2.1 Doğrusal Titreşimli Elekler

Doğrusal titreşimli elek, endüstride en yaygın kullanım alanına sahip elek tipidir. Çalışma prensibi, elek yüzeyinin bir doğrultuda ileri-geri hareket etmesini sağlayacak vibromotorlar yardımıyla eleme işleminin gerçekleştirilmesidir. Şekil 1.1'de örnek bir modeli görülmektedir.



Şekil 1.1 Doğrusal Titreşimli Elek

Doğrusal titreşimli elekler, yüksek verimlilikle çalışmaları, bakım maliyetlerinin düşük olması ve geniş ürün yelpazesine hitap etmeleri nedeniyle avantajlıdır. Ancak geleneksel titreşimli elekler, 50 µm altındaki boyutlarda parçacıkları verimli bir şekilde ayıramaz. Çünkü yarattıkları titreşim, genliklerde kontrol edilemez ve küçük parçacıklar için gerekenden yüksek bir genlik oluşacağı için bu parçacıklar elenemezler.

1.2.2 Döner (Trommel) Elekler

Trommel (Tambur) Elek olarak da ifade edilen Döner Elekler, temel olarak yan yüzeylerinde eleme yüzeyi olarak kullanılmak üzere delikler bulunduran bir silindir tamburdan oluşur. Tambur döndükçe yığın tambur içinde ilerler, bu ilerleme bazı makinalarda tambur içine kaynatılmış helis şeklinde sac hatvelerle, bazı makinalarda ise tamburun girişi ve çıkışı arasında yükseklik farkı oluşturularak sağlanır. Tamburun dönmesi aynı zamanda büyük parçaların yuvarlanarak hareket etmesini ve küçük parçaların eleğe yaklaşmasını sağlar. Şekil 1.2'de örnek bir modeli görülmektedir.



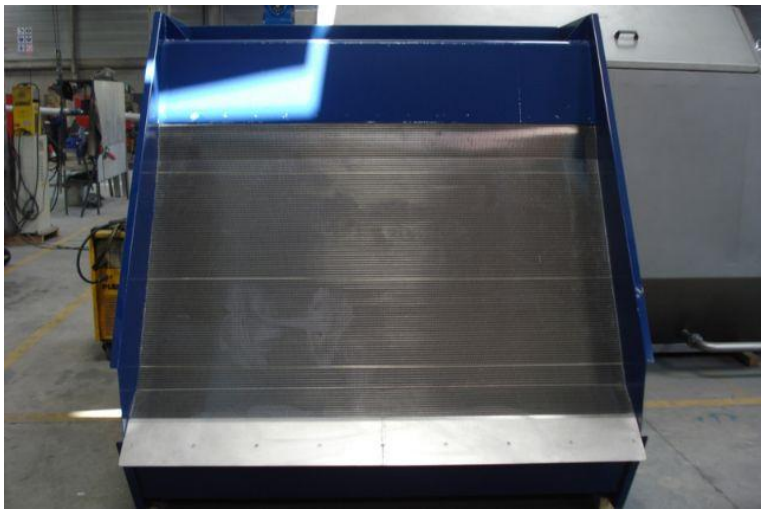
Şekil 1.2 Sabit Döner (trommel) Elek

Döner eleklerde tahrik, eleğin bulunduğu sisteme bağlı olarak elektrik motoru veya hidromotor yardımıyla eleğe iletilir; elek sabit sistemlerde 4, mobil sistemlerde ise 8 teker ile yataklanır.

Döner eleklerin avantajları arasında yüksek verimlilik ve çok düşük bakım maliyetleri gösterilebilir. Kullanılan elek sacının delik boyutları değiştirilerek çok çeşitli alanlarda farklı parçacık boyutlarıyla kullanımı mümkün kılınabilir.

1.2.3 Statik (Sabit) Elekler

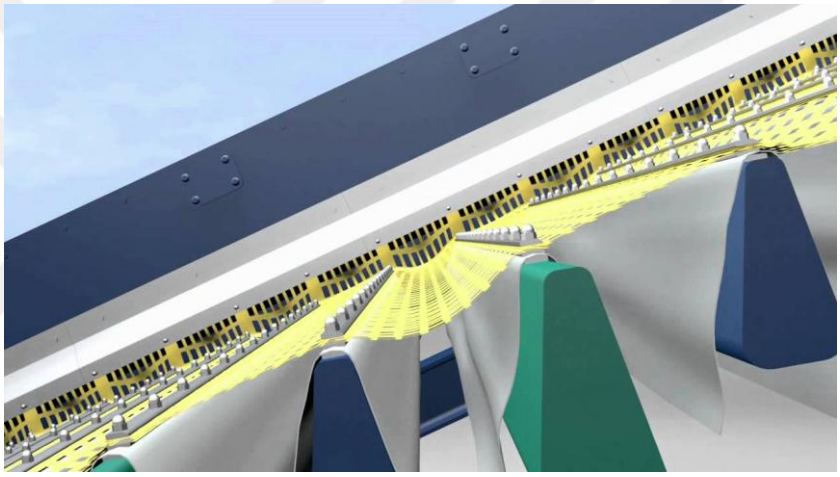
Sabit elekler, elek sacının hareketsiz olduğu elek türüdür. Elek sacı yer ile sabit bir açı ile durur ve yığının üstten bırakılarak taneciklerin sahip olduğu konumsal potansiyel enerjisiyle kayma ve yuvarlanma hareketi yapar ve aşağıya ulaşana kadar elenmesi beklenir. Bir tahrik elemanı bulundurmadıkları için düşük maliyetlidirler ancak verimli bir elemenin gerçekleştirilmesi veya eleme kapasitesinin artırılması için malzemelerin elek üzerinde hareket edeceği mesafenin artırılması gerekmektedir. Küçük parçacıkların elenmesi için uygun olan bu elek, diğer elek tiplerine göre tasarımı en basit olan elek tipidir. Şekil 1.3'te örnek bir modeli verilmiştir.



Şekil 1.3 Statik (Sabit) Elek

1.2.4 Flip-Flow (Çift Titreşimli) Elekler

Eleklerinin esnek malzemeden yapıldığı, eleğin bağlandığı şasinin bir motor yardımıyla titreşim hareketi yaptığı ve elek üzerindeki malzemenin de bu titreşimin etkisiyle esnek olan elek parçasının üzerinde sekerek ilerlediği elek türüdür. Bu sekme hareketi sayesinde nemli olan yığınları parçacık boyutuna göre ayıklamak daha verimli bir şekilde sağlanmaktadır. Eleklerin ileri geri hareketi ve elek sacları üzerinde malzemenin sekmesi nedeniyle çift yönlü bir titreşim hareketi olarak değerlendirilebilir. Ayrıca gıda sektöründe katı ve sıvı parçacıkları ayırmak için de kullanılabilirler. Bu kullanım şekli yığını silkeleyerek kurutma/nemini azaltma gibi düşünülebilir. Şekil 1.4'te esnek elek yüzeylerinin detaylı görünümü mevcuttur.



Şekil 1.4 Flip-Flow - esnek elek yüzeyleri

1.2.5 Tumbler (Dairesel Titreşimli) Elekler

Dairesel titreşimli elekler, elek üzerindeki malzemeleri tanecik boyutuna göre ayırmak için titreşimli eleklere kıyasla daha düşük frekanslı dairesel hareket yaparlar. Döner elekler gıda, kimya gibi sektörlerde yaygın olarak kullanılırlar. Genellikle birden fazla elek katmanlı olup (piyasadaki Tumbler Eleklerde 5 adete kadar elek katmanı vardır, ihtiyaca göre bu tasarımlar ve sayı değiştirilebilir.) karmaşık yığınlardaki farklı boyutlardaki parçacıkları birbirinden ayırmak için ideal bir elek tasarımıdır.

Tumbler eleklerde radyal sapma açısı, radyal sapma mesafesi ve teğetsel sapma açısı olmak üzere üç ana parametre bulunur ve bu parametreler motor tahrikiyle

ayarlanarak malzeme yığınının elek yüzeyi üzerinde hareket boyunca yuvarlanması sağlanır. Her bir katmanda elek üzerinde kalan malzemeler yanlardaki haznelere merkezkaç kuvvetinin etkisiyle aktarılır. Üst elekten geçen malzeme alt katmanlara kadar aynı hareketi yaparak ilerler. Şekil 1.5'te örnek bir Tumbler Elek bulunmaktadır.



Şekil 1.5 Tumbler Elek

1.3 Mobil Eleme Ünitesi

Mobil Eleme Üniteleri, kendilerine ait tahrik elemanını bulunduran ve bu tahrik elemanıyla hareketini sağlayan veya hareketi dışında üzerindeki ekipmanların çalışmasını sağlayarak eleme işlemini gerçekleştiren mobil makinelerdir. Şekil 1.6'da çalışma sahasında bir Mobil Eleme Ünitesi görülmektedir.



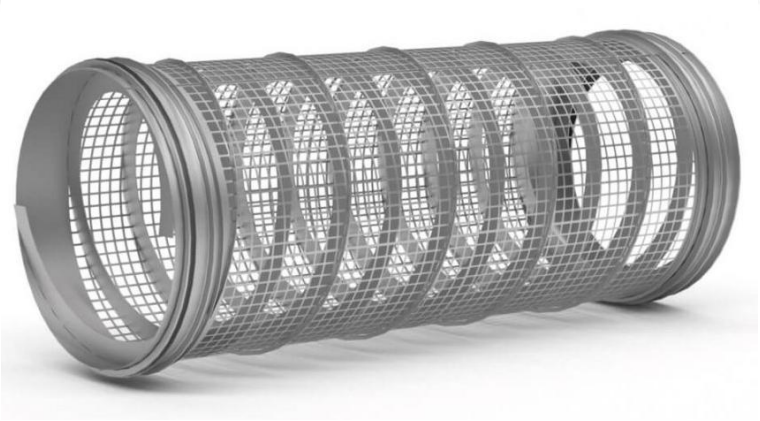
Şekil 1.6 Mobil Eleme Ünitesi

Mobil Eleme Ünitelerine transport sistemi olmayan tesislerde, büyük iş sahalarında ve biyoenerji santralleri gibi yerlerde ihtiyaç duyulmaktadır. Çöp, moloz, ağaç ve gübre tesislerinde Mobil Eleme Üniteleri kullanılır.

Mobil Eleme Üniteleri, diğer endüstriyel eleme sistemlerinden farklı olarak kendine ait alt bileşenler içerir; bu bileşenler eleme faaliyetini, ünitenin hareketini ve elenecek malzemenin hareketini (eleği besleme ve boşaltma) faaliyetlerini gerçekleştirir. Konveyör bantların ve eleğin hızları otomasyon sistemiyle makine üzerinden veya operatör kumandası ile kontrol edilir.

1.3.1 Tambur Elek

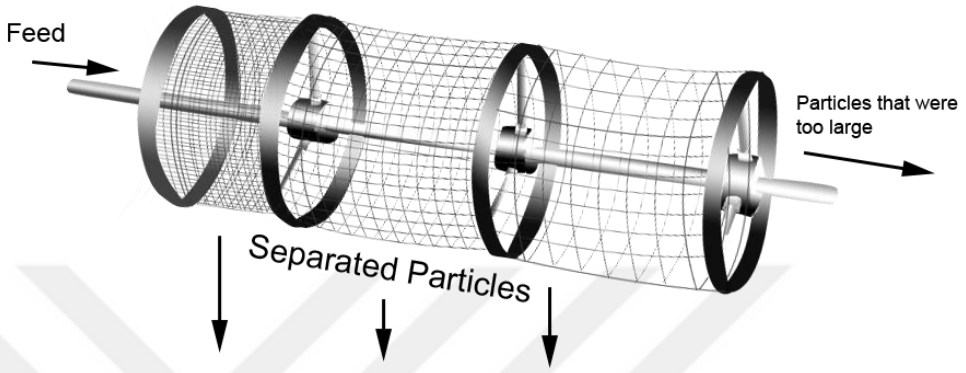
Mobil Eleme Ünitelerinin ana bileşenidir. Malzemelerin geçişini sağlayacak delikli sacların ve ilerlemesini sağlayacak sacların kaynatılması ile üretilir. Aynı zamanda tahrik ve destek noktalarında (taşıyıcı yüzeylerinde) çember şeklinde tamamen kapalı saclar mevcuttur. Tambur elekler, elenecek ürünün tanecik boyutuna göre değişen delik ölçüleri ve geometrileriyle piyasaya sunulur. Şekil 1.7'de, kare delikli ve sık hatve aralıklı sacları olan bir Tambur Elek örneği görülmektedir.



Şekil 1.7 Tambur Elek

Farklı üreticilerin elek tedariğini ve parça değişimini kolaylaştırmak için üreticiler arasında kabul görmüş standart çeşitleri 5.18, 6.20 ve 7.20 olarak üç çeşittir. Örnekle açıklamak gerekirse, 5.18 olarak adlandırılan tambur elek modeli yaklaşık* 5 metre uzunluğunda ve 1800 mm dış çapına sahip eleği ifade eder. (*: Gerçek boyu uçtan uca 4740 mm, elek iç çapı 1785 mm'dir.)

Tek tip delik ölçüsüyle yığındaki parçacıkları ikiye ayıran elekler olduğu gibi, malzeme ilerledikçe onları kademeler halinde ayıran elekler de mevcuttur. Bu sayede tek operasyonla farklı amaçlarla kullanılabilecek parçacıklar tambur elekle de elde edilebilmektedir. Şekil 1.8'de bu şekilde bir tasarımın örneği bulunmaktadır.



Şekil 1.8 Üç farklı kademede boyut ayrımı yapan bir elek

Tambur elek, motora bağlı hidrolik pompalardan beslenen bir hidromotor yardımıyla tahrik edilir. Hidromotor hareketini zincir dişliye aktarır, zincir dişli ise eleğin dış çemberine kaynatılmış olan dişliye dönme hareketini iletir.

Eleği yataklamak için 8'er adet özel kaplamalı tekerlek kullanılır. Bu tekerlekler eleğin önünde ve arkasında, eleğin x ve y eksenlerinde hareketini önlerken, açılı sistemlerde z ekseninde sabitleyecek bir baskı tekeri bulunur. Şekil 1.9'da görüldüğü gibi tekerleklerin dışında farklı renkte bir kaplama mevcuttur.



Şekil 1.9 Kullanım sırasında eleği taşıyan özel kaplamalı tekerlekler

Tambur elek aynı zamanda iç kısmına kaynatılmış saclardan oluşan bir helis içerir; böylece içinde elenmeyen malzemenin birikmesini önler ve elek döndükçe ilerlemesini sağlayarak diğer ucundan çıkışını kolaylaştırır.

Eleme prosesi ardından kullanılacak faydalı ürün, çalışılan sektöre göre küçük veya büyük taneli olanlar olarak değişkenlik gösterebilir. Örnekle ifade etmek gerekirse, eleme sonrasındaki proses giremeyecek kadar büyük tanecikler ayıklanmak ve küçük tanecikler toplanmak istenebilir. Öte yandan biyoenerji tesislerinde (odun yakılarak enerji üretilen tesislerde) eleme işlemi, yakılacak odunların içindeki kum ve tozun ayıklanması için kullanılır, burada elekten geçebilen kum taneleri ayrılırken faydalı ürün elekten geçemeyen odun parçalarıdır.

Elek üzerinde, içindeki maddenin duvarlara sıvanarak elek deliklerini kapatmasını ve eleme alanının azalmasını engelleyen bir fırça sistemi de bulunur. Fırça sistemi, fırça kıllarının elek deliklerinden geçebileceği ve 1 – 1,5 santimetre içeri girebileceği bir mesafede bulunur, eleğin dönüşüyle dönme hareketini gerçekleştirip elek deliklerinin temizlenmesini sağlar.

Tambur elekte bulunup malzemenin eleme hızını ve kapasitesini belirleyen değiştirilebilir parametreler; delik ölçüleri ve dizilimi (eleme yüzeyi alanı), helis hatvesi, eleğin ekseninin yere göre açısı, eleğin dönüş hızı ve besleme hızı olarak incelenebilir. Bu parametreler tezin devamında detaylı olarak tanımlanıp incelenecektir.

1.3.2 Yürüyüş Grubu

Bir Mobil Eleme Ünitesi, çeki oku ile bir traktör ya da teleskopik yükleyici yardımıyla çekilebildiği gibi, motordan aldığı gücü kendi hareketinde kullanabileceği hidromotorlara sahip bir yürüyüş grubu da içerebilir.

Yürüyüş grubunda, ünitenin çalıştığı koşullar ve boyutları göz önünde bulunduğunda ağırlıklı olarak paletli yürüyüş sistemleri tercih edilse de; kendi hareketini dingil-aks sistemi ile sağlayan modeller de mevcuttur.

Mobil Eleme Ünitesi'nin bir yürüyüş grubuna sahip olması motorun gücünün ve dolayısıyla maliyetin artması anlamına gelir; bu nedenle kendi hareketini gerçekleştiren modeller, görece daha büyük modellerdir.

1.3.3 Konveyör Bantlar

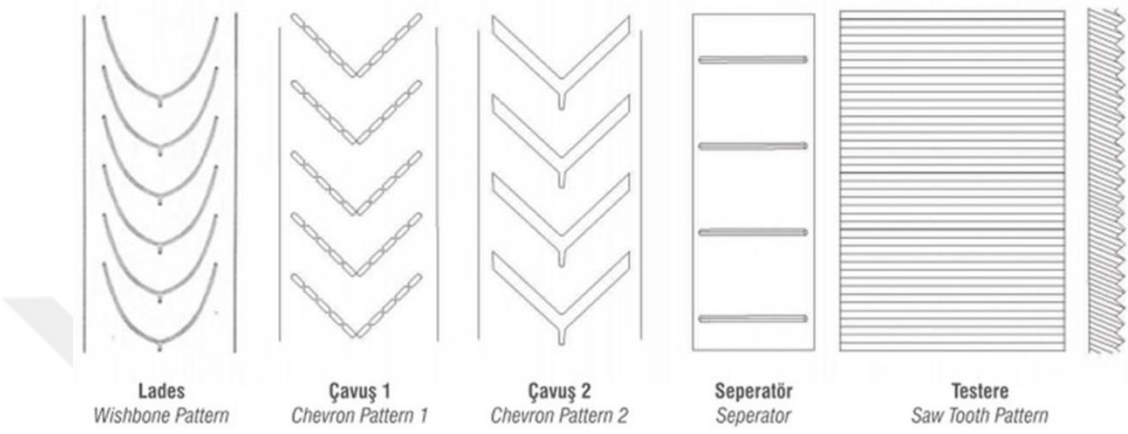
Mobil Eleme Ünitesi, eleğini besleyeceği ve tahliye edeceği malzemeleri üzerindeki konveyör bantlar sayesinde taşır. Bu konveyör bantlar, hızları otomasyon ile kontrol edilebilen hidromotorlar ile tahrik edilir. Üniteyi tahliye etme işini yapan konveyör bantlar gövde üzerinde pistonlar yardımıyla katlanarak açılıp kapanabilir. Bantların maruz kaldığı yüke ve üzerindeki ürünün çeşitliliğine göre kauçuk kalınlıkları ve kauçukları üzerindeki desenlerin ve bordürlerin özelliği de değişkenlik gösterebilir.

Mobil Eleme Ünitesinde temel olarak 4 farklı işlevde konveyör bant vardır:

a) Besleme Bandı: Yükleme yapılan bunkerin tabanında, üzerindeki ürünleri tambur eleğin içine dökerek eleği besleyen banttır. Yükleme bir ekskavatör yardımıyla ve bant üzerinden belirli bir mesafede yapılacağı için, kısaca yüksekten ve ani yüke maruz kaldığı için, kesitinin en kalın ve dayanıklı olması beklenen banttır.
b) Elek Altı Bandı: Elekten geçebilen malzemelerin toplanıp taşındığı, dönme ekseni boyunca uzanan konveyör banttır. Diğer bantlara göre üzerine en az yük binen bant olduğu için kauçuk deseni yoktur ve ince bant kullanılabilir.
c) Yan Bant: Elek Altı Bandının taşıdığı, elekten geçebilen malzemelerin ünite dışına tahliye edilmesini sağlayan banttır. (Tasarıma göre Elek Altı Bandından dökülen ürünle doğrudan beslenebilir veya arada malzemeyi iletme görevi gören bir Kısa Bant bulunabilir.) Ünitenin yan tarafında açılı olarak yukarıya doğru uzanır, bunun neden malzemenin bu yükseklik altında birikecek olmasıdır. İnce malzemeyi yukarı doğru taşıyacağı için çavuş desenli (V-şeklinde) olmalıdır.
d) Arka Bant: "Çıkış Bandı" veya "Ret (Reject) Bandı" olarak da anılan bu bandın görevi, elekten geçemeyen büyük parçacıkların makina dışına

atılmasıdır. Yan Bant gibi pistonlarla katlanıp kapanması ve duruş açısı ayarlanarak çalışma konumunda yukarıya doğru açılı olarak durması sağlanır.

Şekil 1.10'da farklı amaçlarla kullanılabilecek çeşitli kauçuk bant desenleri bulunmaktadır.



Şekil 1.10 Kauçuk Bant desenleri

1.4 Tambur Elek Tasarımı

Mobil Eleme Ünitelerinde bulunan tambur elek, tahrik ünitesi yardımıyla dönme hareketi yaparak yığının hareketini sağlayan parçadır. Bu nedenle tasarımında (şeklinde ve ölçülendirilmesinde) ve kullanımında (konumlandırılması ve hareketlendirilmesinde) işlevini yerine getirmesini etkileyecek parametreler vardır.

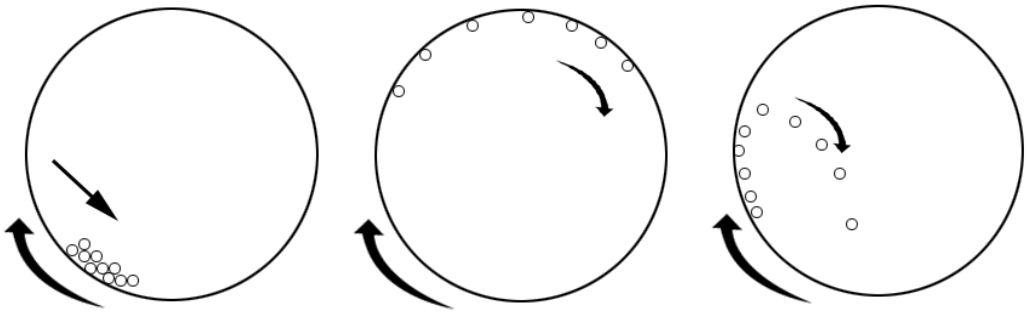
Geçmişten günümüze tambur elekleri tasarlayan kişiler tarafından kabul görmüş ve yeni tasarım yapılırken göz önünde bulundurulması gereken bazı parametreler vardır. Bu parametreler belirlenirken, elenecek malzemenin özelliklerinin etkisi de olacaktır. Bu yüzden malzemesinden bağımsız olarak bir elek tasarımından veya kullanımından bahsedilemez. (https://brentwood.com.au/trommels-101/)

Eleğin dönme hareketinin optimize edilmesi, merkezkaç kuvveti inceleneceği için elek çapına, parçacığın ağırlığı ve sürtünme kuvvetine bağlıdır. Tüm eleklerde olduğu gibi paracıkların birbiri üzerinde yığılı halde kalması eleğin hareketiyle önlenir. Tambur elekte dönme hareketi sayesinde parçacıkların merkezkaç etkisiyle ve sürtünme kuvvetinin yardımıyla elek iç duvarına tutunmaları sağlanır.

Elek dönme hızının düşük olduğu durumda, tanecikler elek tabanında üst üste birikir ve karışık durumdaki taneciklerden üst kısımda bulunan küçük tanecikler en alta yani deliklere ulaşamaz. Bu da elemede verim kaybına neden olur, çünkü üstlerde kalıp elenemeyen küçük parçacıklarla birlikte çıkışa doğru ilerleyecek ve eleği terk edecektir.

Elek dönme hızının gereğinden fazla yükseltildiği durumlarda ise parçacıkların hepsi, elek duvarı boyunca dizilerek merkezkaç etkisinde duvardan ayrılamaz. Delikten geçerek ayrılan parçacıklar ise kontrolsüz bir şekilde etrafa saçılır. Elekten geçmiş küçük taneciklerin elek altındaki bant yardımıyla önceden belirlenmiş bir noktaya aktarılacağı ve bu bölgeden toplanıp kullanılacağı yere götürüleceği düşünüldüğünde bu arzu edilen bir durum olmayacaktır.

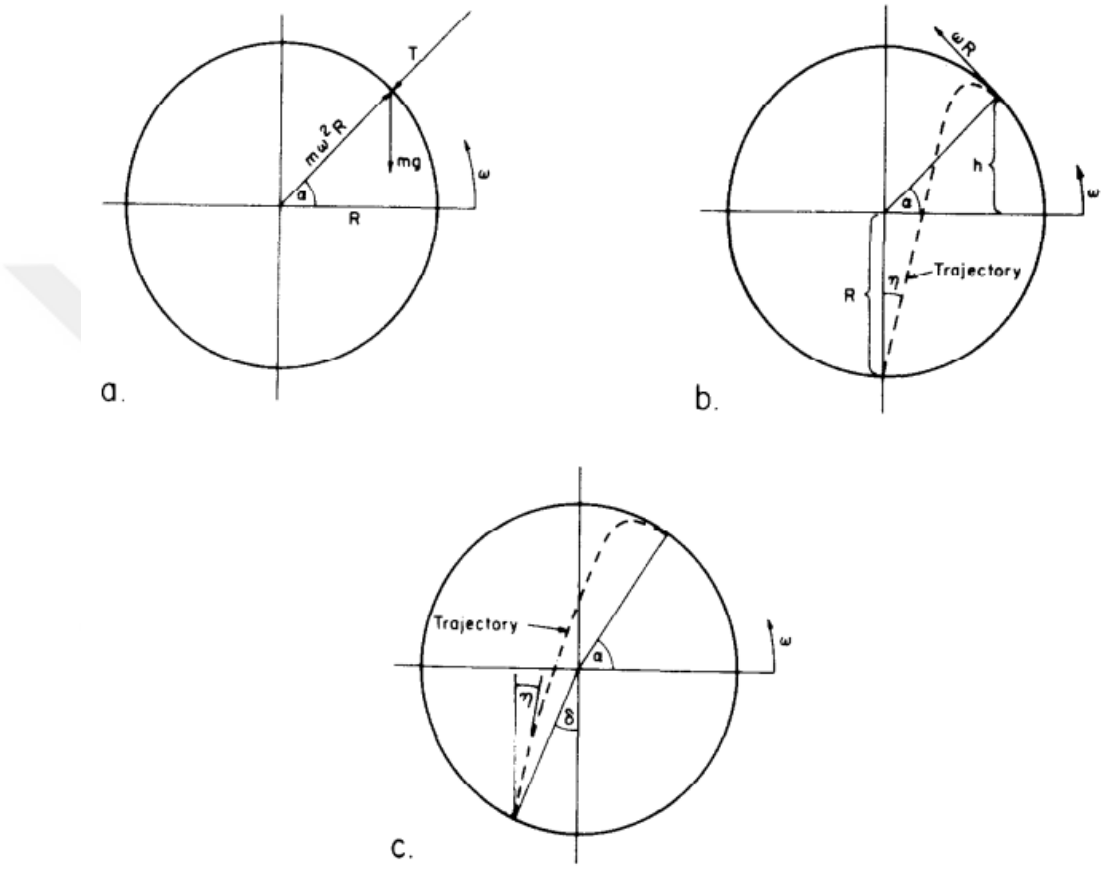
Tambur elek tasarımı yapılırken hedeflenen, parçacıkların yüzey boyunca taşınıp belirli bir noktaya ulaştığında yüzeyden kurtularak aşağıya düşmesidir. Böylece yığının altında olan parçacık bu hareketi yaparak üste çıkar ve yığın üzerinden tekrar alt noktaya geri döner. Bu hareketi binlerce parçacığın tekrarlı olarak yaptığı düşünüldüğünde, dönme hızını optimum seviyede tutmak parçacıklar arasında önemli bir hareket oluşturur. Sırasıyla düşük, yüksek ve ideal dönme hızlarında parçacıkların nasıl davranış göstereceği Şekil 1.11'de görülmektedir.



Şekil 1.11 Farklı dönme hızlarına göre parçacıkların davranışı

Tabandan harekete başlayan parçacık merkezkaç ve sürtünme kuvvetlerinin etkisiyle iç yüzeyde yukarıya doğru tırmanır, kendi ağırlığının düşey bileşeni bu kuvvetlerin düşey bileşenini yendiğinde ise yüzeyden ayrılır ve kesikli çizgilerle gösterilene yakın bir yol izleyerek elek tabanına düşer. Böylece gerekli yer değişimi

sağlanmış olur. Aşağıdaki şekillerde parçacıklar üzerindeki kuvvetler vektörel olarak gösterilmiştir. Şekil 1.12' de parçacığın tutunması ve yüzeyden ayrılması, etki eden kuvvetler ile birlikte aşamalar halinde gösterilmiştir. (Açıklamalar: a) Parçacığın yüzeyde tutunmasında etkili olan kuvvetler, b) Parçacığın yüzeyden kurtulma açısının görülmesi, c) Parçacığın yüzeyden kurtulduktan sonra izlediği yol)



Şekil 1.12 Parçacığın elek yüzeyine tutunma ve ayrılma aşamaları (Alter vd., 1982)

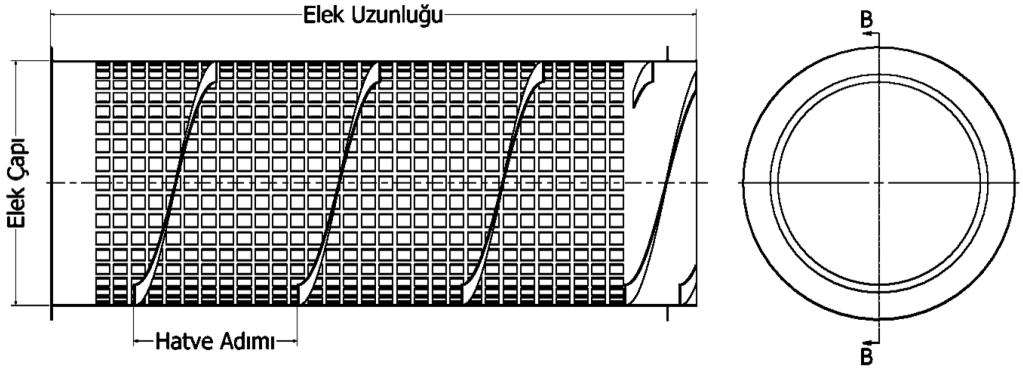
Taneciklerin elek tabanına toplanması ve yığın halinde kalmasının önlenmesi için ek bir çözüm olarak eleğin kenarlarına, dönme ekseni ile paralel olacak şekilde uzun lama saclar da kaynatılabilir. Eleğin çapı, kullanılacak malzemenin ağırlığı ve dönme hızı gibi ölçütler bu tercihi yapmakta etkilidir.

Elek tamburunun çapı ve tamburun boyunun artırılması, tek başına eleme performansının optimize edilmesi için yeterli değildir. Çünkü bu geometrilerin değiştirilmesinin diğer tasarım ve kullanım parametrelerine etkisi olumsuz olabilir. Örneğin çapın artırılması, parçacığın elek duvarına tutunması için gerekli merkezkaç

kuvvetinin sağlanacağı devir sayısını değiştirecektir. Boyun artırılması da artış oranında verim artışı sağlamayacaktır, çünkü beslemenin yapıldığı uçtan çıkış ucuna doğru ilerlendikçe elek altına düşen malzeme azalmaktadır. (Glaub vd., 1982)

Öte yandan çap ve boy ölçülerinin değiştirilmesiyle kontrol edilebilecek Elek Yüzey Alanı, eleğin silindirik yüzeyini ifade eder ve kapasiteyi doğrudan etkileyen bir parametredir. Bu nedenle önceki başlıkta bahsedilen standart elek modelleri arasında üretici ve kullanıcının mutabık olduğu kapasite farklılıkları bulunmaktadır. Bu çalışma özelinde, tek bir elek ebadı incelendiği için, yanal alan değişiminin etkisi incelenmeyecektir. Dış boyutlar ve dolayısıyla yanal alan sabit tutulacaktır.

Tambur eleğin içinde hareket eden parçacıklar, eleğin dönme hareketinin etkisiyle yığılmadan ilerlerken bir yandan da eleğin içinde ilerlemeleri gerekmektedir. Bu harekete yardımcı olmak için elek besleme yönü daha yukarıda olacak şekilde eğimli olarak kullanılabilir ve yerçekiminden yararlanılabilir. Bir diğer çözüm de helis şeklinde sacların elek iç yüzeyine kaynatılmasıdır. Elek dönme hareketi yaptıkça parçacıklar, bu sacların ilerletmesiyle çıkışa doğru taşınır. Bu şekilde bir tasarım daha kontrollü bir malzeme ilerleyişi sağlar ve eğim olmadığı için taşıyıcı elemanlara eşit yük biner. Tambur eleğe ait tasarım parametreleri, elek kesitinde Şekil 1.13'te gösterilmiştir.



Şekil 1.13 Tambur elek tasarım parametreleri

Helis sacları eklenerek bir tasarım yapıldığında, optimize etme konusunda da daha çok seçenek olacaktır. Çünkü hatve adımı olarak tanımlanan mesafe istenen ölçüde olacak şekilde tasarım yapılabilir. Hatve adımı, elek eksenine paralel bir yüzeyden

elek kesildiğinde, eleğin merkez ekseniyle kesişen ardışık iki nokta arasındaki mesafedir. Başka bir deyişle, elek bir tam tur döndüğünde helis sacının önündeki parçacığı ilerleteceği mesafedir.

Tambur elek için deliklerin geometrisi de önemli bir tasarım parametresidir. Toplam delik alanı sabit tutulduğunda, küresel parçacıklar incelenirken delik ölçüsü olarak verilen değere yakın tutulmak kaydıyla birim delik alanı da sabit tutulabilir, delik sayısı artarken delik alanı küçültülebilir. Örneğin kenar uzunluğu x birim olan bir kare delikli eleğin, çap uzunluğu x birim olan bir dairesel delikli elekle aynı delik alanına sahip olabilmesi için delik sayısının dairesel eleğe göre daha düşük olması gerekir. Veya kare delikler, birim delik alanı değişmeyecek şekilde kısa kenarı x birim olan slot şeklinde deliklere çevrilirse de bu durum eleme performansına etki edecektir.

Delik tipinin de elek kapasitesini etkileyen tek başına bir parametre olduğu ve burada tambur elek için yazılan parametrelerin diğer elek tipleri için değişkenlik gösterirken, bu çalışmada kullanılmayacak ama elek tipleri için genel olarak geçerli diyebileceğimiz eğim gibi parametreler mevcuttur. Bu parametreler analiz programının kullanılmayacağı durumlarda, deney yapılarak birer katsayı olarak tanımlanmıştır. Bu katsayılar, parametresinin ilgili koşullardaki değeri diyagramlardan okunmak suretiyle önceden belirlenmiş baz kapasite ile çarpılarak gerçek kapasitenin hesaplanmasında kullanılırlar. (Olsen ve Carnes, 2001)

BÖLÜM İKİ
ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

2.1 Ayrık Elemanlar Yöntemi

Ayrık Elemanlar Yöntemi (Discrete Elements Method veya Distinct Elements Method) yüksek parçacık sayısına sahip yığın mekaniğini inceleyen sayısal yöntemin adıdır. Burada yığın, rastgele gruplanmış (yığılmış) parçacıkları ifade eder. Bu yığılı parçacıklar, birbirleriyle temas halindeyken etkilerinden kaynaklanan etki kuvvetleri ve hareketlerinden kaynaklanan hareket denklemleri bu yöntemin konusudur.

Ayrık Elemanlar Yöntemi, ayrık gövdelerin hareketlerine ve etki (temas) halinde yer değiştirmelerine izin veren ve hesaplama sürdükçe yeni oluşacak temasları tanıyan hesaplamalı bir modelleme metodudur. (Lorig ve Cundall,1989)

2.1.1 Ayrık Elemanlar Yönteminin Teorik Altyapısı

Ayrık Elemanlar Yöntemi, en temel haliyle Newton'ın 2. Hareket Yasası'na dayanmaktadır. Newton'ın 2. Hareket Yasası, bir cisme uygulanan net kuvvetin, o cismin kütlesi ve kazandığı ivmenin çarpımına eşit olacağını ifade eder. Başka bir deyişle iki farklı cisme aynı koşullar altında eşit kuvvet uygulandığında, kütlesi küçük olan cismin kazanacağı ivme daha büyüktür. (Tong vd., 2023)

$$m\ddot{x} = \sum F_{net} \tag{2.1}$$

$$I_x\ddot{\theta}_x = \sum M_x \tag{2.2}$$

Yukarıda bulunan 2.1 ve 2.2 numaralı denklemler, 2.Hareket Yasası'nın öteleme ve dönme hareketi için tanımlanmış temel denklemleridir. Parçanın ataleti, dönme hareketinde kütleyi ve kuvvetin döndürme etkisi de momenti karşılayan bileşendir.

Parçacıklar üzerindeki kuvvetler ve parçacıkların hareketine etkisi şu 2.3 numaralı eşitlikle ifade edilebilir;

$$\sum F_{net} = m\frac{dv}{dt} = \sum F_{parçacık} + \sum F_{yüzey} \tag{2.3}$$

Yukarıdaki denklemde ivme, hızın zamana bağlı türevi olarak yer almaktadır. Parçacık kuvveti, her bir parçacığa bütün olarak etkiyen kuvvetleri ifade eder. Bu

kuvvetler koşullara göre değişebilmekte olup yerçekimi kuvveti, cismin içindeki akışkanın veya elektrik/manyetik alanının yarattığı kuvvet olabilir. Yüzey kuvvetleri ise parçacıkların birbirine temas etmesinden veya adezyon/kohezyon kuvvetlerinin etkisiyle ortaya çıkabilir. (Cundall ve Strack, 1979)

Denklemin zamana bağlı integrasyon operasyonları yapılarak hız ve yer değişikliği hesaplamaları yapıldığında 2.4 ve 2.5 numaralı denklemler elde edilir.

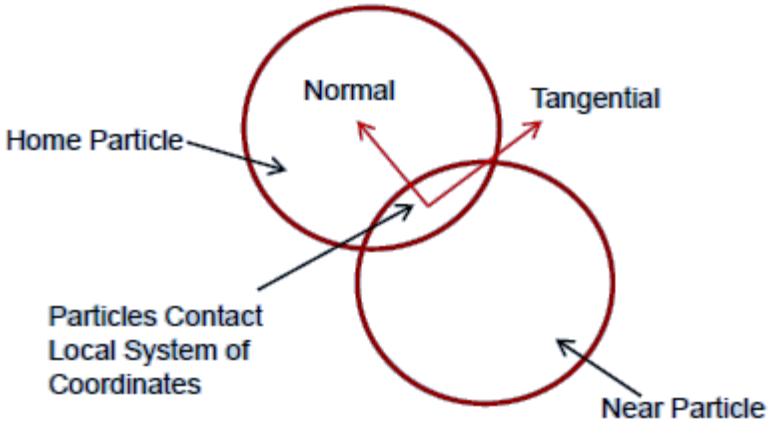
$$v_{yeni} = v_{eski} = \int_t^{t+\Delta t} \frac{\sum F_{net}}{m} dt \tag{2.4}$$

$$x_{yeni} = x_{eski} = \int_t^{t+\Delta t} v_{yeni}\, dt \tag{2.5}$$

Ayrık Elemanlar Yöntemi kullanarak yapılan analizler veya simülasyonlarda hesaplayıcının yaptığı işlem en temel haliyle temas tespiti yapmak ve her bir parçacık için bu denklemleri sürekli olarak çözmektir. Analiz alanında hiç parça kalmayana kadar veya tanımlanan analiz süresinin son zaman adımına kadar bu denklemleri her parçacık için çözmeyi sürdürür. (Ansys, 2024)

Temas kuvvetleri, parçacıkların birbiri arasında veya parçacıkların tanımlanan sınırlar ile olan etkileşimiyle meydana gelebilir. Granül parçacıklar, çok yüksek adetlerde bir analiz ortamında incelendiğinde, adetine ve tanecik boyutuna bağlı olarak sıvı veya katı davranışı gösterebilir. Bu parçacık davranışı, analiz programlarının hesaplamasını güçleştiren faktörlerden biridir. Bu nedenle Ayrık Elemanlar Analizinde parçacıklar, Sonlu Elemanlar Analizinde olduğu gibi ayrıca deforme edilmez, tanımlanan miktarda birbirleriyle iç içe geçmelerine izin verilir. Bu olay overlap (üst üste binme) olarak tanımlanır. (Fonte vd., 2015)

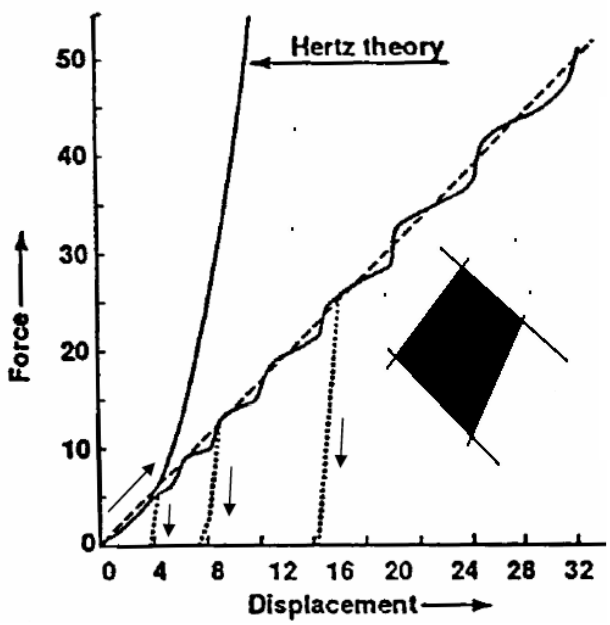
Bu iç içe geçme sonucunda, aşağıdaki Şekil 2.1'de görüldüğü şekilde normal ve teğetsel kuvvetler meydana gelir. Bu normal ve teğetsel kuvvetlerin büyüklükleri, parçacıklarının temas anındaki bağıl hareketlerinin zamana bağlı bir fonksiyonu olarak analiz programı tarafından hesaplanır.



Şekil 2.1 Parçacıklarda temas kuvvetleri (Fonte vd., 2015)

Temas kuvvetlerinin modelleri, normal ve teğetsel kuvvet modelleri olarak iki farklı şekilde incelenebilir.

Normal kuvvet modellerinden en yaygını olan Histeretik Doğrusal Yay (Hysteretic Linear Spring – HLS) modelidir. Bu model, parçacık üzerinde normal yöndeki temas kuvvetinden kaynaklı şekil değişimini elastik ve mükemmel-plastik şekil değiştirme davranışı olarak inceler.



Şekil 2.2 HLS modelinde kuvvet-uzama grafiği (Walton, 1993)

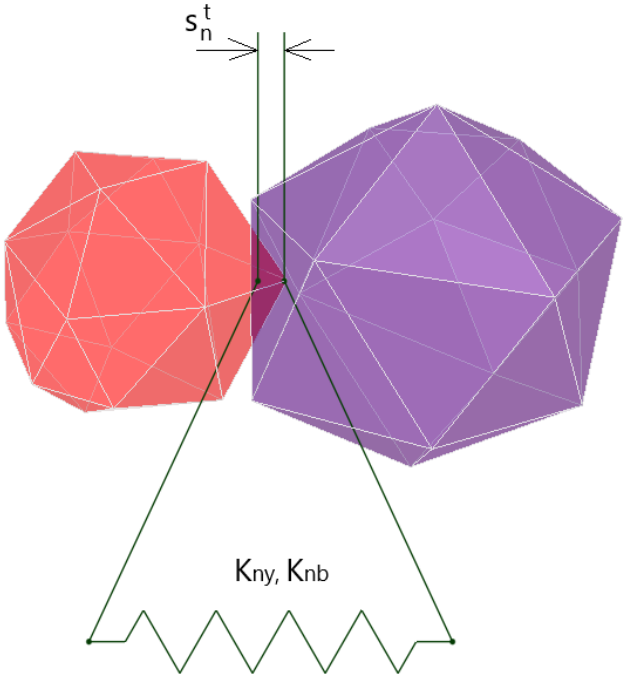
Adını aldığı histerezis etkisi, bir cisim üzerine uygulanan baskı ortadan kalktığında, kuvvet-şekil değişikliği grafiğinin aynı yolu takip etmeyeceği anlamına gelir. Histerezis etkisi Şekil 2.2'deki grafikte görüleceği gibi yük boşaltmasından sonra kalıcı plastik deformasyonlara ve gerçek koşullarda aradaki enerjinin ısı enerjisine dönüşmesine neden olur. Aynı şekilde yükleme ve boşaltma operasyonları boyunca da şekil değişiminin izlediği yol lineer değildir. (Walton, 1993)

Histeretik Doğrusal Yay modeli için bindirme mesafesine göre normal temas kuvveti aşağıdaki 2.6 ve 2.7 numaralı denklemler ile ifade edilir.

$$F_n^t = \begin{cases} \min\left(K_{ny} s_n^t\,,\; F_n^{t-\Delta t} + K_{nb}\Delta s_n\right) & eğer\ \Delta s_n \geq 0 \\ \max\left(F_n^{t-\Delta t} + K_{nb}\Delta s_n\,,\; \lambda K_{ny} s_n^t\right) & eğer\ \Delta s_n < 0 \end{cases} \tag{2.6}$$

$$\Delta s_n = s_n^t - s_n^{t-\Delta t} \tag{2.7}$$

Burada K_{ny} Temas Yükleme Sertliği, K_{nb} Temas Boşaltma Sertliği, s_n Bindirme Mesafesi, λ ise 0,001 değerinde birimsiz bir katsayıdır. Temas Yükleme Sertliği ve Temas Boşaltma Sertliği Şekil 2.3 üzerinde görülebilir.



Şekil 2.3 Temas normal kuvvetleri katsayılarının gösterimi (Ansys, 2024)

Şekil üzerinde görüldüğü gibi normal yönde bindirmenin oluşması, yükleme ve boşaltma sertliğinin etkisiyle şekil değişimi yaratarak bir miktar sönümlemeye neden olur. Şekil değiştirmenin elastiklik oranı da yükleme ve boşaltma sertlik katsayılarıyla 2.8 numaralı formül ile belirlenir.

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{K_{ny}}{K_{nb}}} \tag{2.8}$$

ε değeri 1 olduğunda kusursuz elastik temas, 0 olduğunda ise kusursuz inelastik teması ifade eder.

Bu modelin kullanılması için analize kullanıcı tarafından tanımlanması gereken parametreler; parçacık boyutu, Young modülü ve Restitution (Geri Kazanım) faktörüdür. Analiz programı bu verileri kullanarak yükleme ve boşaltma sertlik değerlerini belirler ve analize uygular.

Teğetsel temas kuvvet modeli için Histeretik Doğrusal yay modeli ile örtüşen ve yine yaygın olarak kullanılan bir model Lineer Yay Coulomb Limit (Linear Spring Coulomb Limit – LSCL) modelidir. Model, sürtünme başlangıcından önce elastik davranış gösterirken; statik veya dinamik sürtünme davranışı meydana geldiğinde Coulomb modeli davranışı hesaplayabilir. (Tamas vd., 2015)

Teğetsel temas kuvvetinin sürtünme katsayıları ve teğetsel sertlik faktörü yardımıyla hesaplanması aşağıdaki 2.9 ve 2.10 numaralı formüller ile gerçekleştirilir.

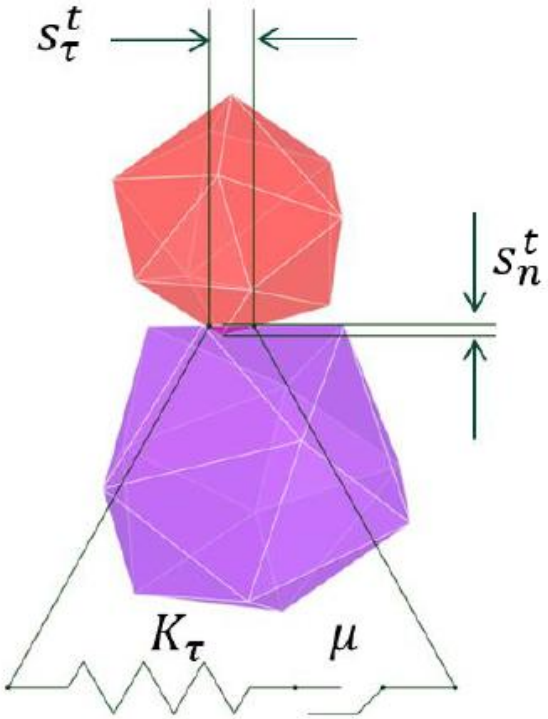
$$F_\tau^t = \min\left(\left|F_{\tau,e}^t\right|, \mu F_n^t\right) \frac{F_{\tau,e}^t}{\left|F_{\tau,e}^t\right|} \tag{2.9}$$

$$F_{\tau,e}^t = F_\tau^{t-\Delta t} - K_\tau \Delta s_\tau \tag{2.10}$$

Burada μ dinamik veya statik sürtünme katsayısını, Kτ teğetsel temas sertliğini, sτ ise teğetsel yönde hareket sonucu oluşan bindirme mesafesini ifade eder. Parçacıklar üzerinde gösterimi Şekil 2.4'te yapılmıştır.

Bu modelin kullanılması için analize kullanıcı tarafından tanımlanması gereken parametreler; dinamik ve statik sürtünme faktörleri ile teğetsel sertlik faktörüdür. Geçmişte yapılan çalışmalarda, adezyon kuvvetinin ihmal edildiği ve nem oranı

düşük olan parçacıklar için dinamik ve sürtünme katsayılarının eşit, teğetsel sertlik faktörünün de 1 olarak kabul edildiği görülmüştür. (Tino ve Tavares, 2021)



Şekil 2.4 Temas teğetsel kuvvetleri katsayılarının gösterimi (Ansys, 2024)

Normal ve teğetsel kuvvet modelleri, parçacıkların hareketini temel olarak incelemek için yeterlidir. Ayrık Elemanlar Yönteminde yeri olan ek kuvvet modellerinden de bahsetmek gerekirse, tam küresel parçacıklar için kullanılan Yuvarlanma Direnci Modeli (noktasal temas halinde bir sürtünme katsayısı gibi düşünülebilir), Isı Transferi içeren analizlerde kullanılmak üzere Isıl Modeller ve adhezyon kuvvet içeren analizlerde kullanılmak üzere de Adhesiv kuvvet modelleri bulunmaktadır.

Ayrık Elemanlar Yöntemi kullanan analiz yazılımları, aşınma prensibi olarak sıklıkla kabul gören Archard Aşınma Yasası modelini kullanır. Archard Modeli, aşınma miktarını yüzeye temas eden parçacıkların sebep olduğu sürtünme kuvvetlerinin yaptığı toplam iş olarak tanımlar. Bu iş alt kırılımlara ayrılıp formülize edildiğinde 2.11 numaralı eşitlik oluşur.

$$V = kx\frac{F_t s_t}{H} \quad (2.11)$$

Burada “V” toplam aşınma hacmini, “F_t” temas yüzeyine uygulanan teğetsel kuvveti, “S_t” yüzeylerin birbiri üzerinde kaydığı mesafeyi ve “H” ise aşınmaya maruz kalan parçacığın sertliğini ifade eder. “k” ise birimsiz aşınma sabitidir. Analiz programı bu bileşenleri anlık olarak hesaplayarak aşınma miktarını ortaya çıkarır. (Yin vd., 2024)

2.1.2. Ayrık Elemanlar Yönteminin Sonlu Elemanlar Yönteminden Farkları

Ayrık Elemanlar Yöntemi (DEM), Sonlu Elemanlar Yöntemi (FEM) prensibinden farklı olarak, süreksizlik içerir. Sonlu Elemanlar Yönteminde uzay tanımı malzemenin bütünlüğünü ve tanımlanan elemanların birbiri üzerinde doğrudan etkisini incelerken Ayrık Elemanlar Yönteminde hesap döngüsü, parçalar temas ettiğinde ortaya çıkan kuvvetleri, serbest hareket halindeyken de hareket denklemlerini inceler.

Sonlu Elemanlar Yönteminde parçacık sürekli bir bütün olarak kabul edilirken Ayrık Elemanlar Yönteminde parçacıkların davranışı her biri için ayrı ayrı modellenmektedir. Knudsen sayısı (cismin çapının veya en uzun kesit köşegeninin cismin boyuna oranı) Sonlu Elemanlar Yönteminde incelenebilecek cisimler için 1’den küçük değerleri kapsar. Başka bir deyişle Sonlu Elemanlar Yöntemi ile küresel cisimler değil, kiriş gibi uzun cisimlerin incelenmesi daha sağlıklı sonuç vermektedir. Ayrık Elemanlar Yöntemi için cismin Knudsen Sayısının 1’e yakın olması daha sağlıklı sonuç alınması ve analiz süresinin kısa olması açısından önemlidir. (Altair, 2024)

Sonlu Elemanlar Yöntemi, malzeme için belirlenmiş yasalarla veya malzeme özellikleriyle çalışır. Örneğin malzemenin gerilim-gerinim grafiği, yorulma eğrisi gibi özellikleri analiz sonucu için belirleyicidir. Yani malzemenin uygulanan etkiye karşı uğradığı şekil değişikliği tecrübe edilmiş ve grafik şeklinde çözücü sisteme tanımlanmış olmalıdır. Ayrık Elemanlar Yöntemi için malzemenin özkütlesi, parçacığın diğer parçacıkla veya sınır yüzey ile yaptığı etkileşim (sürtünme katsayısı ve geri kazanım faktörü) bilgilerinin tanımlanması gerekir.

Sonlu Elemanlar Yöntemi mesh adı verilen ağ sistemi oluşturarak parçayı hücrelere böler ve her hücreye Korunum Yasaları (Kütle korunumu, enerji korunumu gibi) uygulayarak hesap yapar. Ayrık Elemanlar Yönteminde ise korunum yasaları uygulanır fakat parça içinde süreksizlikler olduğu için bu korunum yasaları her zaman adımında sisteme ve birbiriyle etkileşim içinde olan parçalara uygulanır. (Bicanic, 2007)

Sonlu Elemanlar Yöntemi ve Ayrık Elemanlar Yönteminin hibrit analiz yöntemlerinden biri olan Süreksiz Deformasyon Analizi, büyük parçalı süreksizlik analizlerinde kullanılabilecek bir yöntemdir. Bu büyük parçalı süreksizlikler kaya blokları gibi kütlesi yüksek ve doğada birbirlerine göre yer değişimleri az olan sistemlerdir. Aralarında süreksizlik incelenecek parça sayısı görece daha az olduğu için süreksizlik gösteren noktalar bütün bir bloğun üzerinde belirtilip analiz için hazırlanabilir. Süreksiz deformasyon analiziyle elde edilen bölgeler, kırılmanın gerçekleşeceği yolu belirler. Bu sayede Sonlu Elemanlar Yönteminin avantajları kullanılarak süreksiz sistemlerin çözümü de mümkündür. Ancak bu hibrit yöntem, çok sayıda parçacık ve birbirleriyle temas yüzey alanları düşük olan parçacıkları içeren sistemler için kullanılmamaktadır. (Hammah vd., 2008)

2.1.3. Ayrık Elemanlar Yönteminin Tarihsel Gelişimi

Temelde Newton'un 2.Hareket Yasası'na dayanan Ayrık Elemanlar Yönteminin ilk olarak 1968 yılında doğada bir arada bulunan büyük kayaların bloklar halinde olduğu için tek parça olarak incelenemeyeceğinin açıklanmasıyla temelleri atılmıştır. Bu çalışmada bütün halde duran katı maddelerin iç yapısında süreksizlikler olabileceği ve bunu geleneksel mekanik veya Sonlu Elemanlar Yöntemleri ile tanımlamanın yeterli olmayacağı savunulmuştur. Temel mekanik özelliklerin tek başına yeterli olmayacağı bu yeni inceleme yönteminde, kesme kuvveti, teğetsel ve normal sertlik olarak yeni parametreler tanımlanmıştır. Böylece bütün bir kütle ilk defa parçalar ve bağlantılar (eklemler) sistemi olarak, parçaların (blokların) ve eklemlerin davranışlarının ayrı ayrı incelenmesini gerektiren bir durum olarak tanıtılmıştır. (Goodman vd., 1968)

Ardından Peter Alan Cundall tarafından 1971 yılında "süreksizlik analizi" olarak büyük kaya kütlelerinin blok halindeki hareketlerinin simüle edilmesi için bir hesaplama yöntemi şeklinde tanıtılmıştır. Bu çalışmada kaya parçacıklarının 2B ortamda birbirleri üzerinde kuvvet etkileri incelenmiş ve bu sayede ilk defa bir kaya bloğunun mekanik özelliklerini hesaplamak mümkün olmuştur. (Cundall, 1971)

1974 yılında P.A. Cundall bu çalışmayı RBM (Restricted Boltzmann Machines) bilgisayarlarında kodlayarak blokların hareketini, birbirleri üzerindeki etkilerini zamanın bir fonksiyonu olarak hesaplayarak katot ışın tüpü ekranlarında sürekli olarak görüntüleyebilen bir sistem oluşturmuştur. Program, blokları kullanıcı tarafından belirtilen ortam koşulları (yerçekimi vb.) içinde hareket ettirerek görüntülenmesine olanak sağlar. Program, bloklar arasındaki teması ayrı bir eleman değil bir eklem (joint) olarak tanımlar. Bu sayede blokların birbirlerine teması sonucu oluşan fiziksel deformasyonlar da tanımlanabilir ve kaya bloklarının arıza modları, birbirini etkileyen zincir temaslar sonucunda analiz çıktısı olarak görüntülenebilir ve yorumlanabilir olmuştur. (Cundall, 1974)

1978 ve 1979 yıllarında yapılan çalışmalarda Ayrık Elemanlar Metodu ilk defa kendi ismiyle resmi olarak formüle edilmiştir. 1978 yılındaki çalışmada 2B ortamda bulunan disk şeklinde parçacıkların birbirleri üzerindeki etkileri BALL adı verilen bir hesaplama programında incelenmiştir. Aynı zamanda parçacıkların üst üste binmesi veya birbirini sıkıştırması olarak açıklanabilecek, analiz programlarında "overlap" olarak adlandırılan durumun matematiksel açıklaması da yapılmıştır. Diskler sınırlı bir ortamda dizilerek birbirlerine temasından doğacak etkiler matematiksel olarak incelenmiştir. Böylece yöntem yalnızca kaya bloklarıyla sınırlı kalmamış ve çok sayıda küçük parçacıkların da bu yöntemle incelenebileceği tecrübe edilmiştir. (Cundall ve Strack, 1979)

1985 yılında P.A. Cundall ve ekibinin yaptığı çalışmalarda kaya bloklarının hareketi üzerindeki çalışmasını genişleterek, kayaçların deprem esnasındaki davranışlarını ve fay hattı olarak tanımladıkları giriş koşulu çevresindeki titreşimle çevresindeki blokların ne kadar hasar göreceğini ve nasıl hareket edeceğini inceleyen bir çalışma yapmışlardır. (Cundall, 1985) Aynı yıl içerisinde genelleştirilmiş DEM yöntemi ve formülasyonu da Williams ve ekibi tarafından sunulmuştur.

1992 yılında Gen-Hua Shi tarafından yapılan çalışmayla, ayrık elemanlar yöntemine ait hareket denklemleri, taş blokların hareketi ve deformasyon, kırılma gibi şekil değişiklikleri ile yeniden tanımlanmıştır. Hareket hesaplarına katılık matrisi hesapları da eklenerek günümüzde kullanılan şekli için bir temel oluşturmuştur. Bu analiz yöntemi, Süreksiz Deformasyon Analizi olarak isimlendirilmiş ve hesaplama programı olarak geliştirilmiştir. Bu programın yetenekleri, geçmişte yapılan hesaplamalara ek olarak, hesaplama anında yeni oluşacak temasları tanıyıp hesaba dahil etmesi ve lineer şekil değişimi, ayrılma (temasın bitmesi), dönme gibi hareketleri bir arada tanıyabilmesidir. (Shi,1992)

Ayrık Elemanlar Yöntemi yazılımlarının, Peter Alan Cundall'ın geliştirdiği sürekli hesaplama ve görüntüleme sistemini içeren RBM programıyla temeli atılmış olup, günümüzde açık kaynak kodlu veya hazır olarak kullanılabilecek çok sayıda Ayrık Elemanlar Analizi programı mevcuttur. Örnek vermek gerekirse açık kaynak kodlu programlardan yaygın bir tanesi LIGGGTHS, açık kaynak kodlu olmayan yazılımlardan da en yaygın olarak kullanılanlar ANSYS Rocky ve Altair EDEM yazılımlarıdır.

Ayrık Elemanlar Yöntemi hesaplamaları, analiz yazılımlarının da giderek yaygınlaşmasıyla ısı transferi ve kimyasal reaksiyonları içeren senaryolarıyla genişletilmiş ve Sonlu Elemanlar Analizi ve Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği yöntemleriyle de birleşik analizde kullanılarak Genişletilmiş Ayrık Elemanlar Yöntemi olarak farklı uygulamalarda karşımıza çıkmaktadır.

2.2 Ayrık Elemanlar Analizi Uygulamaları

2.2.1. Eleme Uygulamaları

Ayrık Elemanlar Yöntemi ve Rocky gibi parçacık analizini inceleyebilen analiz programları, eleme sistemlerinin analizlerini yapmak için uygundurlar. Tambur elek, diğer elek tiplerine göre yaygın olmadığı için bu alanda yapılan çalışmalar da diğer elek tiplerine göre daha az sayıdadır.

Titreşimli elekler için yapılan bir çalışmada, buğday taneleri ve saplarının elenmesi operasyonunda eleme performansının ortaya çıkarılabilmesi için 4 ana

parametre belirlenmiştir. Bu parametreler, elek yüzeyinin eğimi, titreşim genliği, titreşim yönü ve titreşim frekansıdır. Bu 4 parametre için 3 farklı değer kullanılarak 27 farklı analiz yapılmış ve girdi parametrelere göre verim sonuçları ortaya çıkarılmıştır. Daha sonra bu parametrelerin verime etkileri ikişerli olarak "3B Yanıt Haritası" tipi grafik üzerinde incelenmiş ve optimum girdiler bulunmuştur. (Ren vd., 2023)

Deneysel olarak doğrulaması yapılmış başka bir çalışmada ise yine titreşimli elek kullanılmış, pilot ölçekli bir deneme eleği yapılarak analiz sonuçları doğrulanmıştır. Burada eleğin ayıklama yaptığı boyut "Kesme Ölçüsü" olarak tanımlanmış ve verim hesabı da bu kesme ölçüsünden büyük ölçüdeki parçacıklar üzerinden yapılmıştır. (Orhan vd., 2019)

Tambur elek analizi için yapılan bir çalışmada, görüntü analizi yaklaşımıyla bir kameranın önüne yerleştirilen küçük bir tambur eleğin pirinç ve mercimek tanelerini birbirinden ayırma işlemi incelenmiştir. Bu çalışmada pirinç ve mercimeğin karışımdaki miktarının sonuca doğrudan etki ettiği görülmüştür. Aynı zamanda elek devri arttıkça karıştırma başarısının artacağı öne sürülmüştür. Ancak bu çalışmada ilk inceleme 1 devir/dakika ile yapıldığı için, ilk artışlarda karıştırma verimi artsa da daha yüksek dönme hızlarında merkezkaç etkisiyle taneciklerin karışma oranı ve eleme verimi düşecektir. Bu çalışma deneysel bir çalışma olup, görüntü analizi tek açıdan çekimle yapıldığı için analiz ortamında aynı senaryoyu oluşturup çıkan görüntüyü 3 boyutlu olarak inceleyebilmek veya iki farklı açıdan görüntü alabilmek, daha sağlıklı sonuçlar alınmasını sağlayacaktır. (Islam vd., 2023)

1.bölümde bahsedilen esnek (elastik) elek yüzeyi bulunan Flip-Flow şeklindeki eleklerle ilgili yapılan bir çalışmada, anlık besleme miktarı ve parçacık boyutlarının etkisi incelenmiştir. Bu tip elekler, hem titreşim hareketiyle tahrik edilip hem de esnek yüzeylere sahip oldukları için, parçacıkların elek üzerinde yaptıkları hareketler de herhangi bir anda çeşitlidir; tüm eksenlerde öteleme veya dönme hareketi yapabilirler. Bu hareketlerin çeşitliliği, elek yüzeyinde "kaotik bölge" adı verilen bir bölgenin oluşmasına neden olmaktadır. Kaotik bölge dışında Akış Bölgesi ve Sabit Bölge adında iki farklı bölüm daha elek yüzeyinde bulunmaktadır. Kaotik bölgede elek yüzeyinin etkisiyle çeşitli öteleme ve dönme hareketleri yapan parçacıklar,

bölge dışından eleğe ulaşmaya çalışan parçacıklara engel olmaktadırlar. Bu nedenle besleme hacminin artırılmasının elekten geçerek elek altında biriken parçacıkların sayısını aynı oranda artırmadığı gözlenmiştir. Parçacık boyutu küçüldükçe de elek yüzeyine paralel hız artmakta, dik olan hız bileşeni azalmaktadır. (Zhao vd., 2023)

2.2.2. Aşınma Uygulamaları

Parçacıkların, yüzey üzerinde yaratacağı aşındırıcı etkinin incelenmesi, Ayrık Elemanlar Yöntemi ile yapılabilecek önemli bir çalışmadır. Bu sayede parçacık taşıyan/işleyen sistemlerde hangi konstrüktif elemanın güçlendirilmesi gerektiği önceden kestirilebilir ve aşınan elemanın ömrünün iyileştirilmesi mümkün olabilir.

Madencilik sektöründe, aşınan parçaların tadilatı veya değişimi için yılda ortalama 210 milyon Euro harcanmakta ve bu harcamalar bilgisayar destekli analizler ve simülasyon yöntemleri kullanılarak düşürülebilmektedir. Parçacıkların özelliklerinin, neden oldukları aşınmaya etkilerinin incelendiği bir çalışmada Yuvarlanma Direnci, Statik ve Dinamik Sürtünme Kuvvetleri ve Baskı Kuvvetinin etkileri incelenmiştir. Bu çalışmada kum tanecikleri, dışı kauçuk kaplı dönen bir çelik tamburun dışına nozüllerle enjekte edilmiş ve kauçuk kaplamanın aşınması gözlenmiştir. Enjekte edilen kum tanelerinin kauçuk ve ön yüklemeli çelik plaka arasında sıkışmasına izin verilerek kauçuk aşındırılmıştır. Bu çalışmanın sonucunda Yuvarlanma Direncinin, diğer parametrelere göre aşınma miktarında daha etkili olduğu tecrübe edilmiştir. Çünkü parçacıkların sıkıştığı durumda hareket devam ettiği için yuvarlanma eylemi güçleştikçe dinamik sürtünme kuvveti aşınmaya neden olur. (Katinas vd., 2021)

Bilyalı değirmen, tambur eleğin çalışma prensibinde fakat daha düşük çaplı ve daha yüksek hızda dönen silindirik bir geometridir. Malzemeyi taşıyıp belirli bir yükseklikten düşmesini sağlayarak parçacıkların yüzeyi aşındırmasını sağlar ve aşınma prosesleri için bir test ekipmanı niteliği taşır. Bilyalı değirmenin Rocky ile aşınma analizi yapıldığı başka bir çalışmada, parçacık dağılımının aşınma miktarına etkisi araştırılmıştır. Parçacık dağılımını incelemek için iki farklı boyuttaki parçacıkların (Ø10mm ve Ø20mm) farklı oranlarda karışımları oluşturularak hangi karışımın daha fazla aşındırdığı incelenmiştir. Tamamen küçük ve tamamen büyük

parçacıklardan oluşan yığına ek olarak, küçük ve büyük parçacıkların eşit sayıda ve eşit kütlede olduğu karışımlar da analizde incelenmiştir.

Oluşan aşınma miktarları küçükten büyüğe doğru sıralandığında en yüksek aşınma değeri, parçacık sayılarının eşit olduğu yığında alınmıştır. (Çapları arasındaki oranın 2 olduğu düşünülürse yığındaki parçacıkların eşit sayıda olması, küçük parçacıklarının kütlesel oranının yaklaşık %11 olması demektir.) Daha sonraki aşınma yalnızca büyük parçacıklardan oluşan yığında, bir sonraki küçük ve büyük parçacıkların kütlesel dağılımlarının eşit olduğu yığında ve en düşük aşınma da yalnızca küçük parçacıklardan oluşan yığında görülmüştür. Küçük parçacıkların oranı, oluşturdukları aşınma miktarına göre sıralanacak olursa; %11>%0>%50>%100 sıralaması ortaya çıkmaktadır. Büyük parçacıkların kütlesel dağılımdaki ağırlığı arttıkça aşınma miktarı artma eğilimi gösterse de, aynı kütlede küçük parçacıkların varlığının sebep olduğu yüzey alanı ve parçacık sayısı artışı, küçük parçacıkların hiç var olmadığı duruma göre daha fazla aşınmaya neden olmaktadır. (Yin vd., 2024)

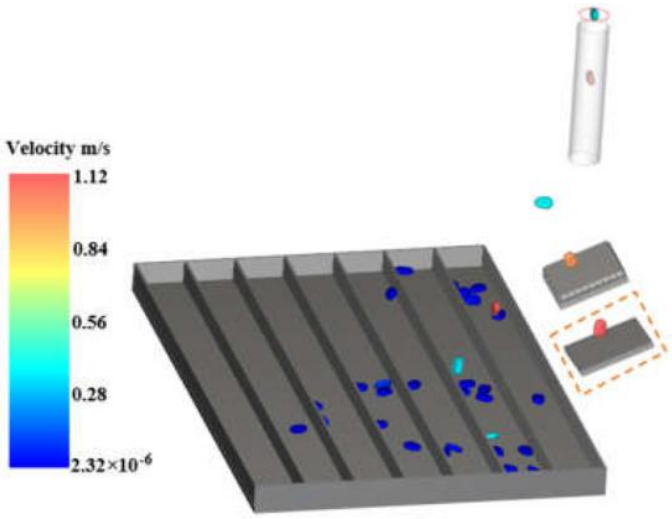
2.2.3. Doğrulama Uygulamaları

Ayrık Elemanlar Yöntemi, farklı boyut ve şekillerde katı ve fiber parçacıklar içeren durumlar analiz edilmek istendiğinde, analize girilecek parametrelerin deneyle doğrulanmak üzere simüle edilmesi için kullanılabilir.

Örneğin, analiz yazılımına tanımlanacak olan parametrelerin simülasyonunun yapılması ve deneylerle doğrulanması, bu çalışmada kullanılacak parametrelerin de önceki çalışmalarda benzer şekilde doğrulandığı düşünüldüğünde önemli bir imkandır. Geri Kazanım Faktörünün hesaplama, analiz ve deneyle doğrulanması ile ilgili çok sayıda çalışma mevcuttur.

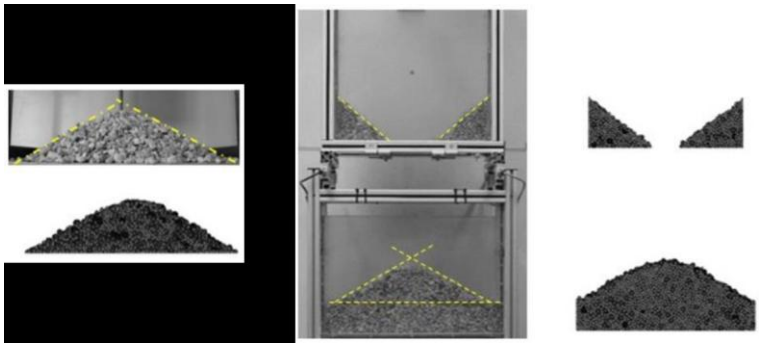
Şekil 2.5'te görülen Geri Kazanım Faktörü analizi, gerçekte kullanılan ölçüm düzeneğinin analiz ortamına aktarılmış halidir. Burada parçacıklar 45 derecelik bir plakaya çarptırılarak hazneye düşürülürler. Burada çarptıkları plaka ile düştükleri nokta arasındaki mesafeler ölçülür ve çarpma anında kaybettikleri momentum bulunur. Kaybedilen momentum veya hızdaki düşüş, ilk durumdaki hızdan çıkarılıp

bir oranlama yapıldığında Geri Kazanım Faktörü birimsiz olarak elde edilir. (Li vd., 2022)



Şekil 2.5 Geri kazanım faktörü analizi

Geri Kazanım Faktörünün analizle bulunması, parçacıklara ait parametreler arasında en sık görülen çalışmalardan biridir. Bunun haricinde parçacıkların Sürtünme, Kırılma ve Yığın açısı kalibrasyonlarının yapılması da daha önce kullanılmamış yığınlarla çalışırken önemlidir. Örneğin yığın açısı kalibrasyonu, parçacıkların kütleleri ölçüldükten sonra parçacıklar arası sürtünme katsayısının belirlenmesi için önemlidir. Şekil 2.6'da görüldüğü üzere, numune parçacıklar analiz koşullarına benzer şekilde bir mesafeden bırakılarak yığın oluşturması sağlanır ve tanımlanacak parametreler ile analiz ortamında da aynı açının elde edilmesi hedeflenir. (Duman, 2021)



Şekil 2.6 Yığın açısı kalibrasyonu

Bu çalışmada kullanılan ve 3. bölümde anlatılan şekilde, besleme yığınında parçacıklar arası boşlukların hesaplanması için Yığın Hacmi ölçümünün yapılması da bir Ayrık Elemanlar Analizi yazılımlarının başka bir kullanım yöntemidir. Burada izin verilen sıkışma değerinin deneysel olarak ölçülüp program ile kalibrasyonunun yapılması, aynı parametrelerin programa tanımlanmasında önemli rol oynar. Yığın hacminin değişmesinde rol oynayan diğer parçacık parametreleri, tanecik büyüklüğü ve şekli gibi değişkenlerdir. (Gelnar ve Zegzulka, 2019)

BÖLÜM ÜÇ
ANALİZ YÖNTEMİ

3.1 Yöntem

Günümüzde birçok makine gibi Mobil Eleme Ünitesi için de performansını artırmak için hedeflenen, makinanın görevini en iyi şekilde yapması ve bunu yaparken minimum enerji tüketiminde olmasıdır. Sistemin görevini tamamlama süresini kısaltmak da toplam enerji tüketimini azaltacak bir iyileştirmedir.

Bu çalışmanın ana hedefi, parametreleri değiştirilmiş elek tasarımları kullanarak benzer tanecik boyutlarındaki farklı malzemelerin optimum verimle elenmesi ve eleme süresinin kısaltılmasıdır.

Eleme operasyonuna ait verim ve kapasite ölçülürken, elek altına ve elek çıkışına yerleştirilecek sanal hacimler yardımıyla buradan geçen parçacıklar zamana bağlı olarak saydırılacak ve sonuçları incelenecektir.

Eleme süresinin kısaltılması, yapılan analizde eleme operasyonunun tamamlanma ve eleğin içindeki parçaların yeni yükleme yapılmaya hazır olacak miktarda bertaraf edilme süresinin incelenmesiyle ölçülecektir. Çünkü gerçek koşullarda yığının tamamının eleğin dışına atılması bir sonraki yükleme için beklenmez, partili besleme yapıldığında saha operatörlerinin takibiyle yükleme devam eder.

Eleme kapasitesi, sabit bir süre içinde elenen yığının hacmiyle ölçülür. Eleme kapasitesinin doğru şekilde ifade edilebilmesi için eleme performansının %100 değerde olması gerekmektedir. Çünkü tambur eleğin içinde elek üstü parçacıkların ilerlemesini sağlayan ve elek döndükçe onları ilerleten bir hatve bulunur. Eğer hatve adımı ve dönüş hızı, küçük parçaların ayıklanmasına izin vermeyecek kadar kısa sürede eleği boşaltıyorsa, elekte verim kaybı yaşanır.

Elekteki verim kaybı, ret tarafından çıkan küçük parçacıkların beslemedeki küçük taneciklere oranıyla ölçülür. Elek verimi 3.1 numaralı formül ile ifade edilebilir.

$$\%Verim = \% \left[1 - \frac{Ret}{Besleme}\right] \tag{3.1}$$

Bir yükleme hacmi için eleğin operasyonu tamamlama süresi, ilk yüklemeyle eleğin tekrar yüklenebileceği durum arasında geçen süredir. Bu süreyi etkileyecek iki farklı parametre, Eleme Süresi ve Bertaraf Süresidir. Eleme süresi, besleme hacmindeki küçük parçacık sayısının %85'inin elek altında toplandığı süredir. Bertaraf süresi ise, yükleme kütlesinin %90'ının analiz alanını terk ettiği süredir. Bu iki süre yardımıyla Yeniden Yükleme Süresi 3.2 numaralı formülle hesaplanır.

$$Y.Y.S. = \frac{E.S.+B.S.}{2} - 2 \tag{3.2}$$

Yeniden yükleme işleminin, halihazırda devam eden eleme operasyonunu olumsuz etkilememesi için parçacıkların çoğu elenmiş olsa da kalanların elek içinde çıkışa yaklaşmış olması gerekir. Aynı şekilde parçacıkların %90'ı çıktığında da eleme operasyonunun çoktan bittiği ve eleğin yalnızca elekten geçemeyen parçacıkları ilerletmek için döndüğü gözlenmiştir. Bu nedenle bu iki sürenin ortalaması alınır ve besleme anıyla parçacıkların eleğe ulaşması arasında geçen süre olarak ölçülen 2 saniye çıkarılarak Yeniden Yükleme Süresi hesaplanır.

Mutlak hacim, analizde girdi olarak besleme kütlesi kullanıldığı için bu kütlelerin kontrol edilerek belirlenmesiyle kontrol edilir. Ancak bu hacim, parçaların her birinin hacimlerinin toplamına eşit olacaktır. Fakat saha koşullarında yüklemeler bir yığının içinden kepçeyle yapıldığı için, kapasite bilgisinin de bir yığın hacmiyle ölçülmesi gerekecektir. Bu nedenle parçalar sabit hacimli bir geometrinin içine yığılarak içerdikleri boşluk miktarı görülecek ve yığın halindeyken sahip olduğu hacimle hesaplama yapılacaktır.

Besleme Yığın Hacmi ve verime bağlı olarak oluşan efektif kapasite, 3.3 numaralı formülle hesaplanacaktır.

$$E.K. = \frac{B.Y.H.}{Y.Y.S.}\ x\ Verim \tag{3.3}$$

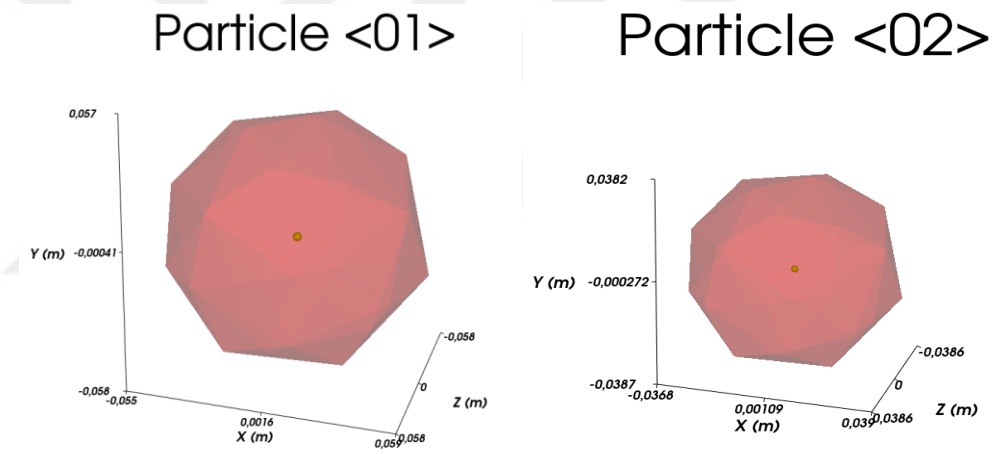
3.2 Girdilerin Belirlenmesi

3.2.1 Malzeme ve Parçacık Boyutlarının Belirlenmesi

Tambur elek analizinde, diğer tüm parametreler için belirleyici olan etken elenecek malzemedir. Elek delik boyutlarını tanımlayabilmek için parçacık

boyutlarını ve malzemenin temas parametreleri ve mekanik özelliklerini belirlemek gerekecektir. Bu özelliklerin etkisinde tanecikler, birbirleri ve eleğin yüzeyi arasında temas ve kayma kuvvetleriyle hareket edecektir.

Parçacıkların elek ölçüsü olarak 100mm delik ölçüsü referans alınmış ve bu delik ölçüsünden geçebilecek şekilde 80mm ve 120mm elek ölçüsüne sahip, Şekil 3.1'de görünümleri verilmiş biçimde parçacıklar oluşturulmuştur. Eleklerin delik ölçülerinin 100mm olarak seçilmesinin nedeni, analiz süresinin uzatılmaması ve gerçek uygulamalara yakın ölçüler kullanılmak istenmesidir. Tambur elek üreticileri, kullanıcı ihtiyacına göre delik ölçüsü belirlemekte, bununla ilgili bir standart ölçü kullanılmamaktadır. Tambur eleğin dış boyutları göz önünde bulundurulduğunda 100mm boyutunda delik kullanmak doğru bir yaklaşım olacaktır.



Şekil 3.1 Parçacıkların detaylı görünümü

Sürtünme kaybının doğru şekilde incelenebilmesi için tam küresel şekildeki parçacıklar kullanılmamış, en-boy oranı 1 olan polihedral parçacıklar kullanılmıştır. Kullanılacak malzeme ve eleme senaryosu düşünüldüğünde, yuvarlanma hareketi yapan düzgün yüzeyli küresel parçacıklar yerine bu şekilde taneciklerin incelenmesi daha uygundur.

Malzeme seçimi yapılırken, tambur eleğin kullanılabileceği uygulamalar ve analize tanımlanmış parametrelerin önceki çalışmalarda kullanılmış ve doğrulanmış parametreler olmasına öncelik verilmiştir.

Bu nedenle eleme senaryosu için, madencilik sektöründe de karşılaşılabilecek uygulamalardan biri olan, kırıcı öncesi eleme işlemi analiz edilmiştir. Bu oluşturulan senaryoya göre elek boyutu 100mm'den büyük ve küçük olan parçalar eleme operasyonu ile ayrıştırılacaktır. Analize tanımlanan malzeme özellikleri aşağıdaki tabloda verilmiştir. (Andre ve Tavares, 2020) Yığın malzemesine dair programa tanımlanan parametreler Tablo 3.1'de verilmiştir.

Tablo 3.1 Programa tanımlanan malzeme özellikleri

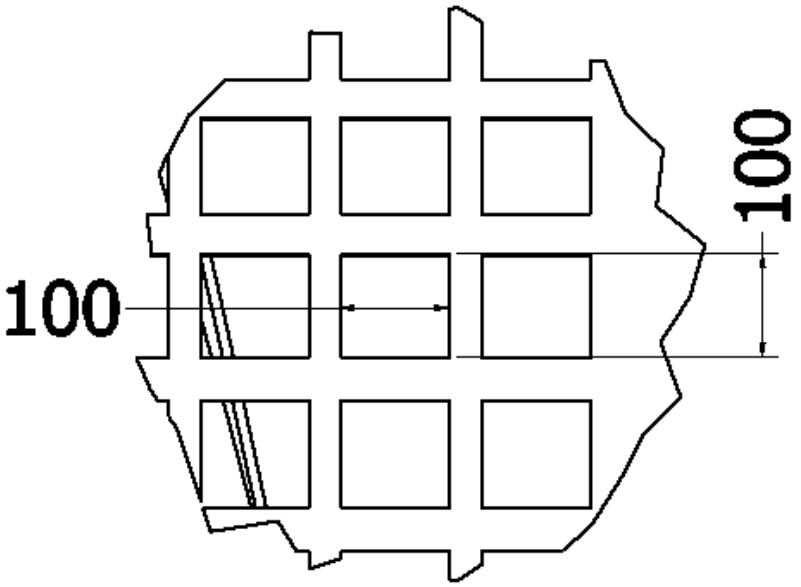
Özellik	Değer	Birim
Yoğunluk	2930	kg/m^3
Geri Kazanım Faktörü (parçacıklar arası)	0.3	-
Geri Kazanım Faktörü (parçacık-duvar arası)	0.3	-
Statik Sürtünme Katsayısı (parçacıklar arası)	0.8	-
Statik Sürtünme Katsayısı (parçacık-duvar arası)	0.5	-
Dinamik Sürtünme Katsayısı (parçacıklar arası)	0.8	-
Dinamik Sürtünme Katsayısı (parçacık-duvar arası)	0.5	-
Poisson Oranı	0.36	-
Young Modülü	$1.25x10^8$	N/m^2

3.2.2 Eleklerin Modellenmesi

Elekler, AutoDesk Inventor CAD programı yardımıyla 3B olarak modellenmiş ve bu modeller analiz programında kullanılmıştır. Elekler modellenirken, ilk bölümde anlatılan ve üreticiler tarafından kabul gören dış ölçüler sabit tutulmuş, deliklerin şekilleri ve hatve geometrisi üzerinde değişiklikler analizde etkileri incelenmek üzere yapılmıştır. Delik şekilleri belirlenirken birim delik alanı ve toplam delik alanları hesaplanarak en uygun şekilde dizilim yapılmış ve bu toplam delik alanı sabit tutulmuştur.

Referans olarak belirlenen ELEK1, 100mm kenar uzunluğunda kare deliklere ve 1200mm hatve adımı ölçüsüne sahiptir. Tanımlamalar yapılıp sonuçlar incelenirken eleğin numarası delik tipine göre ve hatve adım ölçüsü de devamındaki "H" ölçüsü ile belirtilecektir.

Şekil 3.2'de delik detayı gösterilen kare delikli elek tasarlanırken genel ölçülere uygun şekilde dizilim yapılmış ve delik sayısı ortaya çıkarılmıştır. Delik sayısı, birim delik alanı ile çarpılmış ve toplam delik alanı bulunmuştur.



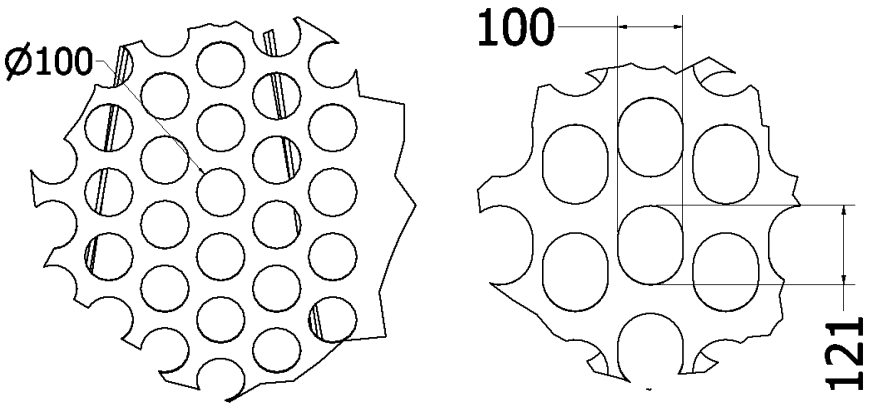
Şekil 3.2 Kare delikli eleğe ait delik ölçüleri ve dizilimleri

Diğer eleklerin tasarımı yapılırken deliklerin minimum ölçülerinin ve toplam delik alanının korunması esas alınmıştır. Delik geometrileri ve sayılarının belirlenmesinde kullanılan parametreler Tablo 3.2'de bulunmaktadır.

Tablo 3.2 Delik geometrileri ve sayılarının belirlenmesi

Elek İsmi	Delik Geometrisi	Ölçüler [mm]	Yörünge Adet	Eksen Adet	Delik Adeti	Delik Alanı [mm2]
ELEK1	Kare	100x100	40	30	1200	$12x10^6$
ELEK2	Dairesel	Ø100	42	36	1512	$11,9x10^6$
ELEK3	Slot	100x121,5	34	35	1190	$11,9x10^6$

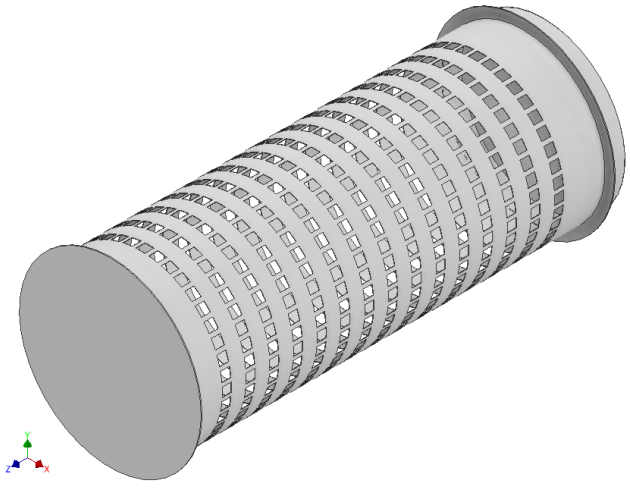
Yörüngedeki delik adeti, delikler elek yüzeyinde dönme ekseni tarafında çoğaltılarak elde edilmiştir. Eksendeki delik adeti ise elek boyunca deliklerin çoğaltılması ile elde edilir. Yörüngedeki sayı için kısıtlayıcı faktör eleğin iç çevresi ve eksendeki adet için de eleğin boyudur. Toplam delik sayısı, bu sayılardan birine bölündüğünde diğer sayı küsuratlı çıktığı için bu küsurat tam sayıya yuvarlandığında toplam alanlarda bir miktar fark oluşmuştur. Dairesel ve slotlu deliklerin detaylı görünümleri Şekil 3.3'te verilmiştir.



Şekil 3.3 Dairesel ve slot delikli eleklere ait delik ölçüleri ve dizilimleri

3.2.3 Elek Dönme Hızının Belirlenmesi

Tambur elek kendi ekseni etrafında dönme hareketi yaparken, içinde parçacıkların ilk bölümde anlatılan dökülme hareketini yapıyor olması gerekir. Farklı malzemeler ve tanecik boyutları için sınır yüzey-parçacık arasındaki sürtünme katsayısı ve özkütlesi farklı olacağı için, parçacığın merkezcil kuvvet etkisiyle elek çeperinde kalacağı devir/dakika hızı da farklı olacaktır. Bu nedenle malzeme belirlendiğinde farklı eleklerin denenmesinden önce parçacıkların bu hareketi yapacağı hızın tespit edilerek başlanması gerekecektir.

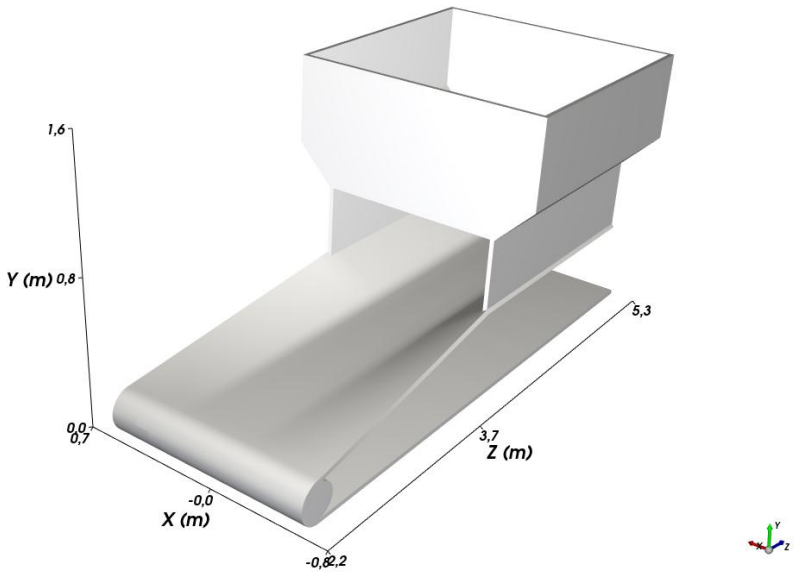


Şekil 3.4 Deliklerinin yarısı kapalı olarak tasarlanmış “Hız Belirleme Eleği”

Parçacıkların yapacağı hareketi incelerken dönme hızını isabetli bir şekilde belirleyebilmek için eleme prosesindeki gibi parçacıkların eksilmesi yavaşlatılarak bu gözlemi yapabilmek gerekir. Bu nedenle Şekil 3.4'te gösterilen şekilde bir "Hız Belirleme Eleği" tasarlanmalıdır. Hız Belirleme Eleği, standart kare delikli eleğin deliklerinin tamamen kapatılarak parçacıkların çıkmasını engellemelidir. Aynı zamanda hatve de tamamen kaldırılarak parçacıkların elek içinde eksenel yönde ilerlemesi önlenmiştir. Parçacıkların eleğin içinde merkeze yakın bir noktada oluşturulması ve eleğin içine homojen olarak dağılması hedeflenmiştir.

3.2.4 Eleme Sisteminin Oluşturulması

Mobil Eleme Ünitesi'nde yüklemenin bir kepçe ile yapıldığı besleme bunkeri bulunur. Bu bunker, altındaki Besleme Bandı ile yığını eleğin içine taşır. Besleme Bandı, düşük besleme hızlarında da kullanılabilmesi ve taşıdığı yığını eleğin içine düşürebilmesi için eleğin girişinden daha içeride konumlandırılır. Hatta bazı durumlarda yığının eleğe temasını artırmak için orta eksenden kaçık veya farklı bir yönlendirmeye malzemeyi dökebilir. Burada amaçlanan da malzemenin elekle daha uzun süre etkileşimde olmasıdır. Bunker ve besleme bandı Rocky analiz ortamında Şekil 3.5'teki gösterilen ölçülerde kullanılmıştır.



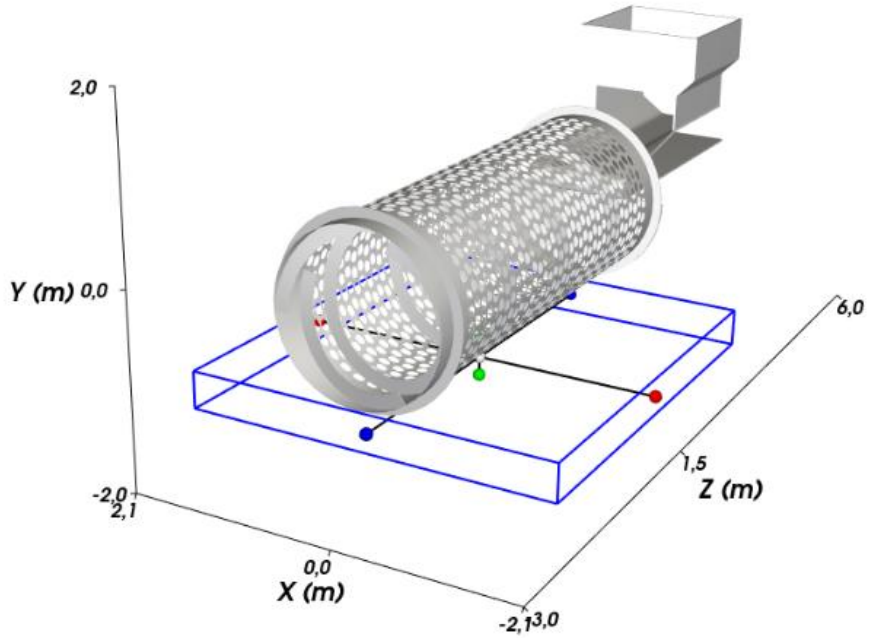
Şekil 3.5 Besleme konveyörünün detaylı görünümü

Analizde kullanılacak eleme sisteminin oluşturulması için, Rocky yazılımında bulunan hazır besleme konveyörü kullanılmıştır. Konveyöre ait özellikler Tablo 3.3 üzerinde görülmektedir.

Tablo 3.3 Besleme konveyörüne ait önemli parametreler

Özellikler	Değerler
Bant Genişliği	1200 mm
Tambur Çapı	200 mm
Besleme Bandı Hızı	1,5 m/s
Hazne Boyutları (en x boy x yükseklik)	1,5x1,5x0,5 metre
Besleme Süresi	10 saniye

Besleme bandının çıkışı, eleğin merkezinden 0,15 metre yukarıda olacak şekilde ortada konumlandırılmış, bant genişliği de bu mesafeye göre ayarlanarak gerçekle benzer bir sistem oluşturulması hedeflenmiştir. Besleme sistemiyle ilgili parametreler detaylı olarak tabloda verilmiştir. Analizler boyunca toplam besleme hacmi değişikliği, kütlesel debi artırılıp azaltılarak kontrol edilmiş, besleme süresi sabit tutulmuştur. Çünkü malzeme bant üzerinde dökülmeden taşınabildiği sürece, bir bunker dolusu malzemenin eleğin içine taşınması, bandın dönüş hızına bağlıdır.

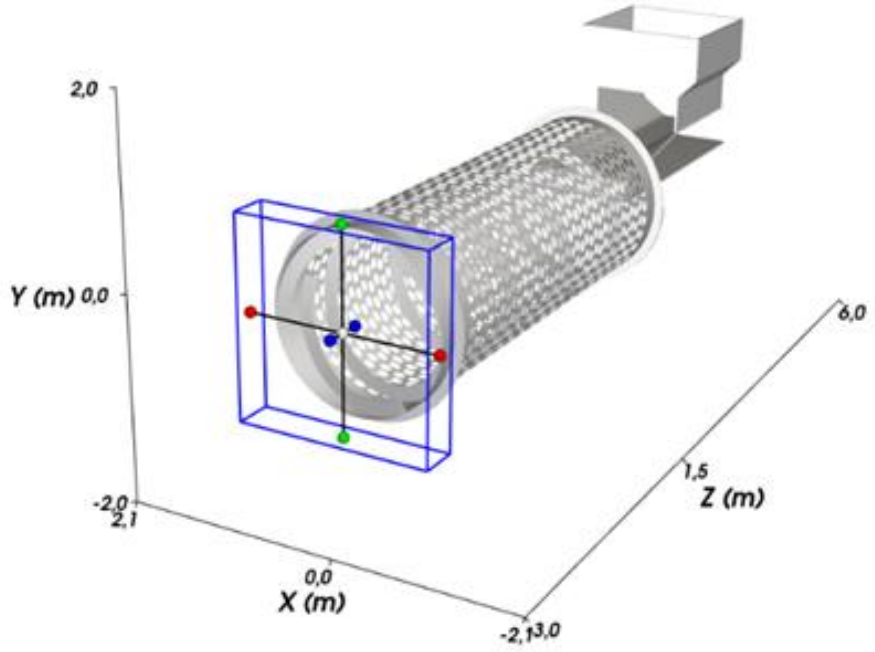


Şekil 3.6 Elek altı hacminin analiz sisteminde tanımlandığı bölge

Elek Altı ve Çıkış Bantları yerine sanal hacimler ile malzemenin sayılması sağlanmıştır. Bu sanal hacimler Şekil 3.6 ve Şekil 3.7'de gösterilmiştir. Çünkü verimlilik ve kapasite elek özelinde inceleneceği için parçacıkların elekten çıkınca analiz alanında kalmaması gerekir. Parçacıkları analiz alanında bırakmak, yığın halindeki parçacıkların temas kuvvetleri anlık olarak hesaplanmaya devam edeceği için çözüm süresini uzatacaktır.

Elek altındaki sanal hacmin elek genişliğinden daha büyük olmasının nedeni, merkezkaç kuvvetinin etkisiyle yanlara doğru saçılan parçacıkların da hacimden geçerek saydırılmasını sağlamaktır. Gerçek koşullarda da tambur eleğin büyük bir bölümü makinanın giydirme saclarının içinde kaldığı için, parçacıklar dönme etkisiyle yanlara saçılsa da giydirme içlerine çarpar ve elek altındaki bantta toplanması sağlanır.

Çıkış hacmi olarak tanımlanan bölge ise, eleğin içine gönderilen parçacıklardan elenemeyecek kadar büyük boyutta olanların geçmesi gereken bölümdür. Ancak eleğin performansına ve yükleme miktarına da bağlı olarak küçük taneli parçacıkların bir kısmı da elek deliklerinden geçemeden çıkışa ulaşacaktır.



Şekil 3.7 Çıkış hacminin analiz sisteminde tanımlandığı bölge

Verim hesaplaması yapmak için çıkış hacminden alınacak sayılar önemlidir. Burada küçük parçacıklar saydırılacak ve bu yüzeydeki küçük parçacıkların analiz boyunca miktarı görülecektir. Başka bir deyişle eleğin ne kadar küçük malzemeyi eleyemeden "kaçırdığı" önemli olacaktır.

Yeniden Yükleme Süresinin hesaplanması için gerekli olan sürelerden Eleme Süresi, elek altındaki hacimden geçen parçacık sayısıyla bulunacaktır. Buradan büyük parçacık çıkma ihtimali olmadığı için, programda bu yüzey için boyut filtrelemesi yapmaya gerek olmayacaktır. Bertaraf Süresi ise, fotoğraflardaki eksen takımında görülen analiz alanı içinde bulunan parçacıkların toplam kütlesi ile bulunacaktır. Eleğin içinden (elek altı veya çıkış tarafından) çıkan parçacık hemen sonra analiz alanını da terk ettiği için, analiz alanı bu veriyi almak için kullanılabilecektir.

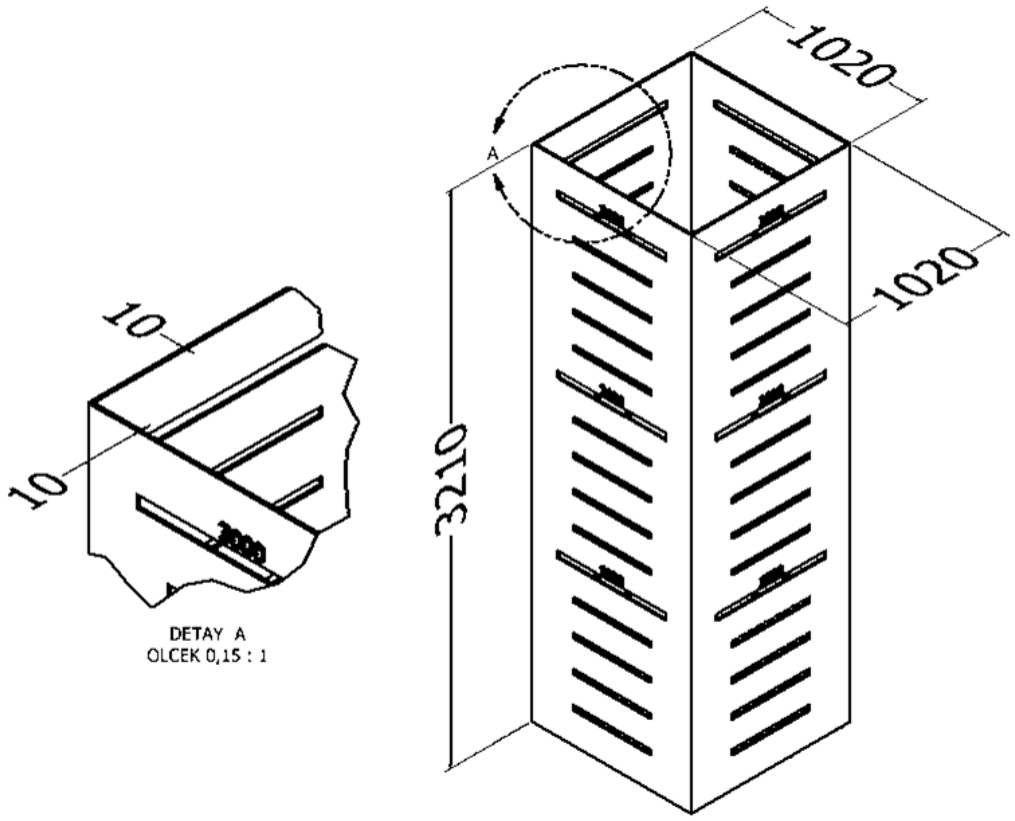
Geometriler oluşturulurken, beslenen malzemenin eleğin içinde yığılarak besleme yapılan yöne doğru dökülmesi ve eleğin dışına çıkmasını önlemek için besleme bandının altından başlayacak şekilde sabit bir kapak da sisteme eklenmiştir.

3.2.5 Yığın Hacminin Ölçülmesi

Bir eleme sistemi ile ilgili kapasite tanımlanacağı zaman, malzemenin bir yığın içinden kepçeli bir iş makinası yardımıyla yüklendiği de hesaba katıldığı zaman, hacimle tanımlama yapılabilir.

Analiz programına kütle giriş hızı kg/s cinsinden tanımlanması ve yükleme miktarındaki değişimin hacmin izlenmesi yoluyla yapılması nedeniyle, yığın hacminin ayrıca ölçülmesi veya hesaplanması gerekmektedir. Yığın hacmi, parçacıkların arasındaki boşluklarla birlikte oluşan toplam hacimdir.

Bu ölçümün yapılabilmesi için taban yüzeyi 1 m^2 olan bir geometri oluşturulmalı ve içine önceden belirlenen mutlak hacimde malzeme eklenerek yüksekliği ölçülmelidir. Yüksekliği görsel olarak gözlemlemek için üzerinde çizgi şeklinde delikler oluşturulsa da Rocky, malzemelerin düşey koordinatlarını gösterecek ve yükseklikler y koordinat değeri olarak program üzerinde okunabilecektir. Ölçüm için modellenen haznenin genel görünümü Şekil 3.8'de gösterilmiştir.



Şekil 3.8 Yığın Hacminin ölçülmesi için tasarlanan geometri

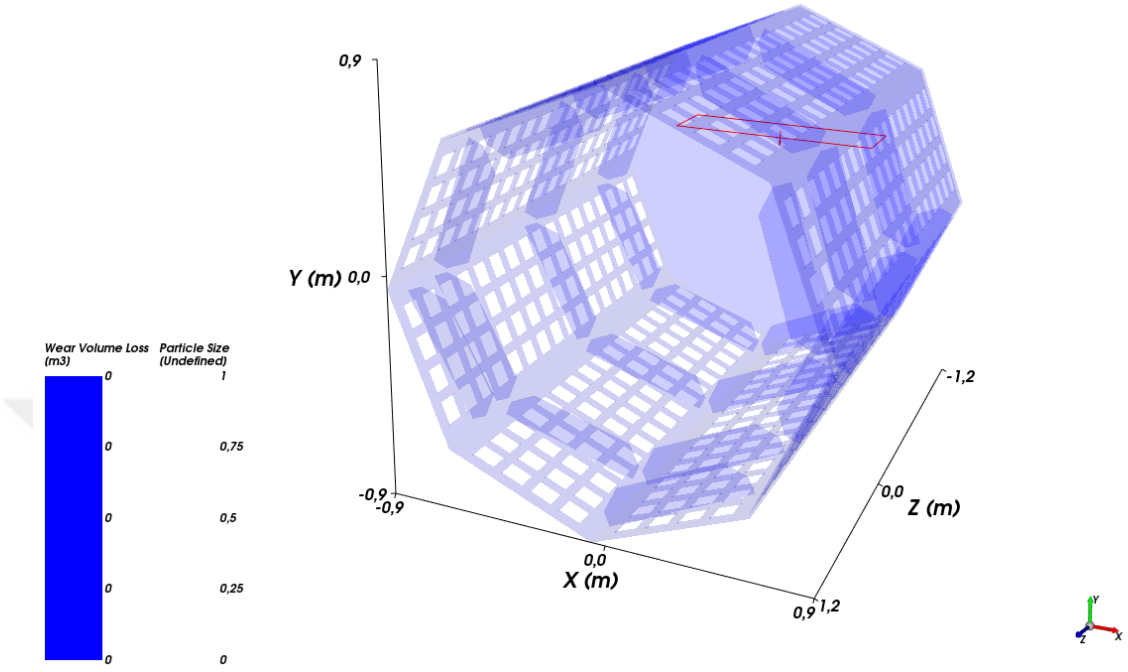
3.2.6 Aşınma Eleğinin Oluşturulması

Rocky programında, parçacıkların geometriler üzerinde oluşturduğu yüzey aşınmaları gözlenebilir. Özellikle sabit geometrilerin içinde gözlenen parçacık akışlarında bu özelliği kullanmak hangi bölgenin güçlendirilmesi gerekeceğini önceden tespit etmek için faydalı olacaktır.

Bu çalışmada, aşınma verilerinin parçacık analizi esnasında toplanması hedeflenmiştir. Ancak program, eğri yüzeyler üzerinde aşınmayı hızlı bir şekilde gerçekleştiremediği için farklı bir yol izlenmiştir.

Analiz programının düz yüzey üzerinde aşınma deformasyonlarını daha hızlı olarak oluşturmasını sağlamak için dairesel olan elek geometrisi bir sekizgen formunda ve helis şeklinde olan hatve sacları düz sac formunda tekrar modellenerek aşınma elekleri oluşturulmuştur. Aynı basitleştirme amacıyla aşınma elekleri tek delik tipi baz alınarak Şekil 3.9'da gösterilen geometride oluşturulmuş ve hepsi kare

delikli olarak tasarlanmıştır. Yalnızca hatve adımı ölçüsü değiştirilecek, delik tasarımının aşınmaya etkisi incelenmeyecektir.



Şekil 3.9 Aşınma eleğinin genel görünümü

Aşınma girdi parametresi olarak Hacim-Aşınma İşi Oranı değeri $1x10^{-6}$ m^3/J olarak programa tanımlanmıştır. Aşınma modeli olarak literatür bölümünde açıklanan Archard Modeli kullanılmıştır.

Analiz sonucuyla alınan maksimum aşınma kaybı verisi, referans değerler ile oranlanarak Aşınma Çarpanı elde edilecektir. Efektif kapasite değerleri, ilgili koşuldaki bu parametre ile bölündüğündeyse birbiriyle kıyaslamalı olarak "Efektif $Kapasite_{Ömür}$" değeri ortaya çıkacaktır.

Burada inceleme konusu, aşınmaya dayalı ömür olduğu için aşınma miktarı ve ömrün ters orantılı olduğu kabulüyle bu formülasyon yapılmış ve çalışmada optimum tasarım ve yükleme koşullarını belirlemek için kullanılmıştır. Ömür etkisindeki Efektif Kapasite, 3.4 numaralı formül ile hesaplanır. Hesaplanan bu çıktı aynı zamanda çalışmanın sonucunu belirleyen parametre olacaktır.

$$Efektif\ Kapasite_{Ömür} = \frac{E.K.}{A.Ç.} \quad (3.4)$$

3.3 Değişken Parametreler

3.3.1. Elekler

Önceki bölümde bahsedilen girdiler kullanılarak incelenecek ilk değişken elek farklı elek tasarımlarının göstereceği performanstır. Aşınma dışındaki her parametrede, elekler denenerek verimleri ve kapasiteleri hesaplanacaktır.

Analizlerde kullanılacak elekler, önceki bölümde özellikleri tablo halinde verilen kare, dairesel ve slot tipi deliklere sahip üç elek olacaktır. Çıkan sonuçlara göre iyileştirmeler bu elekler üzerinde yapılarak iyileştirilmiş elekler de analiz edilecektir.

3.3.2. Besleme Hacmi

Hedeflenen hacim, malzeme yoğunluğu ile çarpılıp besleme süresine bölünerek kütlesel debi elde edilir ve analize parçacık giriş miktarı olarak tanımlanacaktır. Hedeflenen mutlak hacim değiştikçe bu kontrol kütlesel debinin aynı oranlarda artırılıp azaltılması ile elde edilecektir.

Analiz boyunca 0,5 m^3 ve 3 m^3 mutlak hacmi aralığında 0,25 m^3 artışla besleme yapılarak bu hacmin kapasite ve verime etkisi incelenecektir. Aşınmaların besleme hacmiyle aynı çarpanla artıp artmadığını test etmek için aşınma elekleri de verim analizlerinde kullanılan parçacıkların yarı hacmiyle test edilip sonuçlar incelenecektir.

3.3.3. Parçacıkların Kütlesel Oranı

Parçacık boyutları belirlenirken 80mm ve 120mm çaplarında iki adet parçacık kullanılacağından bahsedilmişti. Besleme hacminin değişken olduğu analizlerde bu iki farklı boyuttaki parçacıkların kütlesel olarak eşit miktarda olduğu sonuçlar alınacaktır. Ancak parçacıkların kütlesel dağılımının etkisini görmek için küçük boyuttaki parçacıkların toplam kütleye oranı değiştirilerek toplam kütlenin %30, %40, %50, %60 ve %70 miktarlarını küçük parçacıklar oluşturduğunda sonuçların nasıl etkilendiği görülecektir.

Küçük parçacıkların oranı değiştirildiğinde parçacıklar arasında kalan doldurulamayan boşluk miktarları da değişeceği için yığın hacimleri de değişecektir. Bu nedenle yığın hacminin ölçüldüğü analizin de bu değişken oranlarda besleme ile tekrarlanması gerekecektir. Parçacık dağılımının aşınmaya etkisi de aynı şekilde incelenecektir.

Bir malzeme için eleme sistemi tasarlanacağı zaman, malzemenin mekanik özelliklerine hakim olmak kadar, parçacıkların boyutları ve bu boyutların kütlesel veya sayısal dağılımına da hakim olmak gerekmektedir. Bu amaçla prosesler tasarlanırken, prosesten sürekli geçecek malzemeden numune alınması ve boyutsal analizinin de yapılması gerekmektedir.

3.3.4. İyileştirmeler

Yapılan analizler sonucunda alınan sonuçlarla verim ve kapasite hesaplanarak hangi koşullarda iyileştirme yapmak gerektiği ve bu iyileştirmelerin neler olacağı tartışılarak iyileştirilmiş elekler de analiz edilecektir. Bu iyileştirme parçacıkların kütlesel dağılımının eşit olduğu koşullarda besleme hacim aralığında 0,5 m^3 artışlar ile analiz edilecek ve sonuçları tartışılacaktır.

İyileştirme, eleğin tasarımı değiştirilerek hatve adım ölçüsünde değişiklik yapmak olacaktır. Çıkan sonuçlara göre seçilen eleklerde hatve adım ölçüsü değiştirilerek eleğin verimini veya yükleme süresi azaltılmak amaçlanacaktır. Bu nedenle aşınma eleğinin de hatvesi değiştirilerek yapılan iyileştirmenin aşınmaya olan etkisi incelenecektir.

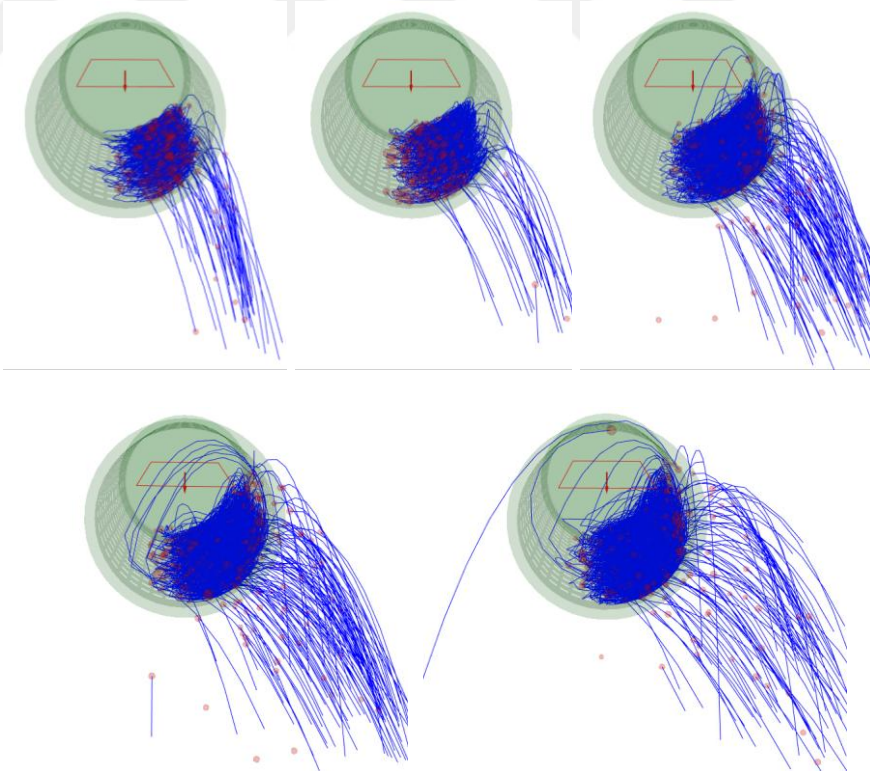
BÖLÜM DÖRT
ANALİZLER VE SONUÇLAR

4.1 Başlangıç Analizleri

4.1.1 Elek Hızı

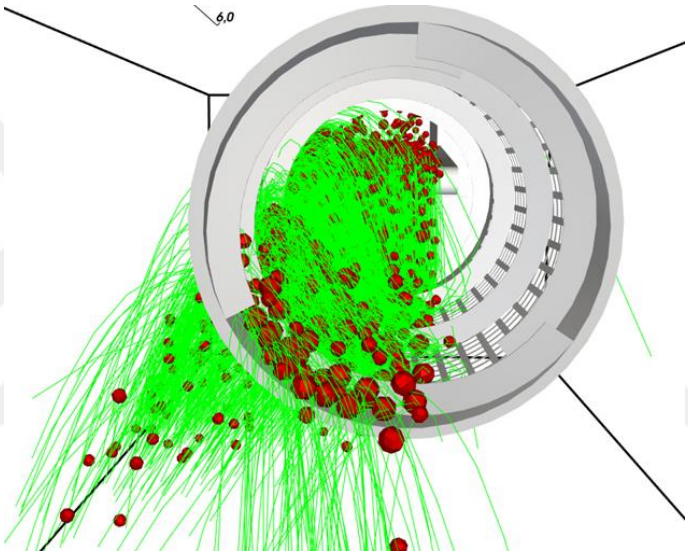
Önceki bölümlerde öneminden bahsedilen Elek Dönme hızının devir/dakika cinsinden belirlenmesi için yüzeyleri kapalı olan Hız Belirleme Eleği içine sanal bir yüzey tanımlanarak parçacıkların girişi sağlanmış ve elek farklı hızlarda döndürülerek parçacıkların hareketleri gözlenmiştir.

Hedeflenen görüntü, Bölüm 1.4'teki görsellerde gösterilen şekilde, parçacıkların duvarda merkez hizasını geçkin bir noktaya kadar tırmanıp elek iç duvarından ayrılışını görmektir. Elenen parçacıkların da elek altındaki banda ulaşabileceği noktalardan eleği terk etmesi gerekir. Bu şekilde farklı hızlarda yapılan analizlerde aşağıdaki Şekil 4.1'deki görüntüler elde edilmiştir.



Şekil 4.1 Sırasıyla üstte 15,20 ve 25; altta 30 ve 35 devir/dakika hızlarda parçacıkların hareketleri

Görüntüler incelendiğinde, ideal devir hızının 25 veya 30 devir/dakika olduğu gözlenmektedir. Çünkü ilk iki hız değerinde, parçacıkların yığın halinde kaldığı ve yeterli yer değişikliği sağlanamadığı için deliklerden geçemediği görülmektedir. 35 devir/dakika hızda ise parçacıklar merkezkaç kuvveti etkisiyle elek duvarında kaldığı görülmüştür. Bu nedenle 25 ve 30 devir/dakika hızlar denenmiş, parçacık hareketleri ve bölgesel yoğunlukları incelenip literatürde benzer çalışmaya uygun olduğu gözlemlenerek 25 devir/dakika dönme hızıyla devam edilmesi uygun bulunmuştur. (Moodley ve Govender, 2022) 25 devir/dakika elek hızı uygulandığında parçacıklar, analiz koşullarında Şekil 1.2'deki gibi bir akış oluşturmaktadır.



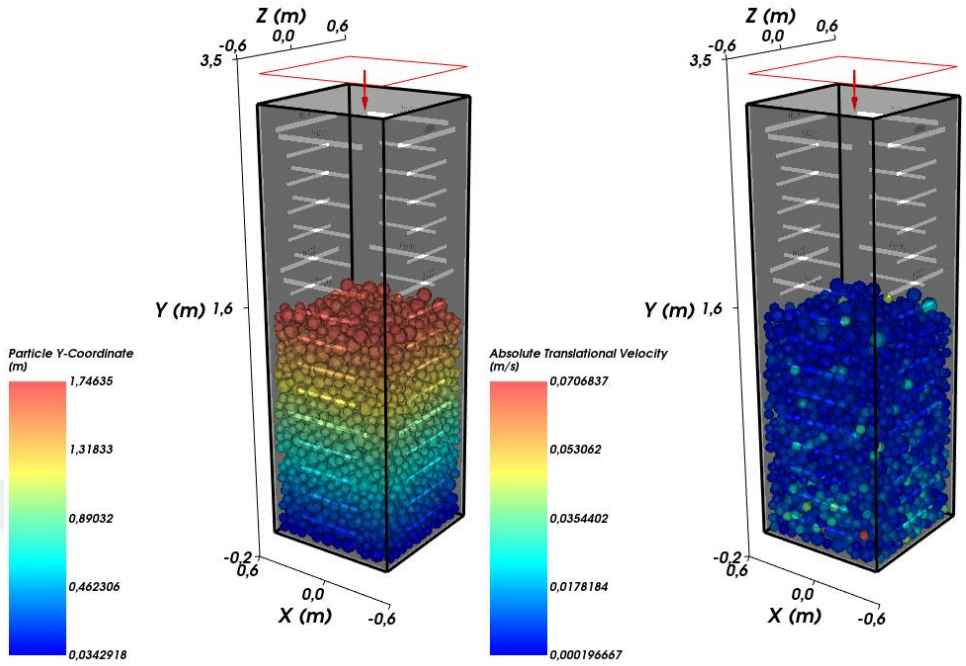
Şekil 4.2 25 devir/dakika hızda analiz koşullarında parçacıkların hareketleri

Hız testlerinde ve analiz koşullarında meydana gelen farklılıkların nedeni, parçacık miktarıdır. Çok sayıda parçacığın aynı anda dönme hareketinin etkisine girmesi ve bu esnada birbirleriyle daha çok etkileşimde bulunması, izlediği yollarda değişiklik olması anlamına gelir. Besleme miktarı gerçek koşullarda yapıldığında parçacıkların kontrolsüz hareketini önlemek için düşük olan hız seçilmelidir.

4.1.2 Yığın Hacmi

Katı parçacıklar şekli belirli bir geometrinin içine doldurulduklarında, parçacıklar arasında boşluk oluşur. Sahada yüklemeler kepçe gibi iş makinalarıyla, yani sabit bir kütleyle değil sabit bir hacimle yapılır. Bu nedenle yığın hacminin farklı parçacık

dağılımlarında ölçülüp bir yığın hacmi hesaplanmalı ve bulunan bu sonuç kapasite hesabı yapılırken kullanılmalıdır.



Şekil 4.3 Küçük ve büyük parçacıkların eşit olduğu 1 m^3 mutlak hacimde yığın hacmi ölçülmesi

Şekil 4.3'te görülen kırmızı yüzeyden toplam tanecik hacimleri 1 metreküp olacak şekilde besleme yapılmış ve parçacıklar tabana ulaşıp hızları 0,1 m/s değerinin altına düşünceye kadar analiz sürdürülmüştür. Analizi yapılacak tüm kütle dağılımları için bu ölçüm yapılmıştır. 1 metrekare olan iç taban alanı üzerinde biriken parçacıkların program üzerinden okunan y koordinat değeri, metreküp cinsinden yığın hacmini ifade eder. Farklı kütle dağılımları için ölçülen yığın hacimleri Tablo 4.1'de görülmektedir.

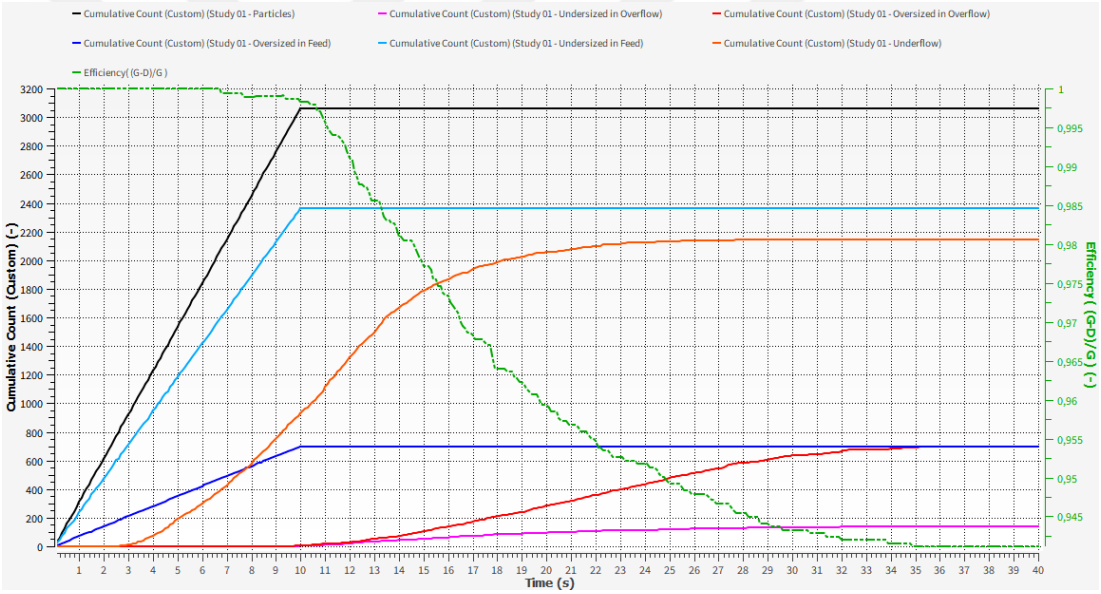
Tablo 4.1 Yığındaki parçacıkların kütlesel dağılımları için ölçülen yığın hacimleri

Besleme Hacmi [m^3]	Küçük Parçacıkların Kütlesi [%]	Yığın Hacmi [m^3]
1	70	1,72801
1	60	1,73869
1	50	1,74635
1	40	1,76363
1	30	1,78560

Tabloda görüldüğü gibi, küçük parçacıkların daha fazla oluşu, boşlukların daha iyi şekilde doldurulacağı anlamına gelir; küçük parçacıkların kütlesinin yüzdesi azaldıkça yığının toplam hacmi artar.

4.2 Eleme Analizleri

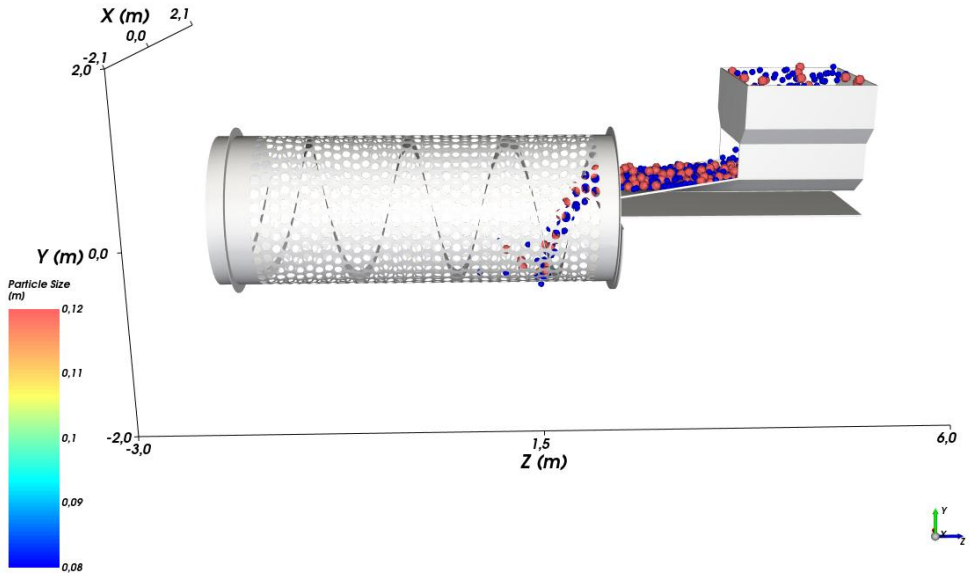
0,5 metreküpten başlayan ve 0,5 metreküplük artışlarla 2,5 metreküp mutlak hacme kadar, ardından da 3 metreküplük mutlak besleme hacmiyle, önceki bölümde bahsedilen senaryoların analizleri 3 farklı elek tipi için yapılmıştır. Analiz çıktılarında kümülatif parçacık sayıları ve kütleleri kullanılarak verim, eleme süresi, bertaraf süresi ve yeniden yükleme süreleri verileri toplanıp hesaplanmıştır. Bu verilerin toplanması için kullanılan grafiklerden bir adet örnek Şekil 4.4'teki gibidir:



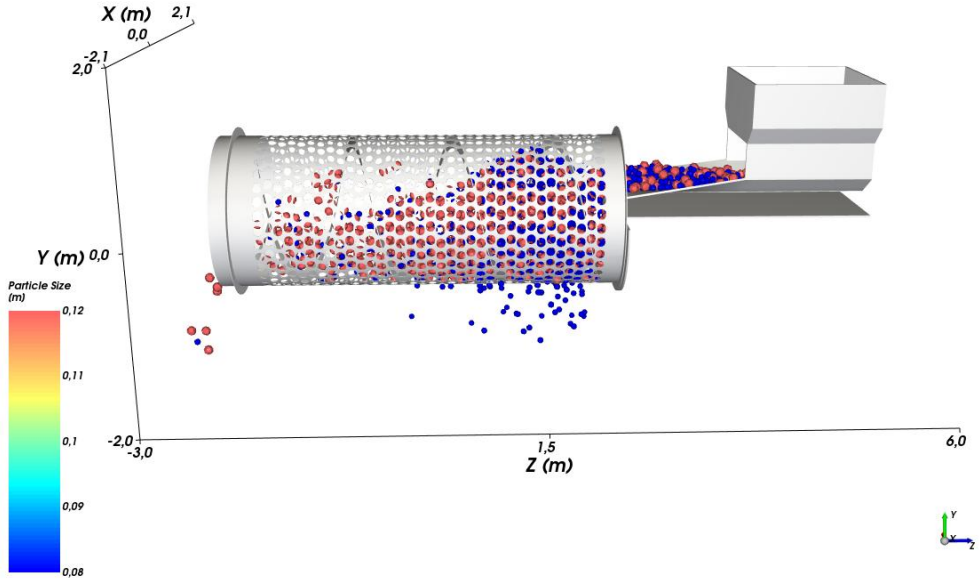
Şekil 4.4 1 metreküp besleme hacminde Elek1'in parçacık sayısı grafiği

Grafikteki yeşil kesikli çizgi, eleğin verimini göstermektedir. Çıkış (ret) hacminden küçük parçacıklar geçene kadar verimin %100 olup daha sonra düşmeye başladığı ve eleme işlemi bitene kadar da düştüğü görülmektedir. Siyah çizgi beslenen toplam parçacık sayısını, açık mavi küçük parçacık sayısını ve lacivert renk büyük parçacık sayısını göstermektedir. Turuncu renk elek altında toplanan küçük parçacık sayısını, kırmızı renk de çıkıştan geçen büyük parçacıkları göstermektedir. Pembe renkli çizgiler de çıkıştan geçen ve verimin düşmesine neden olan küçük

parçacıklardır. Bu grafik ve grafiğin oluşturulduğu tablo yardımıyla, önceki bölümde de bahsedilen yöntemle, küçük parçacıkların %85'inin elek altında toplandığı süre Eleme Süresi ve eleğin kaçırmadığı küçük parçacıkların beslemedeki küçük parçacıklara oranıyla Verim bilgisi alınmıştır.

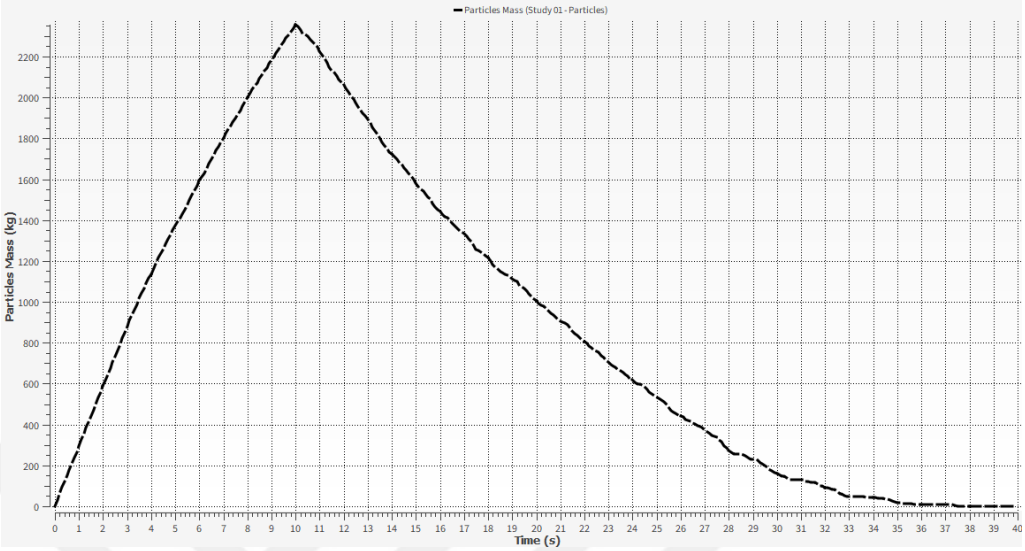


Şekil 4.5 Konveyördeki malzemelerin eleğe ulaşması (2,5 saniye sonra)



Şekil 4.6 Besleme biterken eleğin durumu (11 saniye sonra)

Besleme konveyörü, elek ve sanal yüzeylerden oluşan analiz alanının farklı saniyelerdeki örnek görünüşü, Şekil 4.5 ve Şekil 4.6'da verilmiştir.



Şekil 4.7 1 metreküp besleme hacminde Elek1'in anlık kütle grafiği

Şekil 4.7'deki grafikte siyah kesikli çizgi, analiz ortamındaki anlık toplam kütlenin kilogram cinsinden değerini ifade etmektedir. Yoğunluğu 2930 kg/m3 olan parçacıkların 1 metreküp mutlak hacimle 2930 kg besleme yapıldığı anlamına gelir. Ancak grafik incelendiğinde ilk iki saniye lineer ilerleyiş ve sonrasında parçacıklar eleğe ulaşıp ayrılmaya başladıktan sonra eğriye dönüşerek 2930 kilograma ulaşmadığı görülür. 10 saniyenin sonunda besleme bitmiş ve azalan düşüş analiz sonunda kadar devam etmektedir. Toplam besleme ağırlığının %90'ı analiz alanından çıktığı süre Bertaraf Süresi verisi olarak alınır.

Örnek olarak paylaşılan bu grafikler, tüm besleme koşulları ve analizler için toplanmış ve önceki bölümde bahsedilen şekilde hesaplanarak tablolar oluşturulmuştur. Bu verilere göre oluşturulan tablolar eklenmiştir.

4.2.1 Besleme Hacmi Değişkeni

0,5-3 metreküp mutlak hacimli besleme aralığında 3 elek tasarımı için alınan sonuçlar tablo halinde verilmiştir. Küçük ve büyük parçacıkların kütlesel debileri eşit olup, besleme hacimleriyle doğru orantılı olarak kütlesel debi tanımlaması

yapılmıştır. Bu nedenle yığın karakteristiği değişmemiş, mutlak hacimle çarpılacak yığın çarpanı sabit kalmıştır. Farklı besleme hacimleriyle yapılan analizlerin sonucunda elde edilen veriler aşağıdaki tablolarda paylaşılmıştır. Tablo 4.2, Tablo 4.3, Tablo 4.4, Tablo 4.5 ve Tablo 4.6'da sırasıyla 0.5, 1, 1.5, 2 ve 3 metreküplük besleme hacimleriyle yapılan analizlerin sonucunda elde edilen Efektif Kapasite değerleri görülmektedir.

Tablo 4.2 0,5 metreküp mutlak besleme hacmiyle alınan sonuçlar

Mutlak Hacim [m3]	0,5	Yığın Çarpanı	1,746						
Hatve Adımı [mm]	Model	Verim	Eleme Süresi [s]	Bertaraf Süresi [s]	Yükleme Süresi [s]	Yığın Hacmi [m3]	Kapasite [m3/s]	Efektif Kapasite [m3/s]	Efektif Kapasite [m3/h]
1200	ELEK1	0,905	21,2	25,3	21,25	0,873	0,041	0,037	133,898
1200	ELEK2	0,831	28,9	25,4	25,15	0,873	0,035	0,029	103,821
1200	ELEK3	0,942	17,4	25,3	19,35	0,873	0,045	0,043	153,098

Tablo 4.3 1 metreküp mutlak besleme hacmiyle alınan sonuçlar

Mutlak Hacim [m3]	1	Yığın Çarpanı	1,746						
Hatve Adımı [mm]	Model	Verim	Eleme Süresi [s]	Bertaraf Süresi [s]	Yükleme Süresi [s]	Yığın Hacmi [m3]	Kapasite [m3/s]	Efektif Kapasite [m3/s]	Efektif Kapasite [m3/h]
1200	ELEK1	0,941	18,5	27,9	21,2	1,746	0,082	0,078	279,099
1200	ELEK2	0,898	22,4	29,4	23,9	1,746	0,073	0,066	236,209
1200	ELEK3	0,975	15,6	29	20,3	1,746	0,086	0,084	301,831

Tablo 4.4 1,5 metreküp mutlak besleme hacmiyle alınan sonuçlar

Mutlak Hacim [m3]	1,5	Yığın Çarpanı	1,746						
Hatve Adımı [mm]	Model	Verim	Eleme Süresi [s]	Bertaraf Süresi [s]	Yükleme Süresi [s]	Yığın Hacmi [m3]	Kapasite [m3/s]	Efektif Kapasite [m3/s]	Efektif Kapasite [m3/h]
1200	ELEK1	0,963	18,6	31,8	23,2	2,620	0,113	0,109	391,334
1200	ELEK2	0,933	22	31,4	24,7	2,620	0,106	0,099	356,146
1200	ELEK3	0,981	16,8	33,4	23,1	2,620	0,113	0,111	400,287

Tablolar genel olarak incelendiğinde Elek2'nin diğer eleklere göre daha düşük verimle çalıştığı dikkat çekmektedir. 2 metreküplük besleme hacmine kadar olan

hacimlerde Yükleme Süresi de daha düşük olduğu için Efektif Kapasitesi diğer iki eleğe göre belirgin bir şekilde düşüktür.

Tablo 4.5 2 metreküp mutlak besleme hacmiyle alınan sonuçlar

Mutlak Hacim [m3]	2	Yığın Çarpanı	1,746						
Hatve Adımı [mm]	Model	Verim	Eleme Süresi [s]	Bertaraf Süresi [s]	Yükleme Süresi [s]	Yığın Hacmi [m3]	Kapasite [m3/s]	Efektif Kapasite [m3/s]	Efektif Kapasite [m3/h]
1200	ELEK1	0,966	22	35,5	26,75	3,493	0,131	0,126	454,222
1200	ELEK2	0,935	22,6	33,3	25,95	3,493	0,135	0,126	452,836
1200	ELEK3	0,986	20,4	38	27,2	3,493	0,128	0,127	455,711

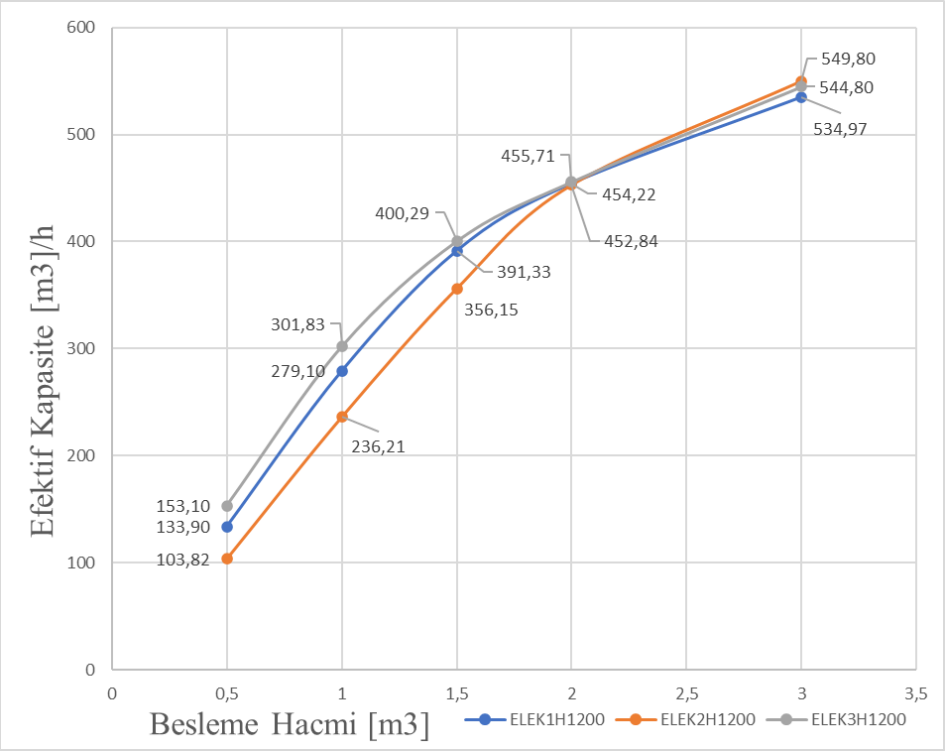
Tablo 4.6 3 metreküp mutlak besleme hacmiyle alınan sonuçlar

Mutlak Hacim [m3]	3	Yığın Çarpanı	1,746						
Hatve Adımı [mm]	Model	Verim	Eleme Süresi [s]	Bertaraf Süresi [s]	Yükleme Süresi [s]	Yığın Hacmi [m3]	Kapasite [m3/s]	Efektif Kapasite [m3/s]	Efektif Kapasite [m3/h]
1200	ELEK1	0,973	31,2	41,4	34,3	5,239	0,153	0,149	534,970
1200	ELEK2	0,946	31,3	37,6	32,45	5,239	0,161	0,153	549,800
1200	ELEK3	0,986	27,5	44,8	34,15	5,239	0,153	0,151	544,803

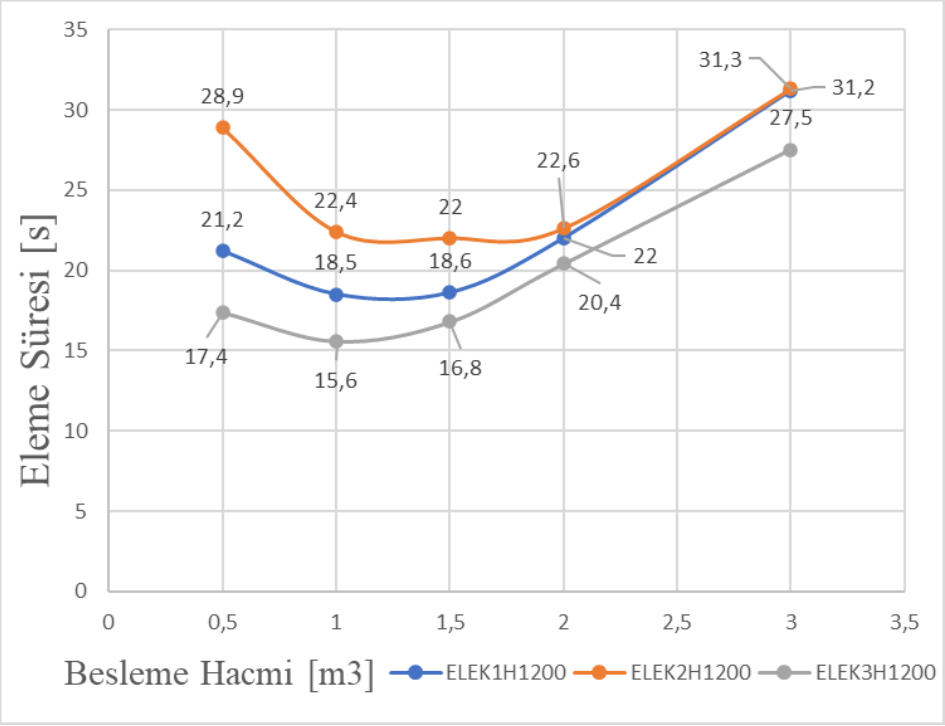
Tablolardaki veriler incelendiğinde, başlangıçta diğer eleklere göre belirgin şekilde avantajlı olan Elek3'ün artan besleme hacmiyle Bertaraf Süresinin de artması nedeniyle kapasitesinin düştüğü görülmüştür. Öyle ki Elek2 3 metreküp mutlak besleme hacmi ile yapılan analizde diğer iki elekten daha yüksek bir kapasiteye ulaşmıştır. Elek1 de verdiği çıktılar açısından Elek3 ile benzerlik göstermektedir.

Efektif kapasiteler Şekil 4.8'deki grafik üzerinde incelendiğinde, Elek1 ve Elek3'ün genel olarak daha iyi kapasiteye sahip olduğu görülmektedir. 2 metreküp besleme hacmine kadar neredeyse lineer bir artış görülse de besleme hacmi 3 metreküpe ulaştığında azalan bir artış görülmüştür. Bu kapasitenin daha yüksek hacimlerde sabit kalacağı ve sonrasında düşmeye başlayacağı tahmin edilebilirdir.

İyileştirmelerin yapılabilmesi için Eleme ve Bertaraf Süreleri detaylı olarak incelenmelidir.



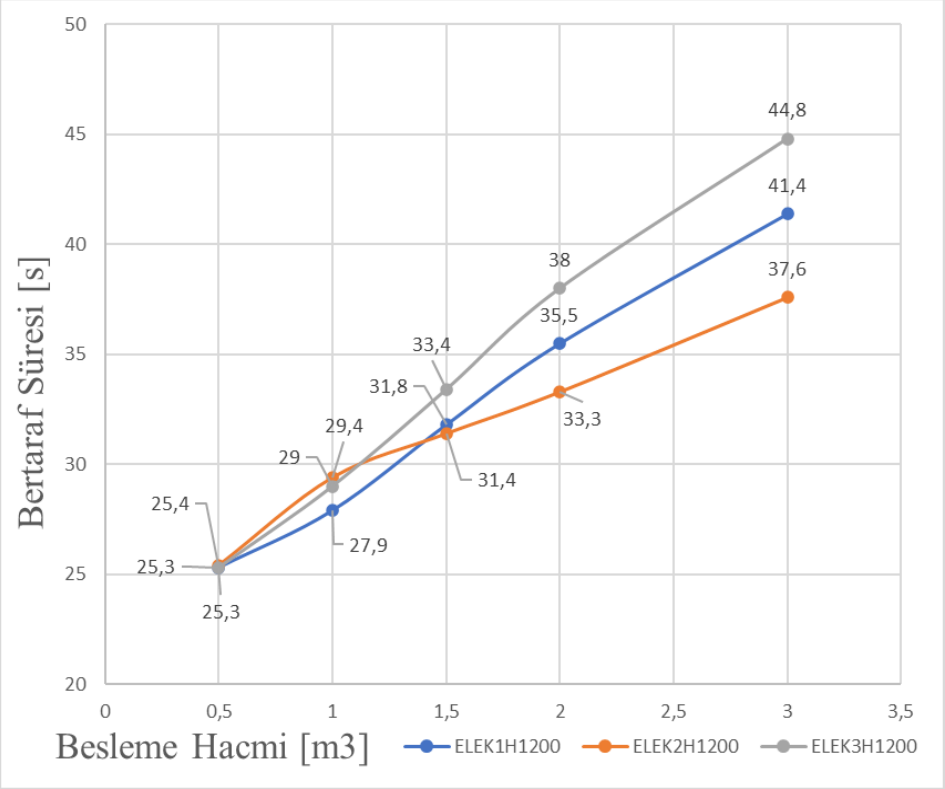
Şekil 4.8 Elek tasarımlarının artan hacimle birlikte değişen kapasiteleri



Şekil 4.9 Elek tasarımlarının artan hacimle birlikte değişen eleme süreleri

Şekil 4.9'daki grafikte görüldüğü gibi Eleme Süresi, 0,5 metreküp hacimde yüksek çıkmıştır çünkü az sayıdaki parçacığın elek altında belirli bir oranda toplanması uzun sürmüştür. Buradan çıkarılabilecek sonuç, eleğin yeteri kadar beslenemediği koşullarda da etkin bir kapasiteyle çalışamayacağıdır.

Şekil 4.10'daki grafikte görüldüğü gibi, Bertaraf Süresi artan hacimde lineere yakın bir artış göstermekle birlikte, bu artış miktarı, yani verilerin oluşturduğu doğrunun eğimi her bir elek için farklıdır. Bu nedenle eleklerin bertaraf kabiliyetlerini Elek2>Elek1>Elek3 şeklinde sıralamak mümkündür.



Şekil 4.10 Elek tasarımlarının artan hacimle birlikte değişen bertaraf süreleri

4.2.2 Parçacıkların Kütlesel Yüzdeleri Değişkeni

Besleme için kütle girdisi tanımlanırken, besleme süresi sabit tutulup kütlesel debi kontrol edilerek toplam mutlak hacim 1 metreküp değerinde sabit tutularak parçacıkların kütlesel yüzdeleri değiştirilmiş ve etkileri incelenmiştir. Yığın karakteristiği de bu oranlarla değişmekte, dolayısıyla her farklı yüzde için ölçülen farklı yığın çarpanları hesaba alınmıştır.

Parçacık dağılımının, değerler üzerinde tutarlı bir etki oluşturması beklenmektedir. Çünkü küçük parçacıkların zor olması eleme işlemini, büyüklerin çok olması da bertaraf işlemini zorlaştıracaktır. Aynı şekilde küçük parçacıkların daha çok olması, elekten geçemeyen ve ret bölgesinden terk eden parçacık sayısını da artıracak ve verimi düşürecektir.

Bu nedenle %70 ve %30 aralığında oranla küçük parçacık içeren yığınlar %10 aralıklarla analiz edilerek 5 farklı analiz yapılıp sonuç alınmıştır. %50 küçük parçacık kütlesi içeren yığınla yapılan analiz, aynı zamanda başlık 4.2.1'in 1 metreküp inceleme koşullarıyla aynıdır. Burada farklı bir kıyaslama yapıldığı için sonuçları tekrar eklenmiştir.

Tablo 4.7, Tablo 4.8, Tablo 4.9, Tablo 4.10 ve Tablo 4.11'de toplam yığın kütlesine göre sırasıyla %70, %60, %50, %40 ve %30 oranında küçük parçacık kütlesi içeren besleme koşullarında yapılan analizlerin sonuçları verilmiştir.

Tablo 4.7 1 metreküp mutlak besleme hacmi ve toplam kütlenin %70'i küçük %30'u büyük parçacıklarla yapılan beslemede alınan sonuçlar

Mutlak Hacim [m3]	1	Yığın Çarpanı	1,728	%70 Küçük, %30 Büyük Parçacıktan Oluşan Yığın					
Hatve Adımı [mm]	Model	Verim	Eleme Süresi [s]	Bertaraf Süresi [s]	Yükleme Süresi [s]	Yığın Hacmi [m3]	Kapasite [m3/s]	Efektif Kapasite [m3/s]	Efektif Kapasite [m3/h]
1200	ELEK1	0,913	20,2	24,9	20,55	1,728	0,084	0,077	276,254
1200	ELEK2	0,872	30,9	25,7	26,3	1,728	0,066	0,057	206,269
1200	ELEK3	0,963	16,7	25,2	18,95	1,728	0,091	0,088	316,162

Tablo 4.8 1 metreküp mutlak besleme hacmi ve toplam kütlenin %60'ı küçük %40'ı büyük parçacıklarla yapılan beslemede alınan sonuçlar

Mutlak Hacim [m3]	1	Yığın Çarpanı	1,739	%60 Küçük, %40 Büyük Parçacıktan Oluşan Yığın					
Hatve Adımı [mm]	Model	Verim	Eleme Süresi [s]	Bertaraf Süresi [s]	Yükleme Süresi [s]	Yığın Hacmi [m3]	Kapasite [m3/s]	Efektif Kapasite [m3/s]	Efektif Kapasite [m3/h]
1200	ELEK1	0,932	19,6	27,2	21,4	1,739	0,081	0,076	272,571
1200	ELEK2	0,890	25,9	27,4	24,65	1,739	0,071	0,063	226,061
1200	ELEK3	0,965	16	26,7	19,35	1,739	0,090	0,087	312,177

Tablo 4.9 1 metreküp mutlak besleme hacmi ve toplam kütlenin %50'si küçük %50'si büyük parçacıklarla yapılan beslemede alınan sonuçlar

Mutlak Hacim [m3]	1	Yığın Çarpanı	1,746	%50 Küçük, %50 Büyük Parçacıktan Oluşan Yığın					
Hatve Adımı [mm]	Model	Verim	Eleme Süresi [s]	Bertaraf Süresi [s]	Yükleme Süresi [s]	Yığın Hacmi [m3]	Kapasite [m3/s]	Efektif Kapasite [m3/s]	Efektif Kapasite [m3/h]
1200	ELEK1	0,941	18,5	27,9	21,2	1,746	0,082	0,078	279,099
1200	ELEK2	0,898	22,4	29,4	23,9	1,746	0,073	0,066	236,209
1200	ELEK3	0,975	15,6	29	20,3	1,746	0,086	0,084	301,831

Tablo 4.10 1 metreküp mutlak besleme hacmi ve toplam kütlenin %40'ı küçük %60'ı büyük parçacıklarla yapılan beslemede alınan sonuçlar

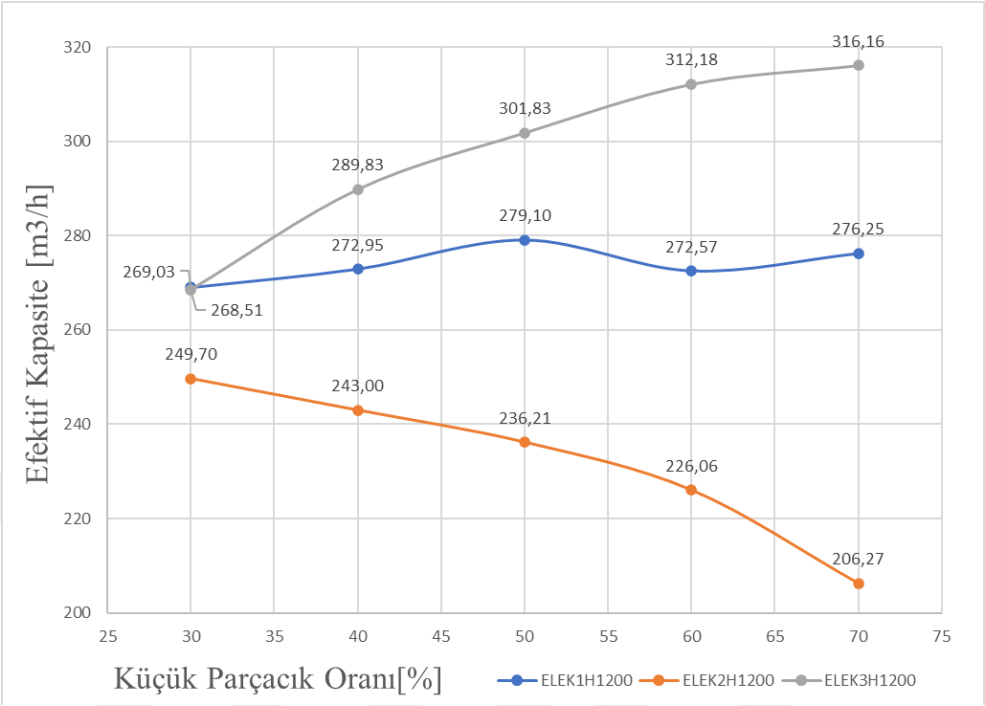
Mutlak Hacim [m3]	1	Yığın Çarpanı	1,764	%40 Küçük, %60 Büyük Parçacıktan Oluşan Yığın					
Hatve Adımı [mm]	Model	Verim	Eleme Süresi [s]	Bertaraf Süresi [s]	Yükleme Süresi [s]	Yığın Hacmi [m3]	Kapasite [m3/s]	Efektif Kapasite [m3/s]	Efektif Kapasite [m3/h]
1200	ELEK1	0,961	17,9	30,8	22,35	1,764	0,079	0,076	272,952
1200	ELEK2	0,909	21,4	30,1	23,75	1,764	0,074	0,068	243,001
1200	ELEK3	0,975	15,8	30,9	21,35	1,764	0,083	0,081	289,828

Tablo 4.11 1 metreküp mutlak besleme hacmi ve toplam kütlenin %30'u küçük %70'i büyük parçacıklarla yapılan beslemede alınan sonuçlar

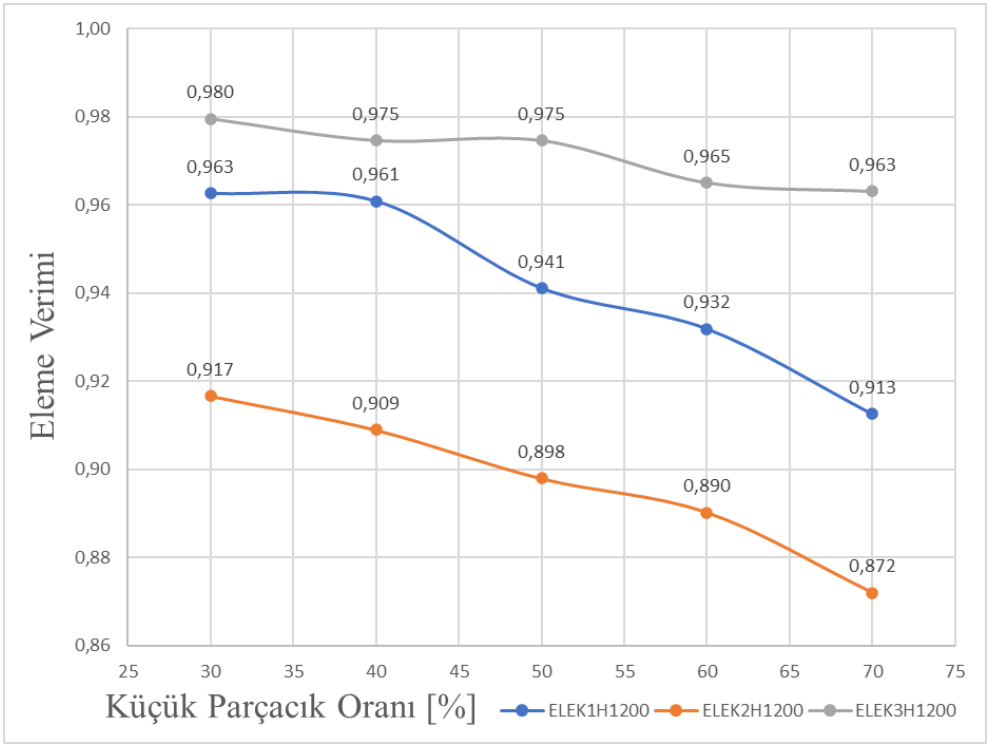
Mutlak Hacim [m3]	1	Yığın Çarpanı	1,786	%30 Küçük, %70 Büyük Parçacıktan Oluşan Yığın					
Hatve Adımı [mm]	Model	Verim	Eleme Süresi [s]	Bertaraf Süresi [s]	Yükleme Süresi [s]	Yığın Hacmi [m3]	Kapasite [m3/s]	Efektif Kapasite [m3/s]	Efektif Kapasite [m3/h]
1200	ELEK1	0,963	17,6	32,4	23	1,786	0,078	0,075	269,032
1200	ELEK2	0,917	20,2	31	23,6	1,786	0,076	0,069	249,697
1200	ELEK3	0,980	16,1	34,8	23,45	1,786	0,076	0,075	268,512

Efektif kapasitenin parçacık dağılımına göre değişimi Şekil 4.11'deki grafikte gösterilmiştir. Besleme koşulları değiştirilerek yapılan analizlerden alınan sonuçlar da göz önünde bulundurulduğunda, Elek2'nin bertaraf etme kabiliyeti burada 1 metreküplük hacimle ve küçük parçacık oranı arttıkça etkisini yitirmiştir. Elek1, parçacık dağılımından fazla etkilenmeyen bir sonuç verirken, Elek3'ün eleme

performansı yüksek olduğu için küçük parçacıklar arttıkça yüksek kapasiteli bir sonuç vermiştir.

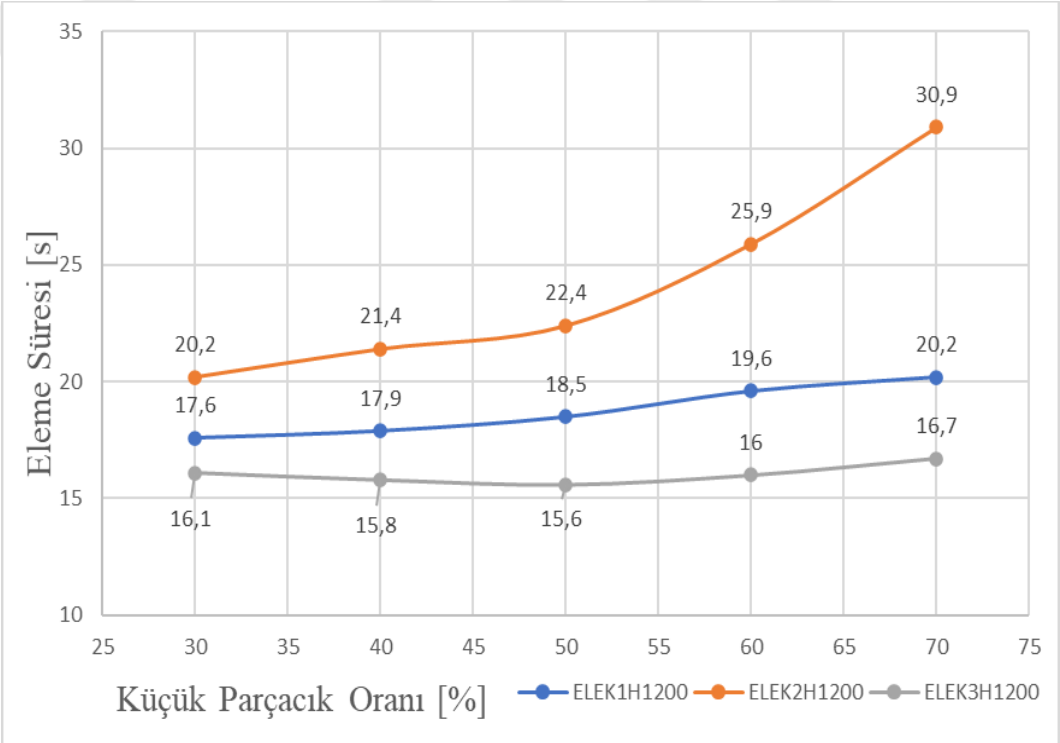


Şekil 4.11 1 metreküp beslemeyle küçük parçacıkların kütlesel değişimine göre kapasite



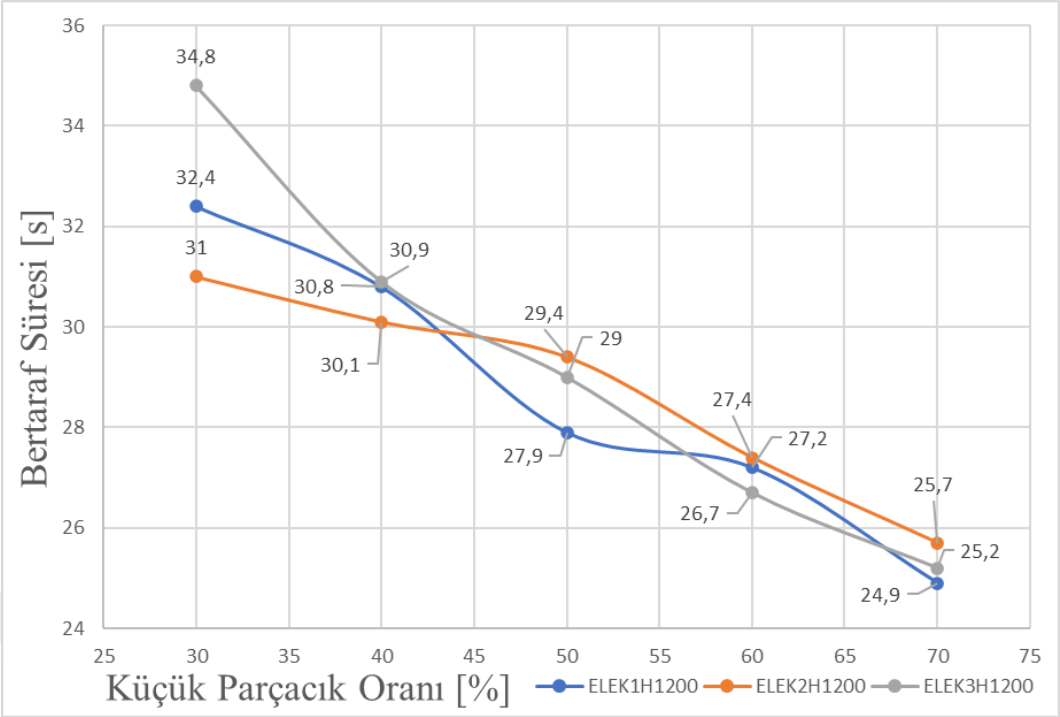
Şekil 4.12 1 metreküp beslemeyle küçük parçacıkların kütlesel değişimine göre eleme verimi

Şekil 4.12'deki grafikte görüldüğü üzere eleme verimleri, küçük parçacıkların oranı arttıkça düşmektedir. Çünkü küçük parçacıkların sayısı arttıkça elek deliklerinden geçemeyerek büyük parçacıklarla birlikte ret bölgesine ilerleyen küçük parçacık sayısı da artmaktadır. Eleme kabiliyeti diğerlerine göre daha düşük olan Elek2, bu değişimle en çok verim kaybı yaşayan elek olmuştur. Şekil 4.13'teki bulunan Eleme Süresi grafiği incelendiğinde de benzer bir durum görülmektedir. Eleme performansı zaten yüksek olan Elek1 ve Elek3, parçacık değişiminden daha az etkilenirken Elek2'nin eleme süresi ciddi oranda artmıştır. (Örneğin Elek1 için bu değişim %4 iken Elek2'nin eleme süresi neredeyse %50 oranında artış göstermiştir.)



Şekil 4.13 1 metreküp beslemeyle küçük parçacıkların kütlesel değişimine göre eleme süresi

Şekil 4.14'teki Bertaraf Süresi grafiği incelendiğinde, Elek2'nin eşit parçacık dağılımlı koşulda da tecrübe edildiği şekilde yüksek olan bertaraf kabiliyetinin etkisiyle görülmüştür. Ancak küçük parçacık oranı arttıkça Elek2'nin bertaraf süresi uzamaktadır, çünkü deliklerden geçemeyen küçük parçacıklar eleğin sonuna kadar taşınacak ve ret bölgesinden dışarı çıkarak elek içinde daha uzun süre kalacaktır.



Şekil 4.14 1 metreküp beslemeyle küçük parçacıkların kütlesel değişimine göre bertaraf süresi

4.3 Kapasite İyileştirmeleri

4.3.1 Besleme Hacmine Göre İyileştirmeler

Bölüm 4.1'de alınan sonuçlara ve grafiklere bakıldığında, 1 ve 3 numaralı eleklerin yüksek verimde çalıştıkları ancak bertaraf sürelerinin 2 numaralı eleğe göre daha fazla olduğu görülmektedir. Tüm eleklerin besleme hacmine göre davranışı incelendiğindeyse, elek verimi ve eleme süresine bakıldığında 1 metreküpün altındaki beslemenin bu elek tasarımları için verimli olmadığı da dikkat çekmektedir.

Genel kapasiteler incelendiğinde ise 3 numaralı eleğin en yüksek 2 numaralı eleğin en düşük kapasiteye sahip olduğu görülmektedir. 1 ve 3 numaralı eleklerin kapasitesi 2 numaralı eleğe göre bariz bir şekilde yüksektir. Ancak 2 numaralı elek, besleme hacmi arttıkça bertaraf süresi açısından 1 ve 3 numaralı eleğe göre avantaj kazanmaktadır.

Bu bilgiler göz önünde bulundurularak; 1 ve 3 numaralı eleklerin hatve adımı ölçüsü 1200'den 1600 milimetreye çıkarılarak, 2 numaralı eleğin hatve ölçüsü de

1200’den 800 milimetreye düşürülerek iyileştirilmiş elek tasarımları diğer parametreler değiştirilmeden oluşturulmuştur.

Burada 1 ve 3 numaralı eleklerde parçacıkların eleğin çıkışına doğru daha hızlı ilerlemesi sağlanarak bertaraf süresinin kısaltılması amaçlanmıştır. 2 numaralı elek için de parçacıkların ilerleyişi yavaşlatılarak eleğin içinde daha uzun süre kalması ve küçük parçacıkların elekten geçmek için daha fazla zaman bulması amaçlanmıştır.

Bu iyileştirmeler sayesinde efektif kapasitelerinde artış hedeflenmiştir. Aynı koşullarda yeniden analiz yapılarak veriler toplanmıştır.

Tablo 4.12 0,5 metreküp mutlak besleme hacmi için iyileştirmelerin etkileri

Mutlak Hacim [m3]	0,5	Yığın Çarpanı	1,746	%50 Küçük, %50 Büyük Parçacıktan Oluşan Yığın						
Hatve Adımı [mm]	Model	Verim	Eleme Süresi [s]	Bertaraf Süresi [s]	Yükleme Süresi [s]	Yığın Hacmi [m3]	Kapasite [m3/s]	Efektif Kapasite [m3/s]	Efektif Kapasite [m3/h]	Efektif Kapasite Artışı [%]
1200	ELEK1	0,905	21,2	25,3	21,25	0,873	0,041	0,037	133,898	
1200	ELEK2	0,831	28,9	25,4	25,15	0,873	0,035	0,029	103,821	
1200	ELEK3	0,942	17,4	25,3	19,35	0,873	0,045	0,043	153,098	
1600	ELEK1	0,892	21,2	24,8	21	0,873	0,042	0,037	133,464	-0,32
800	ELEK2	0,897	26,1	30,4	26,25	0,873	0,033	0,030	107,379	3,43
1600	ELEK3	0,945	16,3	23,9	18,1	0,873	0,048	0,046	164,112	7,19

Tablo 4.13 1 metreküp mutlak besleme hacmi için iyileştirmelerin etkileri

Mutlak Hacim [m3]	1	Yığın Çarpanı	1,746	%50 Küçük, %50 Büyük Parçacıktan Oluşan Yığın						
Hatve Adımı [mm]	Model	Verim	Eleme Süresi [s]	Bertaraf Süresi [s]	Yükleme Süresi [s]	Yığın Hacmi [m3]	Kapasite [m3/s]	Efektif Kapasite [m3/s]	Efektif Kapasite [m3/h]	Efektif Kapasite Artışı [%]
1200	ELEK1	0,941	18,5	27,9	21,2	1,746	0,082	0,078	279,099	
1200	ELEK2	0,898	22,4	29,4	23,9	1,746	0,073	0,066	236,209	
1200	ELEK3	0,975	15,6	29	20,3	1,746	0,086	0,084	301,831	
1600	ELEK1	0,936	18,2	26,8	20,5	1,746	0,085	0,080	287,071	2,86
800	ELEK2	0,950	19,7	34,4	25,05	1,746	0,070	0,066	238,541	0,99
1600	ELEK3	0,965	16,1	27,7	19,9	1,746	0,088	0,085	304,821	0,99

Tablo 4.12, Tablo 4.13, Tablo 4.14, Tablo 4.15 ve Tablo 4.16’da sırasıyla 0.5, 1, 1.5, 2 ve 3 metreküp besleme koşullarında analiz edilen iyileştirilmiş eleklerin çıktıları ve kapasitelerdeki iyileştirme miktarları görülmektedir.

2 numaralı elek için yapılan iyileştirmenin olumlu etkisinin besleme hacmi arttıkça azalması ve eksi değeri düşmesi burada dikkat çekmektedir.

Tablo 4.14 1,5 metreküp mutlak besleme hacmi için iyileştirmelerin etkileri

Mutlak Hacim [m3]	1,5	Yığın Çarpanı	1,746	%50 Küçük, %50 Büyük Parçacıktan Oluşan Yığın						
Hatve Adımı [mm]	Model	Verim	Eleme Süresi [s]	Bertaraf Süresi [s]	Yükleme Süresi [s]	Yığın Hacmi [m3]	Kapasite [m3/s]	Efektif Kapasite [m3/s]	Efektif Kapasite [m3/h]	Efektif Kapasite Artışı [%]
1200	ELEK1	0,963	18,6	31,8	23,2	2,620	0,113	0,109	391,334	
1200	ELEK2	0,933	22	31,4	24,7	2,620	0,106	0,099	356,146	
1200	ELEK3	0,981	16,8	33,4	23,1	2,620	0,113	0,111	400,287	
1600	ELEK1	0,956	18,6	29,9	22,25	2,620	0,118	0,113	405,172	3,54
800	ELEK2	0,969	20,5	39	27,75	2,620	0,094	0,091	329,184	-7,57
1600	ELEK3	0,980	17,1	31,5	22,3	2,620	0,117	0,115	414,289	3,50

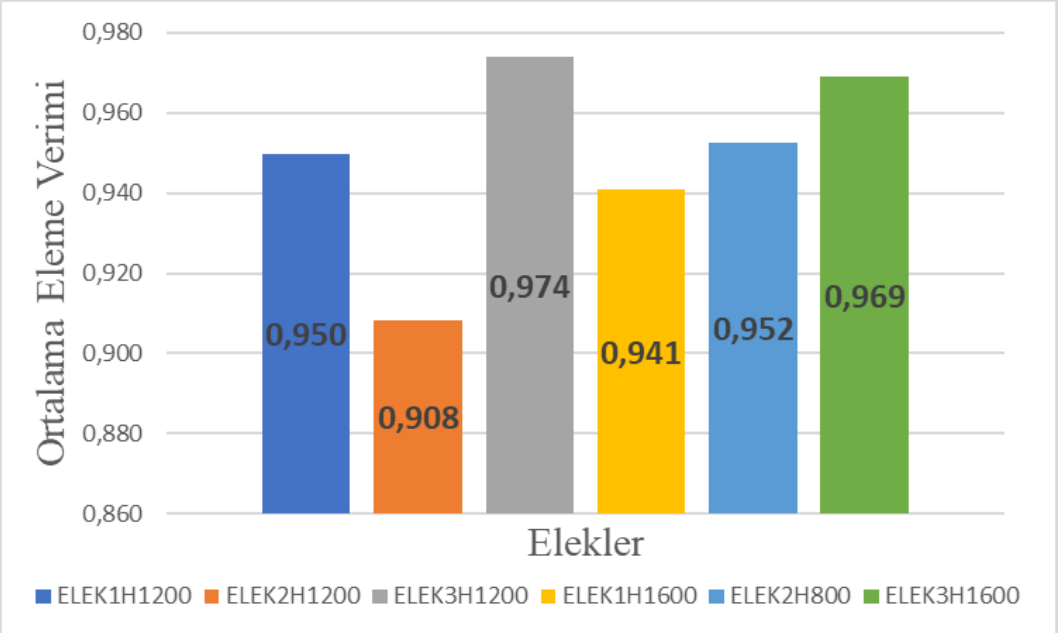
Tablo 4.15 2 metreküp mutlak besleme hacmi için iyileştirmelerin etkileri

Mutlak Hacim [m3]	2	Yığın Çarpanı	1,746	%50 Küçük, %50 Büyük Parçacıktan Oluşan Yığın						
Hatve Adımı [mm]	Model	Verim	Eleme Süresi [s]	Bertaraf Süresi [s]	Yükleme Süresi [s]	Yığın Hacmi [m3]	Kapasite [m3/s]	Efektif Kapasite [m3/s]	Efektif Kapasite [m3/h]	Efektif Kapasite Artışı [%]
1200	ELEK1	0,966	22	35,5	26,75	3,493	0,131	0,126	454,222	
1200	ELEK2	0,935	22,6	33,3	25,95	3,493	0,135	0,126	452,836	
1200	ELEK3	0,986	20,4	38	27,2	3,493	0,128	0,127	455,711	
1600	ELEK1	0,955	22,2	32,8	25,5	3,493	0,137	0,131	471,058	3,71
800	ELEK2	0,974	22,6	41,7	30,15	3,493	0,116	0,113	406,266	-10,28
1600	ELEK3	0,978	19,5	35,3	25,4	3,493	0,138	0,134	484,128	6,24

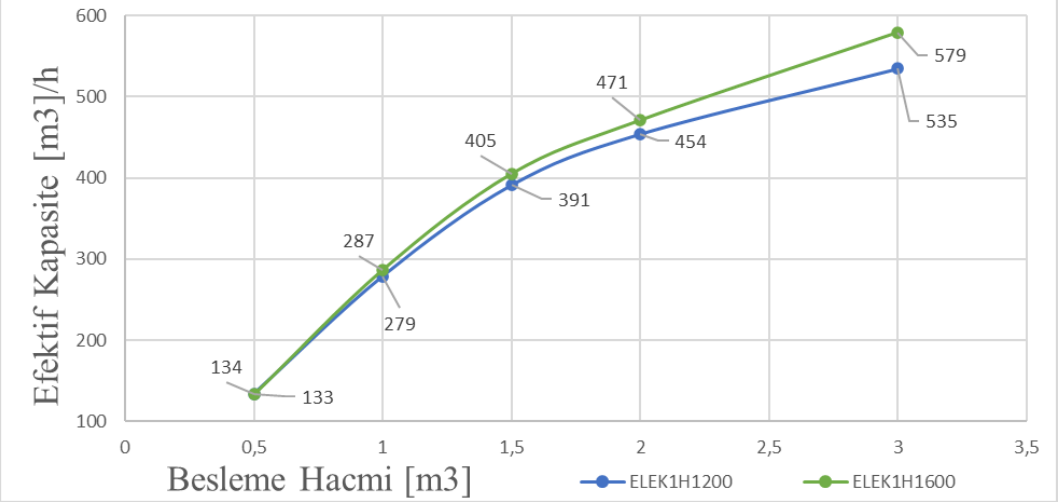
Tablo 4.16 3 metreküp mutlak besleme hacmi için iyileştirmelerin etkileri

Mutlak Hacim [m3]	3	Yığın Çarpanı	1,746	%50 Küçük, %50 Büyük Parçacıktan Oluşan Yığın						
Hatve Adımı [mm]	Model	Verim	Eleme Süresi [s]	Bertaraf Süresi [s]	Yükleme Süresi [s]	Yığın Hacmi [m3]	Kapasite [m3/s]	Efektif Kapasite [m3/s]	Efektif Kapasite [m3/h]	Efektif Kapasite Artışı [%]
1200	ELEK1	0,973	31,2	41,4	34,3	5,239	0,153	0,149	534,970	
1200	ELEK2	0,946	31,3	37,6	32,45	5,239	0,161	0,153	549,800	
1200	ELEK3	0,986	27,5	44,8	34,15	5,239	0,153	0,151	544,803	
1600	ELEK1	0,966	29,2	37,7	31,45	5,239	0,167	0,161	579,132	8,26
800	ELEK2	0,972	33,4	47,8	38,6	5,239	0,136	0,132	475,099	-13,59
1600	ELEK3	0,977	28,9	42,2	33,55	5,239	0,156	0,153	549,230	0,81

Şekil 4.15'te grafik halinde verilen ortalama verimlere bakıldığında Elek2 için yaklaşık %4'lük bir verim artışı olsa da Bertaraf Süresinin uzaması ve hacim arttıkça eleğin temizlenmesinin zorlaşması, kapasiteyi düşüren etkenlerden olmuştur.



Şekil 4.15 Eleklerin ortalama verimleri

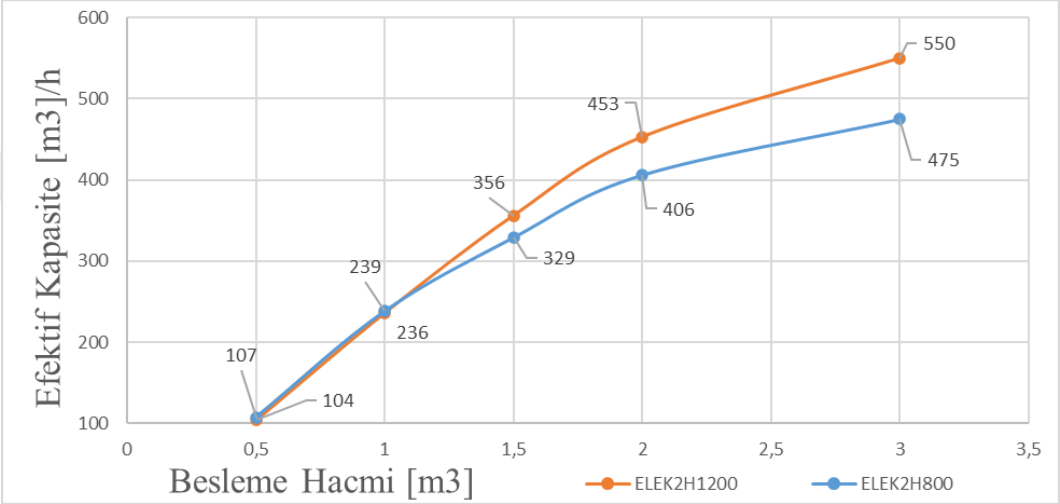


Şekil 4.16 Elek1 için yapılan iyileştirmenin efektif kapasiteye etkisi

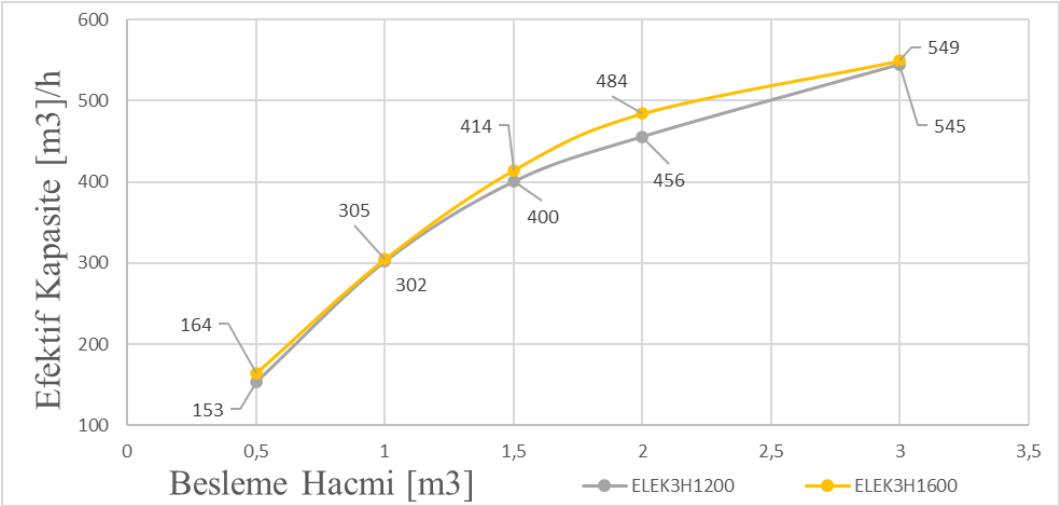
Şekil 4.16, Şekil 4.17 ve Şekil 4.18'de sırasıyla Elek1, Elek2 ve Elek3 için yapılan iyileştirmelerin kapasite üzerindeki değişimleri grafik halinde gösterilmiştir. Grafikler incelendiğinde Elek1 ve Elek3 üzerinde yapılan iyileştirmelerin, verimlerde

küçük bir miktar düşüş karşılığında daha iyi bir bertaraf süresi elde edilerek kapasitede artış sağladığı görülmektedir.

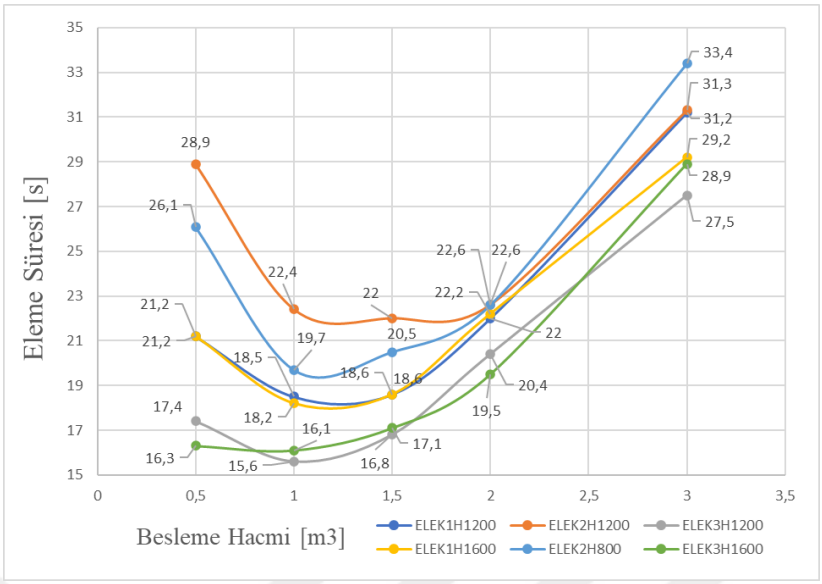
Elek2 üzerinde yapılan iyileştirme ise başarılı olamamış, verim artsa da bertaraf süresindeki artış artan besleme hacmiyle birlikte eleğin kapasitesinde kayba yol açmıştır. Aynı iyileştirme yapılmasına rağmen Elek3'teki kapasite artışının Elek1 kadar yüksek olamamasının nedeni, Elek3'ün ilk durumda da yüksek kapasiteye sahip olması ile açıklanabilir.



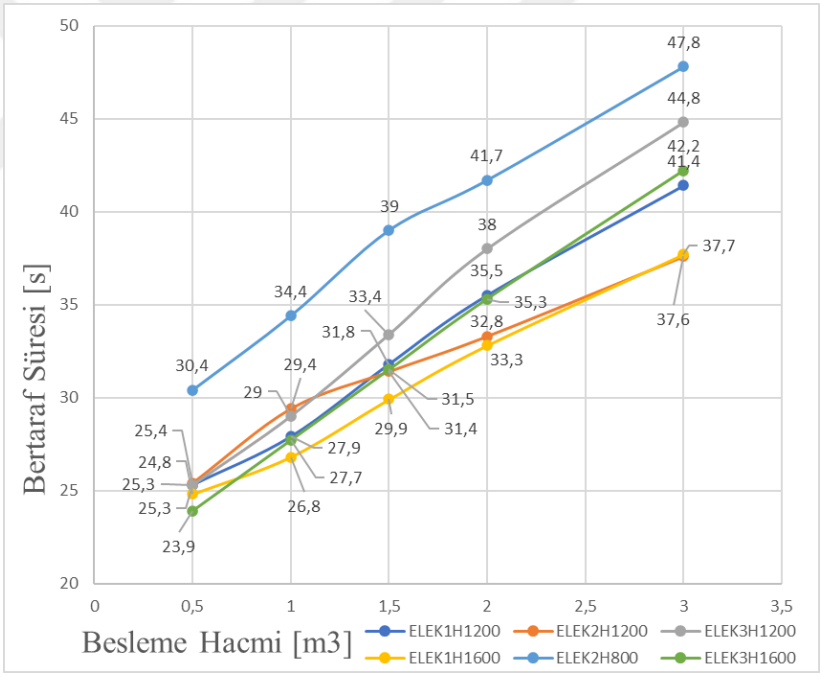
Şekil 4.17 Elek2 için yapılan iyileştirmenin efektif kapasiteye etkisi



Şekil 4.18 Elek3 için yapılan iyileştirmenin efektif kapasiteye etkisi



Şekil 4.19 Yapılan iyileştirmelerin eleklerin eleme süresine etkisi



Şekil 4.20 Yapılan iyileştirmelerin eleklerin bertaraf süresine etkisi

Şekil 4.19'da Eleme Süresinin iyileştirmeler etkisindeki grafiği bulunmaktadır. Elek1 ve Elek3'teki iyileştirmelerin yapılma amacı Eleme Süresini düşürmek olmadığı için ilk sonuçlar ve iyileştirilmiş sonuçlar birbirine yakındır. Elek2 üzerinde yapılan değişiklik 2 metreküpten küçük hacimler için eleme süresini iyileştirse de hacim arttıkça eleme süresini yükseltmiştir. Şekil 4.20'de Bertaraf Süresinin

iyileştirmeler etkisindeki grafiği bulunmaktadır. Hatve değişimi, bertaraf süresine doğrudan etki etmiş ve hatvenin artırıldığı eleklerde bertaraf süresi düşerken hatvenin azaltıldığı elekte ise yükselmiştir.

4.3.2 Parçacık Dağılımına Göre İyileştirmeler

Tablo 4.17, Tablo 4.18, Tablo 4.19, Tablo 4.20 ve Tablo 4.21'de toplam yığın kütlesine göre sırasıyla %70, %60, %50, %40 ve %30 oranında küçük parçacık kütlesi içeren besleme koşullarında yapılan iyileştirmelerin sonuçları verilmiştir. Tablolardaki verilerde dikkat çeken en önemli sonuç, Elek2 üzerinde yapılan iyileştirmenin küçük parçacıklar yığında yüksek oranda bulunurken olumlu yönde etki ettiği ve bu etkinin giderek azalarak küçük parçacıkların oranı düştüğünde kapasiteyi olumsuz etkilediğidir.

Tablo 4.17 1 metreküp mutlak besleme hacmi ve toplam kütlenin %70'i küçük %30'u büyük parçacıklarla yapılan beslemede iyileştirmelerin etkileri

Mutlak Hacim [m3]	1	Yığın Çarpanı	1,728	%70 Küçük, %30 Büyük Parçacıktan Oluşan Yığın						
Hatve Adımı [mm]	Model	Verim	Eleme Süresi [s]	Bertaraf Süresi [s]	Yükleme Süresi [s]	Yığın Hacmi [m3]	Kapasite [m3/s]	Efektif Kapasite [m3/s]	Efektif Kapasite [m3/h]	Efektif Kapasite Artışı [%]
1200	ELEK1	0,913	20,2	24,9	20,55	1,728	0,084	0,077	276,254	
1200	ELEK2	0,872	30,9	25,7	26,3	1,728	0,066	0,057	206,269	
1200	ELEK3	0,963	16,7	25,2	18,95	1,728	0,091	0,088	316,162	
1600	ELEK1	0,910	20,1	23,5	19,8	1,728	0,087	0,079	286,054	3,55
800	ELEK2	0,928	22	29,4	23,7	1,728	0,073	0,068	243,507	18,05
1600	ELEK3	0,947	16,3	23,4	17,85	1,728	0,097	0,092	330,164	4,43

Tablo 4.18 1 metreküp mutlak besleme hacmi ve toplam kütlenin %60'ı küçük %40'ı büyük parçacıklarla yapılan beslemede iyileştirmelerin etkileri

Mutlak Hacim [m3]	1	Yığın Çarpanı	1,739	%60 Küçük, %40 Büyük Parçacıktan Oluşan Yığın						
Hatve Adımı [mm]	Model	Verim	Eleme Süresi [s]	Bertaraf Süresi [s]	Yükleme Süresi [s]	Yığın Hacmi [m3]	Kapasite [m3/s]	Efektif Kapasite [m3/s]	Efektif Kapasite [m3/h]	Efektif Kapasite Artışı [%]
1200	ELEK1	0,932	19,6	27,2	21,4	1,739	0,081	0,076	272,571	
1200	ELEK2	0,890	25,9	27,4	24,65	1,739	0,071	0,063	226,061	
1200	ELEK3	0,965	16	26,7	19,35	1,739	0,090	0,087	312,177	
1600	ELEK1	0,919	19,2	25,4	20,3	1,739	0,086	0,079	283,424	3,98
800	ELEK2	0,939	20,2	31,7	23,95	1,739	0,073	0,068	245,486	8,59
1600	ELEK3	0,963	15,9	25,6	18,75	1,739	0,093	0,089	321,460	2,97

Tablo 4.19 1 metreküp mutlak besleme hacmi ve toplam kütlenin %50'si küçük %50'si büyük parçacıklarla yapılan beslemede iyileştirmelerin etkileri

Mutlak Hacim [m3]	1	Yığın Çarpanı	1,746	%50 Küçük, %50 Büyük Parçacıktan Oluşan Yığın						
Hatve Adımı [mm]	Model	Verim	Eleme Süresi [s]	Bertaraf Süresi [s]	Yükleme Süresi [s]	Yığın Hacmi [m3]	Kapasite [m3/s]	Efektif Kapasite [m3/s]	Efektif Kapasite [m3/h]	Efektif Kapasite Artışı [%]
1200	ELEK1	0,941	18,5	27,9	21,2	1,746	0,082	0,078	279,099	
1200	ELEK2	0,898	22,4	29,4	23,9	1,746	0,073	0,066	236,209	
1200	ELEK3	0,975	15,6	29	20,3	1,746	0,086	0,084	301,831	
1600	ELEK1	0,936	18,2	26,8	20,5	1,746	0,085	0,080	287,071	2,86
800	ELEK2	0,950	19,7	34,4	25,05	1,746	0,070	0,066	238,541	0,99
1600	ELEK3	0,965	16,1	27,7	19,9	1,746	0,088	0,085	304,821	0,99

Tablo 4.20 1 metreküp mutlak besleme hacmi ve toplam kütlenin %40'ı küçük %60'ı büyük parçacıklarla yapılan beslemede iyileştirmelerin etkileri

Mutlak Hacim [m3]	1	Yığın Çarpanı	1,764	%40 Küçük, %60 Büyük Parçacıktan Oluşan Yığın						
Hatve Adımı [mm]	Model	Verim	Eleme Süresi [s]	Bertaraf Süresi [s]	Yükleme Süresi [s]	Yığın Hacmi [m3]	Kapasite [m3/s]	Efektif Kapasite [m3/s]	Efektif Kapasite [m3/h]	Efektif Kapasite Artışı [%]
1200	ELEK1	0,961	17,9	30,8	22,35	1,764	0,079	0,076	272,952	
1200	ELEK2	0,909	21,4	30,1	23,75	1,764	0,074	0,068	243,001	
1200	ELEK3	0,975	15,8	30,9	21,35	1,764	0,083	0,081	289,828	
1600	ELEK1	0,932	18,3	28	21,15	1,764	0,083	0,078	279,703	2,47
800	ELEK2	0,955	18,9	37,4	26,15	1,764	0,067	0,064	231,875	-4,58
1600	ELEK3	0,972	15,9	29,8	20,85	1,764	0,085	0,082	295,973	2,12

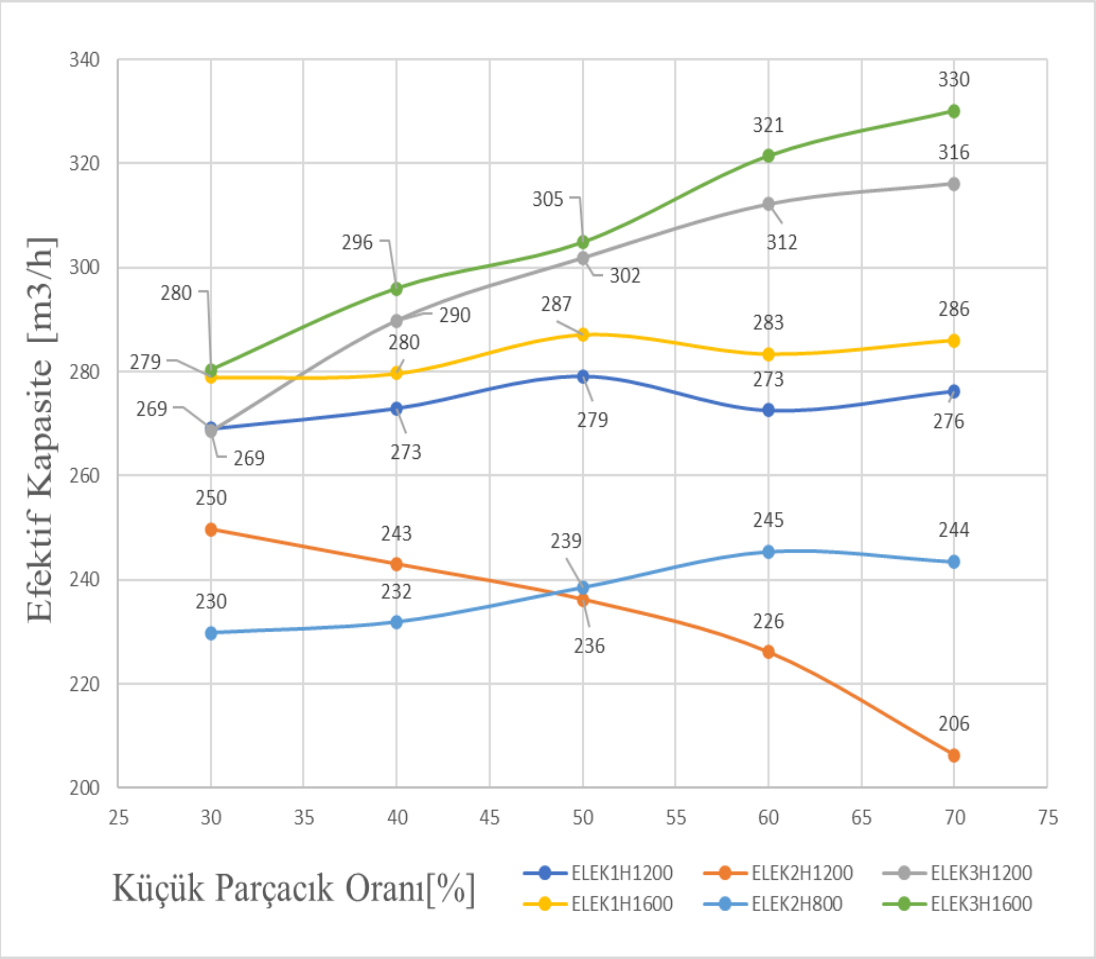
Tablo 4.21 1 metreküp mutlak besleme hacmi ve toplam kütlenin %30'u küçük 70'i büyük parçacıklarla yapılan beslemede iyileştirmelerin etkileri

Mutlak Hacim [m3]	1	Yığın Çarpanı	1,786	%30 Küçük, %70 Büyük Parçacıktan Oluşan Yığın						
Hatve Adımı [mm]	Model	Verim	Eleme Süresi [s]	Bertaraf Süresi [s]	Yükleme Süresi [s]	Yığın Hacmi [m3]	Kapasite [m3/s]	Efektif Kapasite [m3/s]	Efektif Kapasite [m3/h]	Efektif Kapasite Artışı [%]
1200	ELEK1	0,963	17,6	32,4	23	1,786	0,078	0,075	269,032	
1200	ELEK2	0,917	20,2	31	23,6	1,786	0,076	0,069	249,697	
1200	ELEK3	0,980	16,1	34,8	23,45	1,786	0,076	0,075	268,512	
1600	ELEK1	0,961	18,1	30,2	22,15	1,786	0,081	0,077	278,946	3,69
800	ELEK2	0,963	18,7	39,2	26,95	1,786	0,066	0,064	229,769	-7,98
1600	ELEK3	0,977	16	32,8	22,4	1,786	0,080	0,078	280,288	4,39

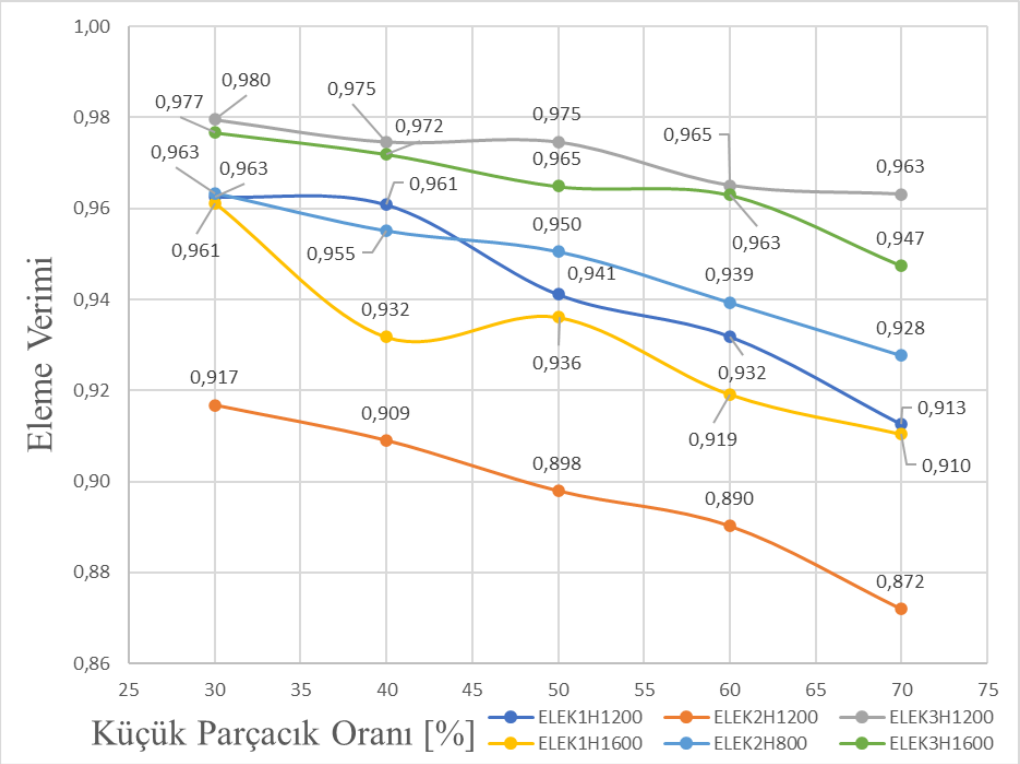
Sıradaki iki sayfada iyileştirilmiş eleklerin parçacık dağılımına göre değişim gösteren parametreleri bulunmaktadır. Aynı eleğin yalnızca hatve adımı ölçüsü

değiştirildiğinde karakteristiğinin tamamen değişebileceği, Şekil 4.21'deki kapasite grafiğinde Elek2 için net bir şekilde görülmektedir.

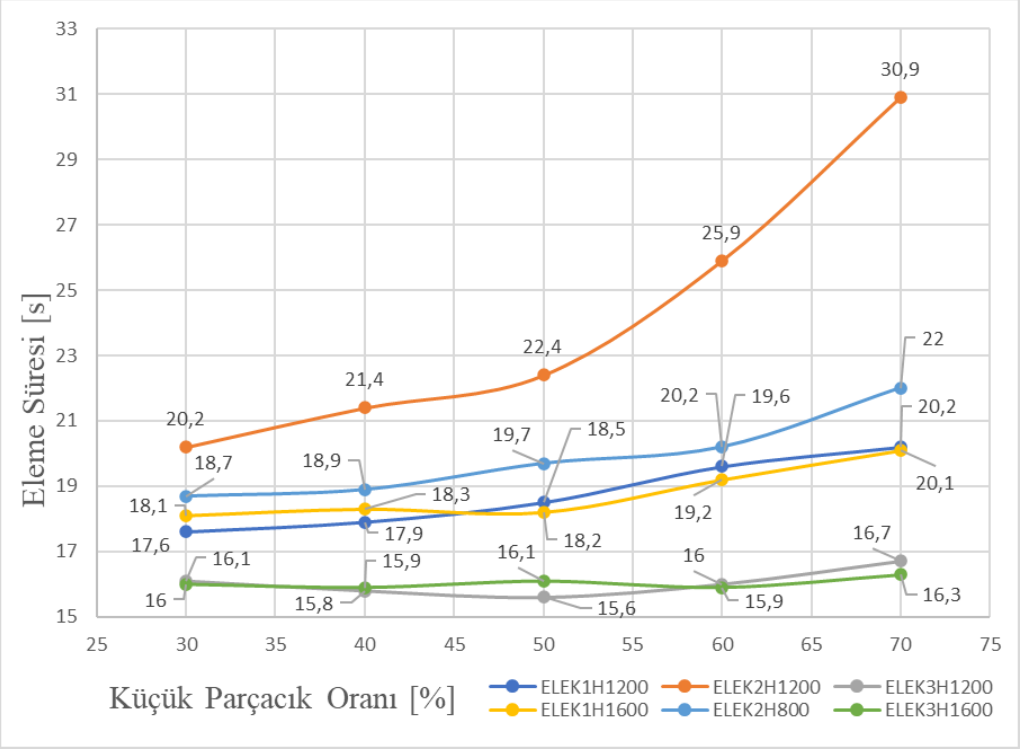
Şekil 4.22'deki Eleme Verimleri grafiği incelendiğinde, besleme hacmi değişkenindeki sonuçlara benzer şekilde, zaten eleme verimi yüksek olan Elek3'ün veriminin %1'den daha az bir kayıpla düştüğü görülmüştür. Eleklerin eleme kabiliyetleri azaldıkça verimlerinin hatve adımı artışından daha fazla etkilendiği Elek3 ve Elek1 kıyaslandığında görülebilir. Elek2'nin verimi ise hatve adım ölçüsü düşürüldüğü için yükselmiştir. Tüm elekler için yığındaki küçük parçacık oranı arttıkça verimin düşme eğilimi, iyileştirmelerin etkisinde de korunmuştur.



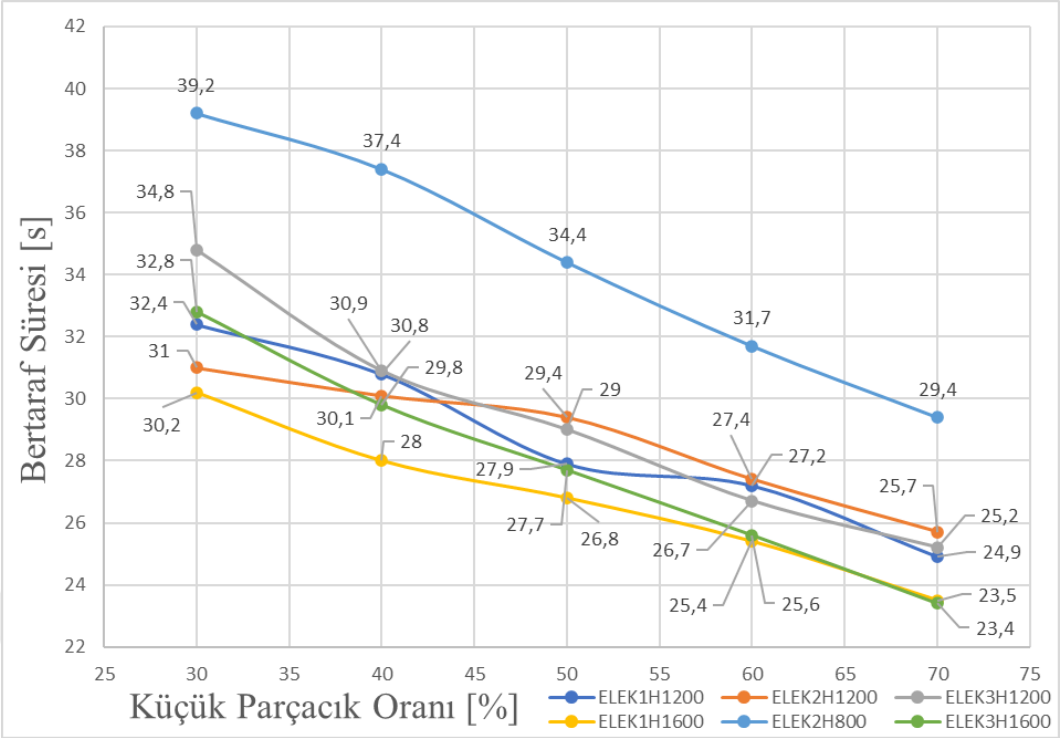
Şekil 4.21 İyileştirmeler sonrası eleklerin efektif kapasitelerinin parçacık dağılımına göre değişimi



Şekil 4.22 İyileştirmeler sonrası eleklerin eleme verimlerinin parçacık dağılımına göre değişimi



Şekil 4.23 İyileştirmeler sonrası eleklerin eleme sürelerinin parçacık dağılımına göre değişimi



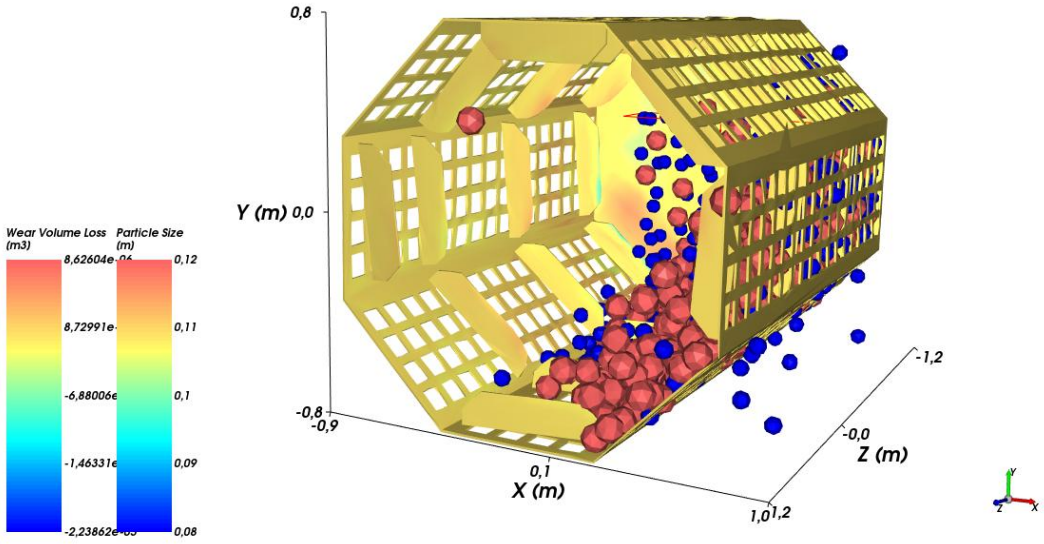
Şekil 4.24 İyileştirmeler sonrası eleklerin bertaraf sürelerinin parçacık dağılımına göre değişimi

Şekil 4.23'teki Eleme Süresi grafiği incelendiğinde, küçük parçacıkların oranı arttıkça Elek2 üzerinde yapılan iyileştirmenin net bir şekilde görülmektedir. Ancak Şekil 4.24'te tüm elekler için grafiği verilen bertaraf süresi arttığı için bu etki kapasiteye daha düşük oranda yansımıştır. Bu nedenle küçük parçacıkların %50 ve daha düşük oranda olduğu besleme koşullarında olumlu etki gösterememiştir.

4.4 Aşınma Analizleri

Önceki bölümde aşınma analizlerinin eleme analizlerinde kullanılan elekler üzerinde yapılmadığından ve bir aşınma eleği tasarımından bahsedilmişti. Bu aşınma eleği, gerçek elek formunda olmadığı için buradan alınacak sonuçlar birbirleriyle kıyaslama amacıyla kullanılmış ve bu kıyaslama sonucu incelenen durumlar için Aşınma Çarpanı tanımlanmıştır.

Şekil 4.25'te analiz sırasında aşınma eleğinin görüntüsü verilmiştir. Analiz boyunca renk kontürleri değişim göstererek aşınma miktarına göre bölgesel olarak renklenir ve hacim kayıpları geometri üzerinde şekil değişikliği olarak gözlenir.

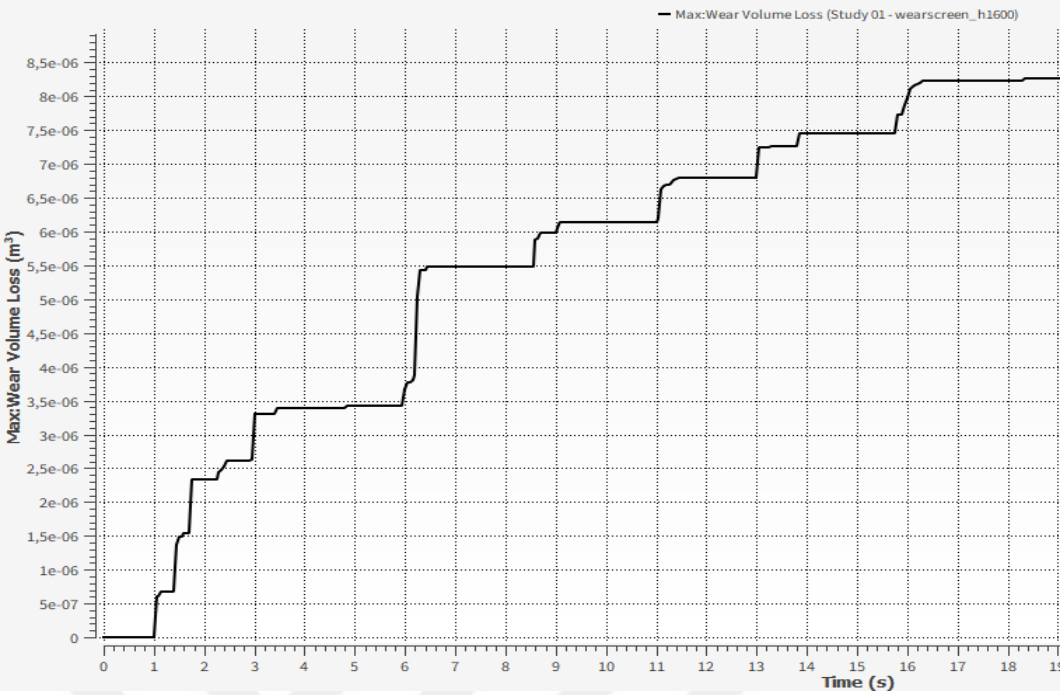


Şekil 4.25 Aşınma analizi esnasında bir görüntü

Aşınma Çarpanı, referans besleme koşulu olan 1 metreküp mutlak hacimle küçük ve büyük parçacıkların yığın içinde eşit kütlede bulunduğu durum için 1 olacak, diğer aşınma miktarları bu koşuldaki aşınmayla oranlanarak onların aşınma çarpanları da bulunmuştur.

Aşınma miktarlarının analiz sonucundan alınması için programdaki "Maksimum Aşınma Kaybı" verisi, eleklerin incelendiği koşuldaki Yeniden Yükleme Süresindeki değeriyle tablodan çekilmiştir. Çünkü bir elek, hatve adımı değiştirilerek parçacıkları daha farklı sürede bertaraf edebilir ve dolayısıyla aşınmaya da daha farklı sürede maruz kalabilir. Bu nedenle yeniden yükleme sürelerinin her koşuldaki aşınma miktarı için belirleyici olması mantıklı bir yaklaşım olacaktır.

İlgili koşullarda daha önce ölçülen yeniden yükleme süreleri, o koşullarda yapılan aşınma analizlerinin grafiklerinden o ana ait maksimum aşınmayı verecektir. Programdan çıkan örnek bir grafik Şekil 4.26'da verilmiştir. Bu nedenle toplanan aşınma miktarları karşılaştırılarak bulunan aşınma çarpanları, eleğin ömrüne ait ters orantılı bir parametre olarak ifade edilmiştir.



Şekil 4.26 Yazılım çıktısı olan örnek aşınma grafiği

Tablo 4.22 Farklı mutlak hacimdeki beslemelere göre aşınma değerleri

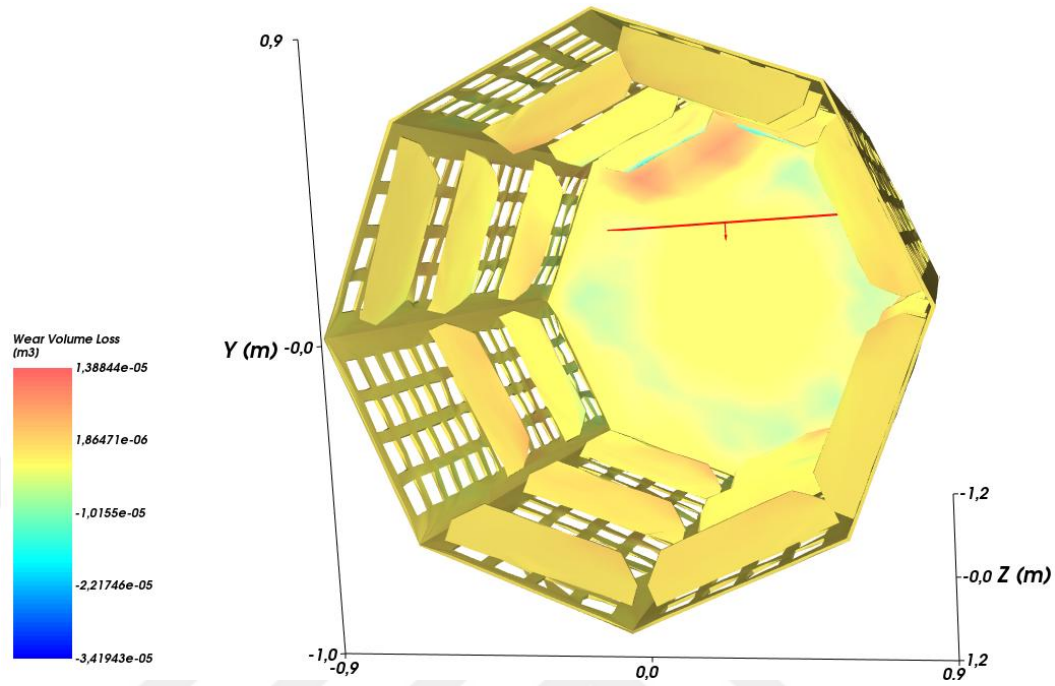
Hatve Adımı [mm]	Mutlak Hacim [m3]	Ortalama Yükleme Süresi [s]	Max Aşınma [m3]	Aşınma Çarpanı
1200	0,5	21,92	5,12E-06	0,676
1200	1	**21,2**	**7,57E-06**	**1,000**
1200	2	26,63	1,05E-05	1,387
1200	3	33,63	1,53E-05	2,021

Tablo 4.23 Küçük parçacıkların kütlesel oranına göre aşınma değerleri

Hatve Adımı [mm]	Küçük Parçacık [%]	Ortalama Yükleme Süresi [s]	Max Aşınma [m3]	Aşınma Çarpanı
1200	70	21,93	7,29E-06	**0,912**
1200	60	21,8	7,04E-06	**0,881**
1200	50	21,8	7,99E-06	**1,000**
1200	40	22,48	7,86E-06	**0,984**
1200	30	23,35	8,41E-06	**1,053**

Tablo 4.22 ve Tablo 4.23'te değişen besleme koşullarına göre bulunan aşınma değerleri ve buna bağlı olarak referans koşullardaki aşınmaya oranıyla bulunan

analiz çarpanı bulunmaktadır. Referans besleme koşulu (1 metreküp, eşit kütlede küçük ve büyük parçacıklar) aşınma çarpanı 1 olup kırmızı renk ile gösterilmiştir.

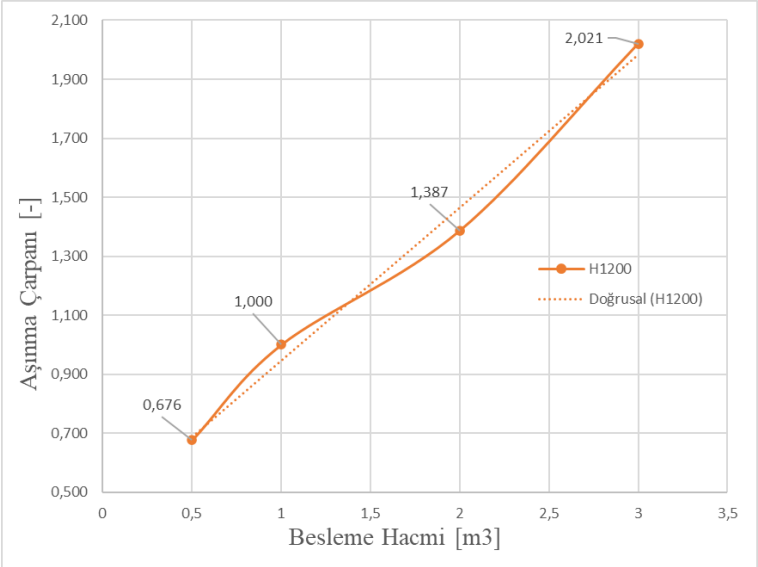


Şekil 4.27 Aşınma analizi sonrası eleğin görünümü

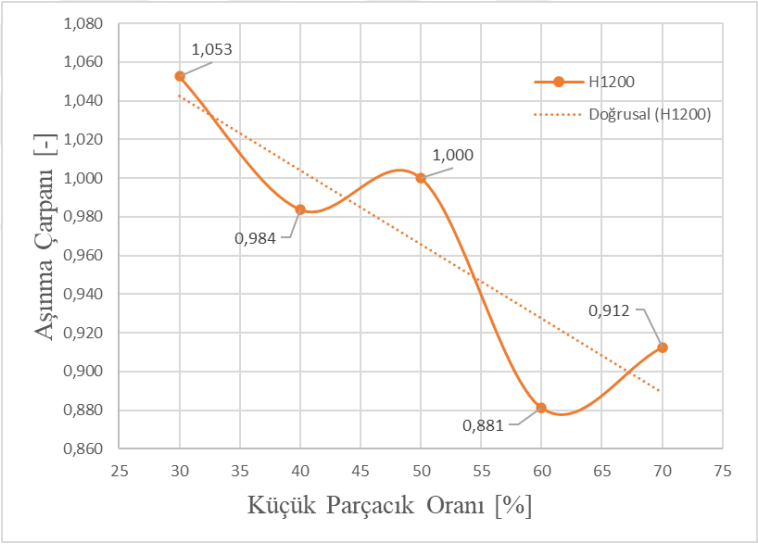
Şekil 4.27'de aşınma analizi sonrasında elek içindeki parçacıklar tamamen bittiğinde elek üzerindeki aşınmalar gösterilmiştir. Burada bölgesel olarak şekil değişimini ve aşınma miktarlarını incelemek mümkündür. En yüksek oranda aşınma hatve saclarının kenarlarında ve eleğin arkasını kapatan yüzeyde görülmektedir. Beslemenin yapıldığı bölgeden uzaklaştıkça aşınma miktarları azalmaktadır.

Şekillerde 1200mm hatve adımı ölçüsüne sahip eleklerin değişken besleme koşullarındaki aşınma çarpanları görülmektedir. Aşınma değerleri besleme hacmi arttıkça yükselme, küçük parçacıkların oranı arttıkça düşme eğilimindedir.

Şekil 4.28 ve Şekil 4.29'da ömür etkisindeki efektif kapasite değerleri görülmektedir. Aşınma etkisiyle 2 metreküp besleme hacminde kapasite eğrisi düşüş eğilimini göstermiş ve 3 metreküp besleme hacmine ulaşıldığında ömür etkisindeki kapasitede düşüş meydana gelmiştir. Böylece iyileştirilmemiş eleklerin bu koşullardaki optimum besleme hacimlerini 2 metreküp olarak belirlemek mümkündür.



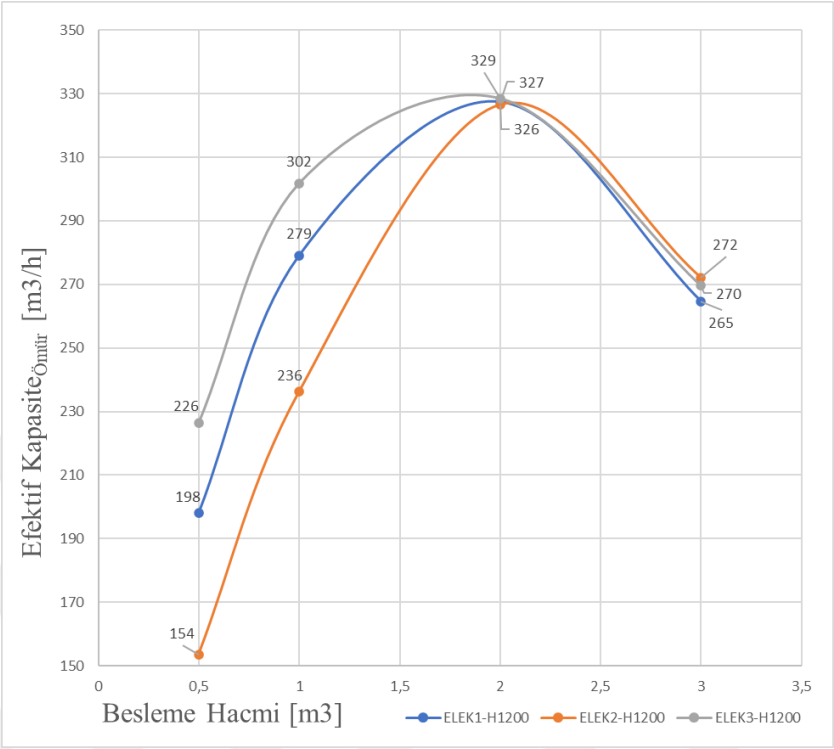
Şekil 4.28 1200 mm hatveli geometride aşınma çarpanının besleme hacmine göre değişimi



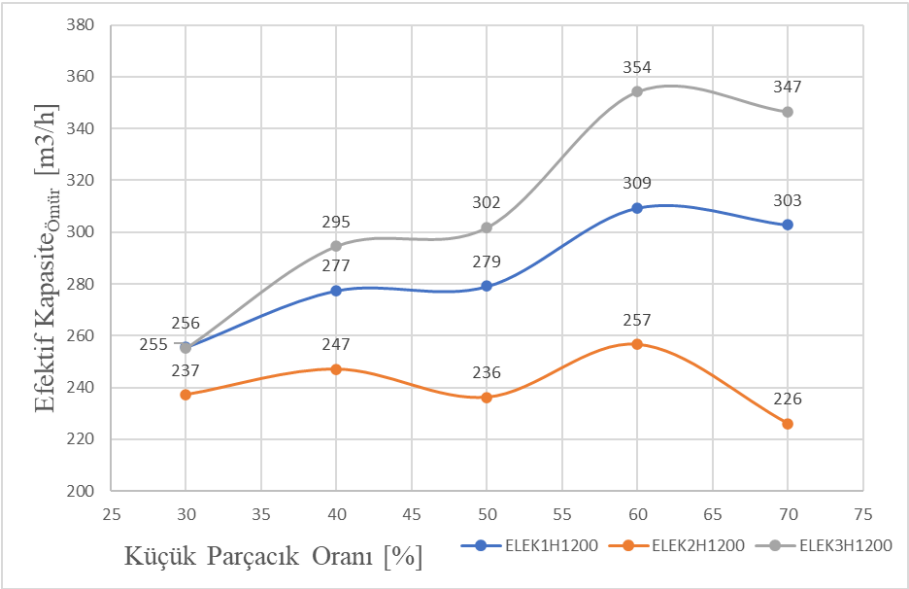
Şekil 4.29 1200 mm hatveli geometride aşınma çarpanının küçük parçacık oranına göre değişimi

Aşınma değerleri küçük parçacık oranı arttıkça belirgin bir düşüş gösterdiği için, bu düşüş ömür etkisindeki kapasiteye de yansımış ve Şekil 4.31'de görüldüğü gibi küçük parçacıkların yığın içindeki oranı arttıkça ömür etkisindeki kapasite de Elek1 ve Elek3 için artış göstermiştir. Elek1 ve Elek2 için eleme kabiliyetinin küçük parçacık oranı arttıkça yükselme eğilimi, aşınmanın da düşmesiyle etkisini artırmış ve kapasiteler arasındaki oransal fark artmıştır. Elek2, eleme kabiliyeti düşük olduğu için küçük parçacık oranı arttıkça kapasitesi düşme eğilimindedir. Aşınma miktarı da

düşme eğiliminde olduğu için Elek2'nin ömür etkisindeki kapasitesi yatay bir eğilim göstermiştir.



Şekil 4.30 1200 mm hatveli eleklerde kapasite ve ömür etkisi (besleme hacmine göre)



Şekil 4.31 1200 mm hatveli eleklerde kapasite ve ömür etkisi (parçacık dağılımına göre)

4.4.1 İyileştiriliş Eleklerin Aşınma Performansları

Hatve ölçüsündeki değişiklikler, 1200 mm hatveli elekleri temsilen oluşturulan aşınma eleğine uygulanmış ve delik geometrisi aynı olan üç farklı aşınma eleği oluşturulmuştur. Oluşturulan bu eleklerin aşınma analizleri de aynı besleme koşullarında çözülmüştür. Tablo 4.24'te besleme hacmi değişkeniyle, Tablo 4.25'te ise parçacık dağılımı değişkeniyle iyileştirilmiş elekler için alınan aşınma sonuçları görülmektedir.

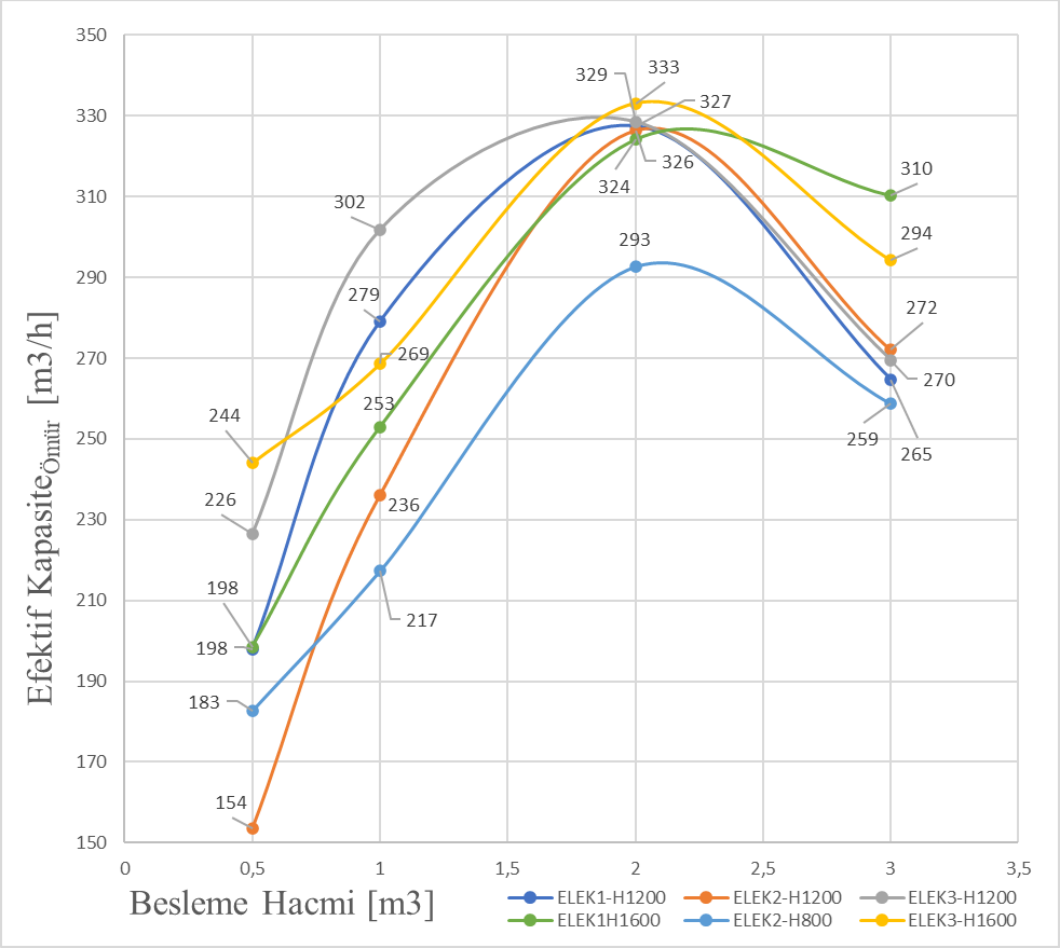
Tablo 4.24 İyileştirilen eleklerin besleme hacmine bağlı olarak aşınma değerleri

Hatve Adımı [mm]	Mutlak Hacim [m3]	Ortalama Yükleme Süresi [s]	Max Aşınma [m3]	Aşınma Çarpanı
800	0,5	26,25	4,45E-06	0,588
800	1	25,05	8,31E-06	1,098
800	2	30,15	1,05E-05	1,388
800	3	38,6	1,39E-05	1,836
1200	0,5	21,92	5,12E-06	0,676
1200	1	**21,2**	**7,57E-06**	**1,000**
1200	2	26,63	1,05E-05	1,387
1200	3	33,63	1,53E-05	2,021
1600	0,5	19,55	5,09E-06	0,672
1600	1	20,2	8,59E-06	1,135
1600	2	25,45	1,10E-05	1,453
1600	3	32,5	1,41E-05	1,867

Tablo 4.25 İyileştirilen eleklerin parçacık dağılımına bağlı olarak aşınma değerleri

Hatve Adımı [mm]	Küçük Parçacık [%]	Ortalama Yükleme Süresi [s]	Max Aşınma [m3]	Aşınma Çarpanı
800	70	23,7	6,33E-06	**0,792**
800	60	23,95	6,62E-06	**0,829**
800	50	25,05	8,31E-06	**1,040**
800	40	26,15	6,99E-06	**0,875**
800	30	26,95	8,75E-06	**1,095**
1200	70	21,93	7,29E-06	**0,912**
1200	60	21,8	7,04E-06	**0,881**
1200	50	21,8	7,99E-06	**1,000**
1200	40	22,48	7,86E-06	**0,984**
1200	30	23,35	8,41E-06	**1,053**
1600	70	18,825	5,59E-06	**0,700**
1600	60	19,525	6,31E-06	**0,790**
1600	50	20,2	8,59E-06	**1,075**
1600	40	21	7,81E-06	**0,977**
1600	30	22,275	8,26E-06	**1,034**

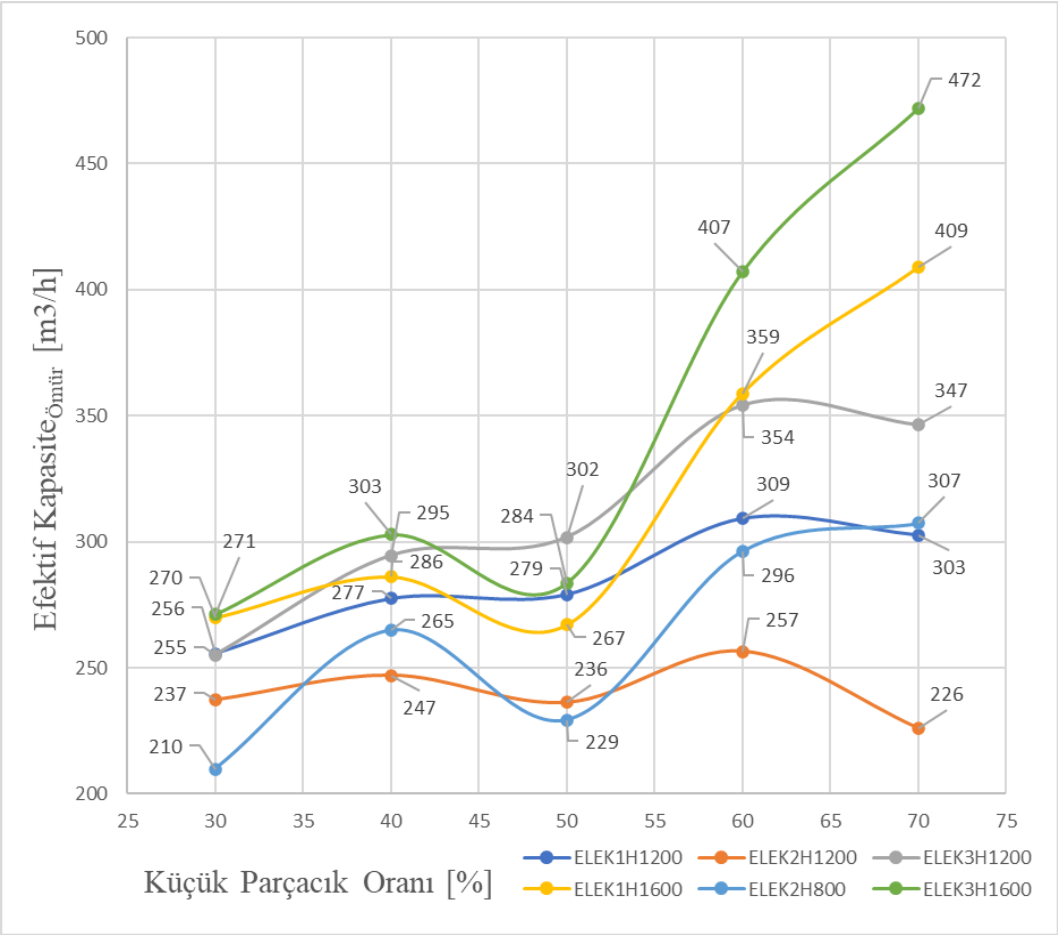
Kapasite iyileştirmesi yapılmış eleklerin de aşınma çarpanı etkisiyle hesaplanan ömür etkisindeki kapasite değerleri Şekil 4.32'de grafik üzerinde verilmiştir. Burada eleklerin tamamı için ideal mutlak besleme hacminin 2 metreküp olduğu görülmektedir. 2 metreküp mutlak besleme hacmi, küçük ve büyük parçacıkların kütlesel olarak eşit karıştığı yığınlar için 3,5 metreküp kepçe hacmi anlamına gelir. Yani iyileştirilmiş (1600mm hatve adımı ölçüsüne sahip) Elek3 kullanıldığında, her 25,4 saniyede bir yükleme yapıldığında bu sistem optimum kapasite ile çalışacak ve uzun ömürlü olacaktır.



Şekil 4.32 Tüm eleklerde besleme miktarına göre kapasite ve ömür etkisi

İyileştirilmiş elekler kıyaslanarak geliştirmelerin başarısı son durumda incelenecek olursa, optimum koşullarda Elek3 başarılıyken, 3 metreküplük mutlak besleme hacminde iyileştirilmiş Elek1 daha yüksek kapasite ve ömür sağlamıştır. Grafiklerin eğilimleri incelendiğinde daha yüksek hacimlerde de bu durum geçerli

olacaktır. Elek2'deki iyileştirme ise ilk besleme hacmi (0,5 metreküp) haricinde başarılı olamamıştır. Elek2, iyileştirme yapılmamış haliyle 3 metreküplük besleme hacminde Elek1 ve Elek3'ün üstünde bir kapasite sağlasa da, iyileştirme yapılmış Elek1 ve Elek3, ömür etkisiyle birlikte Elek2'nin üzerinde kapasiteye ulaşmıştır.



Şekil 4.33 Tüm eleklerde parçacık dağılımına göre kapasite ve ömür etkisi

İyileştirilmiş eleklerin aşınma çarpanının etkisiyle hesaplanan ömür etkisindeki kapasite değerleri, yığındaki küçük parçacık oranı değişkeniyle incelenerek ilk grafiğin üzerine eklenmiş ve Şekil 4.33'te gösterilmiştir. Elek1 ve Elek3 için eleme kabiliyetleri yüksek olduğu için küçük parçacıkların oranı arttıkça daha iyi performans gösterdiğinden bahsedilmişti. Bu eleklerde yapılan hatve iyileştirmeleri, eleme veriminde az miktarda düşüşe ve eleme süresinde az miktarda artışa neden olsa da, daha iyi bir bertaraf süresi sağlayarak ömür etkisindeki kapasite değerlerini yükseltmiş ve aşınmanın küçük parçacık oranı yüksek olan karışımlarda düşük

olması nedeniyle bu olumlu etkisi katlanarak artmıştır. Son durumda küçük parçacıkların düşük olduğu karışımlarda elek kapasiteleri birbirine yakın değerlerdeyken, küçük parçacık oranı arttıkça fark açılmış ve iyileştirilmiş Elek3, en fazla kapasiteye sahip elek olup Elek2'nin ilk halinin iki katı kapasiteye ulaşmıştır.

Elek2 üzerinde yapılan iyileştirme, parçacık dağılımı incelendiğinde genel olarak başarılı olmuş ve küçük parçacık oranı arttıkça, azalan aşınmanın da etkisiyle, ömür etkisindeki kapasitesi iyileşmiştir. Yüksek oranda küçük parçacık içeren yığınlar için Elek2'deki iyileştirmenin de başarılı olduğu görülmektedir. 1 metreküp mutlak hacim ve parçacık dağılımı değişkenindeki sonuçlara göre, Elek3'ün genel olarak diğerlerine göre üstün olduğu görülmektedir. Eşit oranda parçacık karışımı haricindeki koşullarda Elek3 üzerinde yapılan iyileştirme başarılı olmuştur.

Sonuçlar üzerinde yapılabilecek en kapsayıcı yorum, farklı yığın karakteristiği ve besleme hacimlerinde farklı elekler avantajlı olacağı için sistem tasarımı yapılırken öncelikle eleğin çalışacağı yığın analiz edilmelidir.

BÖLÜM BEŞ
TARTIŞMA VE ÖNERİLER

5.1. Sonuçların Yorumlanması

Elek tasarımları arasında yapılacak kıyaslama sonucunda, deliklerin toplam alanı ve delik boyutu aynı olsa da birim delik alanının düşük olduğu, Ø100mm dairesel delikleri bulunan Elek2, verimi ve kapasitesi düşük olan elek olmuştur. Delik tasarımı, elek performansına doğrudan etkiyen bir parametredir.

Birim delik alanı aynı olan iki delik geometrisi karşılaştırıldığında, uzun kenarı yörünge doğrultusunda olmak kaydıyla slotlu bir delik tasarımı yapmak, kare delik tasarımı yapmaya göre kapasiteyi arttırıcı bir çözümdür.

Küçük parçacıkların elek içinde kalması, büyük parçacıkların bertaraf edilmesini hızlandıran bir etken olmuştur. Çünkü eleme verimi düşük olan Elek2, bertaraf kabiliyeti en yüksek olan elek olmuştur.

Efektif kapasite, besleme hacmiyle artmıştır, fakat besleme hacmi 3 metreküpe ulaştığında, bu artışın yavaşlamaya başladığı gözlenmiştir. Aşınma çarpanlarının etkisi de göz önünde bulundurulduğunda 2 metreküp mutlak hacimde besleme yapmak, tüm elek modelleri için optimum kapasite ve ömür dengesini sunmaktadır.

Verimi yüksek olan ve küçük parçacıkları çabuk eleyebilen eleklerin hatve adım ölçüsü artırıldığında, bertaraf sürelerinin iyileştiği görülmüştür. Ancak besleme hacmi belirli bir sınırı aştığında, bu iyileştirmenin de kapasite artışı için yetersiz kaldığı görülmektedir. Çünkü elek malzemeye boğulmuş ve içindeki malzemeyi boşaltamamaktadır. Hatve adım ölçüsü bir kademe daha artırılacak olursa, verim kaybı daha çok olacak ve kapasite yine olumsuz etkilenecektir. Elek1 ve Elek3'e yapılan bu iyileştirmenin genel olarak başarılı olduğunu söylemek mümkündür. Elek1 ve Elek3'ün iyileştirilmiş versiyonları, diğer elekler gibi 2 metreküpten sonra kapasite ve elek ömrü açısından düşüş yaşasalar da en başarılı elekler olmuşlardır.

Düşük verimde ve bertaraf süresinde avantajlı olan elek, iyileştirilmek için hatve adımı ölçüsü küçültüldüğünde, düşük hacimlerde fayda sağlasa da hacimler büyüdükçe bertaraf edilemeyen malzeme kapasiteyi olumsuz etkilemeye başlamış ve

Elek 2'ye yapılan bu iyileştirme besleme hacminin değişken olduğu analiz koşullarında genel olarak başarısız olmuştur.

Besleme hacmi artırıldıkça aşınma miktarının lineer eğilimde bir artış gösterdiğini söylemek mümkündür. Ancak daha yüksek hacimlerde aşınma analizi yapıldığında ve aşınma incelemesi gerçek koşullara taşınabildiğinde, bu artışın üstel olacağı tahmin edilmektedir. Çünkü parçacıkların bertaraf sürelerindeki artış ve daha çok parçanın daha uzun süre eleğin içinde kalması aşınmayı artıracaktır.

Sabit kütleli bir yığının içindeki küçük parçacıkların oranı arttıkça eleme verimlerinde düşüş görülmüştür. Aynı şekilde bertaraf süreleri iyileşmiştir, çünkü parçacıklar eleğin sonuna kadar ilerlemeden deliklerden geçerek eleği boşaltmaktadırlar.

Aşınma miktarlarında dalgalanmalar görülse de küçük parçacıkların yığın içinde daha fazla miktarda oluşu aşınmayı düşüren bir etkendir. Bu nedenle Efektif $Kapasite_{Ömür}$ değerleri incelendiğinde küçük parçacıklar daha yüksek orandayken kapasitenin iki kat olduğu görülmektedir.

Hatve ölçüsü ve aşınma miktarı arasındaki ilişki incelendiğinde, küçük parçacıkların oranı düştükçe, hatvenin yüksek olmasının ve bertaraf kabiliyetinin artmasının olumlu etkisi görülmektedir. Besleme hacmi arttıkça hatve adım ölçüsü yüksek olan eleğin daha fazla aşındığı gözlenmiştir.

İyileştirmelerin kapasiteye olumlu etkisi de küçük parçacıkların oranı arttıkça artma eğilimindedir. Özellikle hatve adım ölçüsü azaltılan Elek2 için bu olumlu etki daha yüksektir. Çünkü bu iyileştirme diğer iki iyileştirmeden farklı olarak bertaraf süresini değil, eleme verimini arttırmak için yapılmıştır. Bu nedenle küçük parçacıkların oranı artınca olumlu etkisi görülmüştür.

Çalışmanın tamamında, 6 farklı elek ve basitleştirilmiş geometrilerinin aşınmaları 5 farklı besleme hacminde ve 5 farklı malzeme dağılımında incelenmiştir. Elek karakteristikleri incelenerek dezavantajlı olan çıktılar iyileştirilmeye çalışılmıştır. Elde edilen sonuçlar, sistemi uzun ömürlü ekipman kullanımı ve yüksek kapasiteyle

çalıştırmak için analiz edilmiştir. Farklı besleme koşulları için bu elekler arasından öne çıkan elekler de farklı olmuştur.

Literatür taramasıyla toplanan verilerle uyumlu olan bu çalışmanın sonucunda, elek tasarımının sistemdeki malzemeye göre yapılmasının önemi de tecrübe edilmiştir.

5.2. Sonraki Çalışmalar

Bu çalışmanın kapsamı genişletilerek farklı malzemeler ile analiz yapılıp parametrelerin çıktılar üzerindeki etkisi incelenebilir.

Aşınma analizi ve eleme analizi aynı ortama taşınabilir, bunun için eleme analizinin basitleştirilmesi veya analiz yazılımının eğri yüzeylerde aşınma analizinin daha hızlı çözmesi gerekmektedir. Bu koşullarda aşınma verileri gerçek değerleriyle elde edilebilir.

Sistem optimizasyonu üzerinde çalışma yapılarak elek dönme hızı, besleme hızı, besleme süresi gibi parametreler değiştirilerek iyileştirmeler makine geneline taşınabilir.

Farklı tasarımdaki eleklerin yapısal analizleri yapılarak delik dizilimleri, boşluklar, hatve sacları gibi geometrilerin etkisi incelenerek yeni bir inceleme konusu oluşturulabilir.

5.3. Çalışmanın Sağlayacağı Faydalar

Bu çalışma, Mobil Eleme Ünitesi'nde bulunan Tambur Elek tasarımı ve iyileştirmelerinin analizini içermektedir. Tek tip elek tasarlamak yerine kullanıcının elemek istediği malzemeden numune alınarak analize tanımlanıp yapılacak bir çalışmayla en etkili çözümü sunmak mümkün olacaktır.

Tambur elek tasarımında bu şekilde değişiklikler yapmanın gerekliliği görüldükten sonra, üretim aşamasında veya sahada bu iyileştirmenin yapılmasını mümkün kılacak yeni tasarım fikirleri doğacak ve bu sektörü şekillendirecektir.

KAYNAKLAR

Alter, H., Gavis, J. ve Renard, M.L. (1981), Design models of trommels for resorce recovery processes, Resources and Conservation, 6(1981), 223-240. https://doi.org/10.1016/0166-3097(81)90051-1

Andre, F.P. ve Tavares, L.M. (2020), Simulating a laboratory-scale cone crusher in DEM using polyhedral particles, *Powder Technology*, 372, 362-371. https://doi.org/10.1016/j.powtec.2020.06.016

ANSYS Learning Hub, Introduction to Discrete Elements Method using Ansys Rocky DEM, (2024)

Bicanic, N., (2007), Discrete element methods, *Encyclopedia of Computational Mechanics, Vol. 1: Fundamentals*, Chapter 11, (1-32) https://doi.org/10.1002/0470091355.ecm006.pub2

Chen, Y., Hsiau, S., Lee, H., Chyou, Y. ve Hsu, C., (2010) Size seperation of particulate in a trommel screen system. *Chemical Engineering and Processsing: Process Intensification* , 49, 1214–1221 . http://doi.org/10.1016/j.cep.2010.09.003

Cundall, P.A. (1971) A computer model for simulating progressive, large-scale movements in blocky rock systems, *Rock Fracture, Proc. Int. Symp. Rock Mech., Nancy*, 4–6 October, 1: Paper II-8.

Cundall, P.A. (1974) Rational design of tunnel supports: A computer model for rock mass behavior using interactive graphics fort he input and output of gemoetrical data: Final report, *Missouri River Division Technical Reports*, 2-74.

Cundall, P.A. ve Hart, R.D. (1985), Development of generalized 2-D and 3-D distinct element programs for modeling jointed rock, *U.S. Army Corps of Engineers, Itasca Consulting Group.*

Cundall, P.A. ve Strack, O.D.L. (1979) A discrete numerical model for granular assemblies. *Geotechnique*, 29, 47-65. https://doi.org/10.1680/geot.1979.29.1.47

Duman, İ.C. (2021), Maden transfer ekipmanlarının ayrık elemanlar yöntemi ile aşınma analizi, *Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi*

Fonte, C.B., Oliveira Jr, J.A.A ve Almeida, L., (2015) DEM-CFD Coupling: mathematical modelling and case studies using Rocky-DEM and ANSYS FLUENT, *Eleventh International Conference on CFD in the Minerals and Process Industries*. Retrieved https://www.cfd.com.au/cfd_conf15/PDFs/139 FON.pdf

Gelnar, D. ve Zegzulka, J., (2019) Input parameters for DEM-Bulk material, *Discrete element method in the design of transport systems: Verification and validation of 3D models, Springer Nature*, 51-75.
https://doi.org/10.1007/978-3-030-05713-8_6

Glaub, J.C., Jones, D.B., Tleimat, J.U. ve Savage, G.M. (1982), Trommel screen research and development for applications in resource recovery.
https://doi.org/10.2172/5201540

Goodman, R.E., Taylor, R.L. ve Brekke, T.L. (1968) A model for the mechanics of jointed rock, *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division,* 94(3), 637-659.
https://doi.org/10.1061/JSFEAQ.0001133

Hacıfazlıoğlu, H. (2017), Elek seçimi, *Kömür Hazırlama Tesis Tasarımı Ders Notu, İstanbul Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Maden Mühendisliği bölümü,* part1 retrieved https://www.academia.edu/32268471/Endüstriyel_elek_seçimi_nasıl_ yapılır

Hammah, R.E., Yacoub, T., Corkum ve B., Curran J.H. (2008) The practical modelling of discontinuous rock masses with finite element analysis, *42nd U.S. Rock Mechanics-2nd U.S.- Canada Rock Mechanics Symposium,* 08-180.

Islam, M.S., Kabir, A., Siraj, M.T., Hossain, M.M., Rahman, M.M. ve Ahmed S.M.F. (2023), Experimental study of granular materials mixing in a slowly rotating drum by image analysis, [Conference paper], 1st International Conference

on Mechanical, Manufacturing and Process Engineering (ICMMPE 2022). https://pubs.aip.org/aip/acp/articleabstract/2825/1/040006/2919370/Experimental-study-of-granular-materials-mixing-in?redirectedFrom=fulltext https://doi.org/10.1063/5.0172294

Katinas, E., Rostislav, C., Linda, M. ve Kure, J. (2021), Sensitivity analysis of the influence of particle dynamic friction, rolling resistance and volume/shear work ratio on wear loss and friction force using DEM model of dry and sand rubber wheel test, Tribology International, *Tribology International*, 156, 1-14 https://doi.org/10.1016/j.triboint.2021.106853

Li, H., Zeng, R., Niu, Z. ve Zhang, J., (2022), A calibration method for contact parameters of maize kernels based on the discrete element method, *Agriculture*, 12(5), 664 https://doi.org/10.3390/agriculture12050664

Lorig, L.J. ve Cundall, P.A. (1989). Modeling of reinforced concrete using the distinct element method. *Fracture of Concrete and Rock. Springer*,. 276-287. https://doi.org/10.1007/978-1-4612-3578-1_28

Moodley, T.L. ve Govender, I. (2022), Experimental validation of DEM in rotating drums using positron emission particle tracking, Mechanics Research Communications, 121, 1-9. https://doi.org/10.1016/j.mechrescom.2022.103861

Olsen, L. ve Carnes, B. (2001), Screen Capacity Calculation, *ASTEC Technical Paper T-JCI-201*.

Orhan E.C., Harzanagh, A.A. ve Ergün, Ş.L., (2019), Endüstriyel elemenin sayısal modellenmesi 1.Bölüm: AEY modelinin geliştirilmesi ve sınanması, *Bilimsel Madencilik Dergisi*, 58(1), 17-29. https://doi.org/10.30797/madencilik.537642

Ren, N., Wang, Z. ve Bai, X. (2023), Motion parameter optimization of reciprocating vibrating screen based on discrete element method, *Food Machinery*, 39(2), 63-67 https://doi.org/10.13652/j.spjx.1003.5788.2022.80361

Shi, G.H., (1992), Discontinuous deformation analysis: A new numreical model fort he statics and Dynamics of deformable block structures, *Engineering Computations*, 9, 157-168.
http://dx.doi.org/10.1108/eb023855

Tamas, K., Földesi, B., Radies, J.P., Jori, I.J. ve Fenyvesi, L. (2015) A simulation model for determining the mechanical properties of rapeseed using the discrete elements method, *Periodica Polytechinca Civil Engineering*, 59(4), 575-582.
https://doi.org/10.3311/PPci.8173

Tino, A.A. ve Tavares, L.M. (2021), Simulating breakage tests using the discrete element method with polyhedral particles, *Computational Particle Mechanics*, 9, 811-823.
https://doi.org/10.1007/s40571-021-00448-4

Tong, Z.B., Yang, R.Y., Chan, H.K. ve Yu, A.B. (2023). Multiphase flows in pharmaceutical applications. *Handbook of Multiphase Flow Science and Technology. Springer, Singapore.* 749-772.
https://doi.org/10.1007/978-981-287-092-6_22

Walton, O.R. (1993) Numerical simulation of inelastic, frictional particle-particle interactions. *Particulate Two Phase Flow, 884-912*

What is DEM: Theoretical background behind the Discrete Element Method (DEM) Altair, E-Book, (2024) retrieved https://altair.com/docs/default-source/resource-library/ebook_what_is_dem_theoretical_background_behind_the_discrete_element_method.pdf?sfvrsn=975cfcf1_3

Yin, Z., Ma, D. ve Li, T. (2024), Effect of Grinding Media Grading on Liner Wear and Load Behavior in Ball Mill by Using Rocky DEM, *Lubricants*, 12(340), 1-11
https://doi.org/10.3390/lubricants12100340

Zhao, G., Pu, K., Xu, N., Gong, S., Wang, X. (2023), Simulation of particles motion on a double vibrating flip-flow screen surface based on FEM and DEM coupling, *Powder Technology*, 421, 1-15
https://doi.org/10.1016/j.powtec.2023.118422